



PREMIER MINISTRE

**Commissariat général
à la stratégie
et à la prospective**

**Département
Développement durable**

Jun 2013 **RAPPORTS
& DOCUMENTS**

**Simulation dynamique
du trafic urbain**

**Contribution
André de Palma**

Tome 2

Rapport
« L'évaluation socio-économique en période de transition »

Groupe de travail
présidé par Émile Quinet

Sommaire

1	RESUME LONG	5
2	HISTORIQUE	8
3	L'OFFRE	9
4	LA DEMANDE	11
5	AJUSTEMENT VERS UN ETAT STATIONNAIRE	13
6	RESULTATS THEORIQUES	15
6.1	L'ÉQUILIBRE	15
6.2	OPTIMUM ET TARIFICATION DE PREMIER RANG	16
7	SIMULATION	17
7.1	DOMAINE D'ÉTUDE.....	17
7.2	LES DONNÉES D'ENTRÉE	19
7.2.1	<i>Calibrage du modèle</i>	19
7.2.2	<i>Les paramètres de comportement</i>	19
7.2.3	<i>Estimation de α, β et γ</i>	19
7.2.4	<i>Horaires préférés d'arrivée</i>	20
7.2.5	<i>Bases de données utilisées</i>	21
8	DONNEES DE SORTIE	21
8.1	LE SCÉNARIO DE BASE, SANS TARIFICATION.....	21
8.2	RÉSULTATS DES DIFFÉRENTS PROJETS DE TARIFICATION DE LA CONGESTION	23
8.2.1	<i>Schémas de tarification</i>	23
8.2.2	<i>Résultats agrégés</i>	24
9	CONCLUSION	27
10	REFERENCES	29

1 Résumé long

a) Genèse du modèle METROPOLIS

METROPOLIS est un logiciel de planification du trafic dynamique. Dans ces modèles, la congestion dépend de l'heure de la journée. METROPOLIS a été développé à l'université de Genève sous l'impulsion d'André de Palma et en collaboration avec Fabrice Marchal et Yurii Nesterov (voir, de Palma, Marchal et Nesterov, 1997 et de Palma et Marchal, 1996, 1999, 2005, 2008 et de Palma, Kilani et Lindsey, 2005). Il a été ensuite utilisé dans différentes universités et centres de recherche (en Suède, aux Etats-Unis, au Canada, en Corée, en Suisse et en Belgique). Il est actuellement aussi utilisé de manière régulière à l'ENS Cachan. Ce logiciel est sur le point d'être intégré à un modèle de localisation du sol, UrbanSim, développé par Paul Waddell.

METROPOLIS se fonde sur les principes économiques décrits par William Vickrey (Vickrey, 1969) et Arnott, de Palma et Lindsey (1992). Pour une revue récente des modèles dynamiques, nous renvoyons les lecteurs à Arnott, de Palma et Lindsey (1998) et à Palma et Fosgerau (2011).

METROPOLIS est un modèle mésoscopique de déplacement qui traite la demande de transport et les déplacements de manière individuelle et microscopique. Par contre l'offre de transport (le flux de trafic) est représentée de manière macroscopique.

Le logiciel est composé d'un moteur de simulation écrit en langage C++ et d'une interface utilisateur écrit en Java. Le moteur de simulation est compilé et exécutable sous Linux. Les données et les paramètres de simulation sont stockés dans une base de données MySQL.

b) Fonctionnalités

METROPOLIS décrit conjointement les choix modaux, d'horaire de départ et d'itinéraire des automobilistes. Chaque véhicule est simulé individuellement par le logiciel. La modélisation de la congestion sur chacun des tronçons routiers est réalisée à un niveau agrégé ou macroscopique. Une fonction de congestion, basé sur la théorie des files d'attente décrit les délais de déplacement sur chaque tronçon et caractérise l'offre. La demande est représentée à un niveau microéconomique à l'aide d'un modèle de choix discret. Chaque déplacement est modélisé selon le choix de mode, d'itinéraire et d'horaire de départ. METROPOLIS utilise un modèle Logit emboîté à deux étapes qui prend en compte deux types de modes de transport, voiture ou transport en commun, dans le nœud supérieur, et un choix continu pour l'heure de départ dans le nœud inférieur. Ainsi, les déplacements ne sont pas répartis ex ante dans des intervalles de temps prédéfinis comme « heure de pointe » et « non-heure de pointe », ce qui introduirait de très sérieux biais et incohérences. Le coût généralisé du mode « voiture » inclut trois composantes : le coût du temps de déplacement, le coût du deshorage (coût d'arrivée en avance ou en retard) et les charges supportées par l'utilisateur. Cette fonction suit donc le modèle classique déjà décrit de Vickrey (1969).

METROPOLIS utilise un modèle de choix d'itinéraire fondé sur les temps de trajet dynamiques d'un point à un autre. L'utilisateur sélectionne l'itinéraire pour lequel le temps de trajet dynamique est le plus court. Cette décision est prise en fonction de la

situation en temps réel sur les tronçons considérés, ainsi que sur le reste du réseau au-delà de la destination. Remarquons que dans METROPOLIS, une journée est équivalente à une itération. Le logiciel définit donc un processus d'apprentissage dans lequel les usagers acquièrent des connaissances sur leurs déplacements et utilisent ces informations pour modifier leurs choix de déplacement le jour suivant.

En ce qui concerne l'alternative « transport en commun », le coût généralisé d'un déplacement entre une origine et une destination donnée est considéré comme une donnée exogène et indépendante de l'horaire. Ainsi, les transports en commun n'ont pas d'externalités ni négatives ni positives, et les choix d'itinéraires et d'horaires de départ ne sont pas modélisés explicitement.

Le bien-être est mesuré à l'aide du surplus social. Le premier composant est le surplus des consommateurs, qui prend en compte les externalités liées au temps de trajet et au deshorage. La seconde composante est formée par les revenus du péage et des autres charges. Ces revenus sont multipliés par un coefficient de Coût d'opportunité des fonds publics, (fixé à 0,1437). La composante finale du surplus social est constituée des coûts monétarisés des externalités autres que la congestion. La fonction de surplus ne résulte pas d'une approximation, mais est le résultat d'un calcul numérique exact, étant données que les mesures de surplus dans les modèles de choix discrets sont bien connues (voir Ben-Akiva et Lerman, 1985 et Anderson, de Palma et Thisse, 1992).

c) Calibrage du modèle

Le modèle a été calibré pour les villes de Lyon, Genève, Lausanne, Zurich, Stockholm, Séoul, et Chicago. METROPOLIS est actuellement couramment utilisé sur l'Île-de-France. Le réseau d'Île-de-France est codé à l'aide de 1 289 zones internes. 50 de ces zones représentent les points d'entrée/sortie de la région avec les régions voisines. Les arrondissements de Paris et les communes les plus grandes ont été divisés en plusieurs zones. Les communes les plus petites dans les franges périphériques de la région ont été agrégées. En résumé, le réseau codifié contient 43 857 liens liés par 4 462 connecteurs.

L'implémentation d'un simulateur dynamique requiert l'estimation de paramètres de comportement spécifiques à l'aire d'étude. Les principaux paramètres nécessaires au calage de METROPOLIS sont la valeur du temps, et les pénalités de deshorage, pour l'arrivée en avance et pour l'arrivée en retard. Ces données sont été collectées au cours des enquêtes MADDIF et MIMETIC.

Le calage du modèle nécessite aussi des données de comptage afin de déterminer les paramètres de l'offre, essentiellement les capacités des routes.

d) Scénario de Base

Le modèle a été calibré en utilisant des flux de trafic sur certains liens sélectionnés (environ 14 % du réseau total), des temps de trajet sur certains couples Origine-Destination sélectionnés, la distribution des heures de départ et d'arrivée et le temps de déplacement moyen. Pour de plus amples informations sur le processus de modélisation, les lecteurs intéressés peuvent se reporter à Engelson et al. (2012). Nous décrivons principalement dans la suite de ce texte, d'une part la calibration du

modèle de base, et d'autre part l'application de différents projets de tarification de la congestion. Nous comparons aussi ces résultats avec ceux du scénario de base.

Le scénario de base s'appuie sur la demande de transport estimée pour l'année 2009 par le modèle régional MODUS. Pour des raisons de gains de temps de simulation, nous ne conservons que 14 % de l'échantillon initial, et toutes les autres composantes du modèle sont adaptées à cette modification.

L'Enquête globale de transport 2001 montre que le temps moyen de trajet en Voiture Personnelle est d'environ 19 minutes à l'heure de pointe du matin. Notre simulation suggère un temps moyen de trajet de 19,44 minutes entre 6 heures du matin et 10 heures, ce qui est très proche des observations de l'EGT. Cette même enquête montrait la répartition modale suivante : 50 % voiture personnelle, 36 % transports en commun et 14 % vélo/marche à pieds. METROPOLIS ne considère que deux modes de déplacement : la voiture personnelle (VP) et les transports en commun. La répartition simulée est 51,5 % de déplacements en VP et 48,5 en transports en commun. Le coût moyen d'un déplacement en VP est d'environ 10,2 €. L'indice de congestion, défini comme le rapport du temps de déplacement avec congestion sur le temps de déplacement sans congestion s'élève à 54 %, ce qui signifie que les trajets sont moitié plus longs entre 6 et 10 heures que lorsqu'il n'y a pas de congestion.

Les coûts externes combinés de bruit, d'accidents et d'émissions de CO₂ (tous considérés comme proportionnels à la distance) s'élèvent à 0,83 € par conducteur dans la fourchette basse de l'évaluation, et à 1,50 € par conducteur dans la fourchette haute.

e) Sortie de METROPOLIS

Les sorties du Modèle METROPOLIS se présentent à la fois au niveau désagrégé (par tronçon) et au niveau agrégé. Au niveau désagrégé, les sorties de base sont les flux de véhicules à chaque unité de temps ainsi que les temps de trajets entre chacun des nœuds du réseau. De ces données de base, on tire une série d'informations requises dans les études: niveau de congestion, nombre de véhicules-kilomètres (et par conséquent niveau d'accidents et de pollution), isochrones, etc. Une interface graphique permet de visualiser ces données.

METROPOLIS fournit aussi des informations agrégées. Celles-ci sont calculées sur l'ensemble du réseau. Elles sont reprises dans le tableau ci-dessous, à titre illustratif.

Tableau 1 : Illustration, sorte des informations agrégées

Mesure d'efficacité	Unités	Valeurs
Nombre d'utilisateurs	[0]	1 166 840
Nombre de véhicules	[0]	608 686
Temps de trajet	min	19,0
Coût généralisé du trajet	€	10,0
Coût de deshorage	€	3,3
Coût sans congestion	€	4,1
Revenus collectés	€	0
Surplus par usager (à une constante additive près)	€	- 9,3
Mesure de l'équité (Gini)	€	5,9

Mesure d'efficacité	Unités	Valeurs
Fraction des arrivées précoces	%	53,8
Fraction des arrivées à temps	%	($\Delta = 10$ min) 20,5
Fraction des arrivées tardives	%	25,7
Niveau de congestion	%	51,1
Véhicule-kilomètres	10^6 km	8,5
Vitesse moyenne	km/hr	46,8

Source : calculs par l'auteur

2 Historique

Les modèles de simulation de trafic routier, ont connu un premier essor grâce à Beckmann, McGuire et Winston (1956), qui en ont proposé une formulation en termes d'optimisation convexe. Le problème peut être formulé de la manière suivante: étant donné une matrice origine-destination, un réseau de transport et des lois de congestion, quels sont les flux d'automobiles sur chaque lien à l'équilibre ? La connaissance de ces flux permet de calculer les temps de trajets et les externalités (émissions de Dioxyde de Carbone, accidents, etc.) de manière plus ou moins précise.

Ces modèles sont dits « statiques » car ils supposent que la congestion est constante pendant la période de modélisation. L'avènement des ordinateurs dans les années 70 a permis le développement de logiciels permettant de calculer des équilibres sur des réseaux simples. Le premier logiciel est Emme2, qui est actuellement distribué par la société canadienne Inro. À ce jour, une grande majorité d'études utilisent toujours des modèles statiques, étant donné leur grande simplicité conceptuelle.

Cependant, les hypothèses des modèles statiques sont intenable pour plusieurs raisons. Nous en citons ci-dessous sept parmi les plus importantes :

1. la congestion dépend de l'heure de la journée ;
2. le choix de l'heure de départ affecte le niveau de congestion ;
3. le péage modifie le choix de l'heure de départ ;
4. le coût généralisé des usagers dépend autant du temps de trajet que des coûts de deshorage ;
5. le partage modal dépend du coût généralisé, qui dépend lui-même des coûts de deshorage ;
6. les politiques classiques ont pour effet de modifier la forme et le positionnement du pic horaire ;
7. les politiques d'horaire flexibles et décalés sont aussi efficaces que les schémas de tarification.

Les modèles dynamiques ont été découverts indépendamment par Vickrey, qui a écrit un article fondateur dans *American Economic Review* en 1969, que par Arnott, de Palma et Lindsey, qui ont écrit dans la même revue un article en 1992, cité 500 fois d'après Google Scholar. Parallèlement, de Palma A., Ben-Akiva C. Lefèvre et N. Litinas (1983) ont introduit la version stochastique des modèles dynamiques. Dans ce cas, le choix de l'heure de départ n'est pas déterministe, mais suit un modèle Logit continu. Cette extension est importante pour les applications numériques.

Une première tentative de résolution d'un modèle dynamique de très petite taille (quelques routes en parallèle) a été réalisée par Ben-Akiva, M., A. de Palma et P. Kanaroglou (1986). Des tentatives d'extensions à un réseau général ont été entreprises par Pierre Hansen et André de Palma, mais ont conduit à des simulations ayant des temps de calcul prohibitifs (certaines raisons sont expliquées dans de Palma A., et P. Hansen, 1991 et de Palma A., P. Hansen et M. Labbé, 1990). Le premier calcul général d'équilibre dynamique a été réalisé par Yurii Nesterov (l'un des meilleurs spécialistes en analyse convexe dans le monde) et par Fabrice Marchal, ingénieur et informaticien, ainsi que par l'auteur de ce document.

Le logiciel METROPOLIS a vu le jour à Genève, mais a été depuis lors amélioré grâce aux travaux théoriques, et aux résultats empiriques, menés essentiellement au ThEMA et plus récemment au Centre d'économie de la Sorbonne, antenne de Cachan. Plusieurs autres utilisateurs de METROPOLIS nous ont permis d'améliorer le logiciel.

3 L'offre

Nous présentons ci-après le modèle théorique à la base du système de simulation METROPOLIS. Nous étudions tout d'abord l'offre, qui décrit, étant donné le nombre d'usagers, le temps de trajets pour traverser un lien, ou de manière plus générale pour aller d'un point à l'autre du réseau. La capacité des infrastructures routières est limitée. On pose s le nombre d'usagers par minute qui peuvent utiliser en même temps une route donnée sans créer de congestion. Au-delà de ce nombre, il se crée une file d'attente ou de la congestion. Si la demande totale pour cette route est N alors $\frac{N}{s}$ représente le temps variable nécessaire pour que l'ensemble des utilisateurs quittent l'endroit congestionné (en dehors du temps de trajet minimum).

Dans certains cas, le temps de trajet est une fonction non-linéaire de la densité de véhicules. METROPOLIS accepte des formulations des temps de trajets fonction des densités de véhicules ou des flux d'entrée des véhicules sur le tronçon considéré.

Considérons une route. Si $R(t)$ représente le nombre total d'usagers partis qu'à la date t alors, $R'(t) = \rho(t)$ représente le nombre de voyageurs par unité de temps qui partent et donc entrent sur le lien. Soit T_0 , la date de départ du premier voyageur. Alors $s(t - T_0)$, dénote le nombre de voyageurs qui sont sortis du réseau depuis la date T_0 à la date t si la congestion a été ininterrompue depuis l'instant initial jusque t . On en déduit le nombre de voyageurs sur le lien à l'instant t , égal à la différence entre le nombre de voyageurs entrants et sortants.

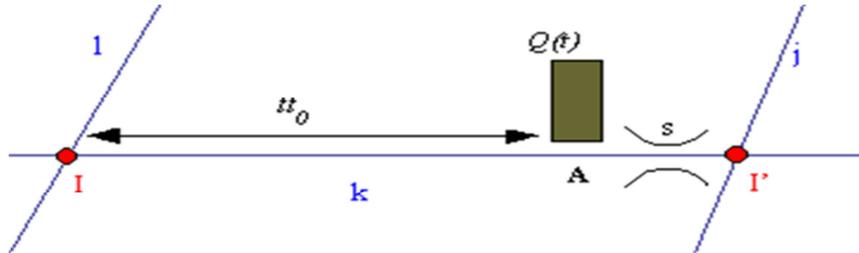
$$Q(t) = \int_{T_0}^t \rho(u) du - s(t - a_0)$$

Le temps de trajet pour un automobiliste entrant en t est alors:

$$tt(t) = tt_0 + \frac{Q(t)}{s} = tt_0 + \frac{1}{s} \int_{T_0}^t \rho(u) du - (t - a_0),$$

où tt_0 représente le temps de trajet sans congestion (fonction de la vitesse maximale légale).

Figure 1 : File d'attente verticale

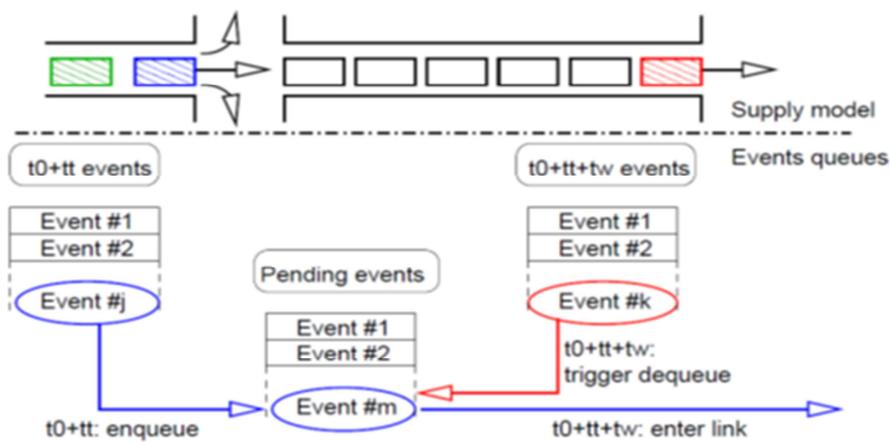


Source : Marchal, 2001

La question la plus délicate est relative à la modélisation de phénomènes non récurrents, comme les blocages aux carrefours. En effet, d'une part ces processus ne sont pas stationnaires et d'autre part ils ne sont pas prévisibles, comme l'observation quotidienne en milieu urbain le suggère. METROPOLIS se base sur des heuristiques, qui permettent aux automobilistes de savoir s'il vaut la peine d'attendre à un carrefour que la voie se débloque (mais en attendant qu'une voie se libère, cet automobiliste ralentit ou même bloque d'autres véhicules ce faisant).

Dans la figure ci-dessous, on considère une intersection avec plusieurs sorties et une arrivée. Les véhicules qui arrivent sont dans une file d'attente, qui avance en fonction de l'état de congestion de la file d'attente en aval. Lorsque celle-ci avance, un signal (flèche rouge) est envoyé à la file d'attente. Cette file d'attente peut être verticale ou horizontale. Dans ce dernier cas, elle occupe de la place et sera elle-même capable de rendre l'accès au lien sur lequel les véhicules attendent impossible de sorte que le modèle peut ainsi générer des blocages qui tendent de manière systémique à bloquer l'ensemble du système. Les véhicules qui attendent pour entrer sur une intersection ont aussi la possibilité, s'ils deviennent impatient, de modifier leur décision initiale d'emprunter le lien initial pour changer leur itinéraire par rapport à leur itinéraire initial. Ces diversions se font en fonction des anticipations des délais sur le lien bloqué.

Figure 2 : File d'attente horizontale



Source : Marchal, 2001

4 La demande

Intéressons-nous maintenant à la demande, c'est-à-dire au nombre d'utilisateurs utilisant la route à un instant donné, étant donné les conditions de circulations au cours de la journée. La demande est représentée à un niveau microéconomique. Chaque déplacement est modélisé selon le choix de mode, d'itinéraire et d'horaire de départ. METROPOLIS utilise un modèle Logit emboîté à deux étapes (*two-stage nested logit model*) qui prend donc en compte deux types de modes de transport, voiture ou transport en commun, dans le nœud supérieur, et un choix continu pour l'heure de départ dans le nœud inférieur, de telle sorte que les déplacements ne sont pas répartis ex ante dans des intervalles de temps prédéfinis comme « heure de pointe » et « non-heure de pointe ».

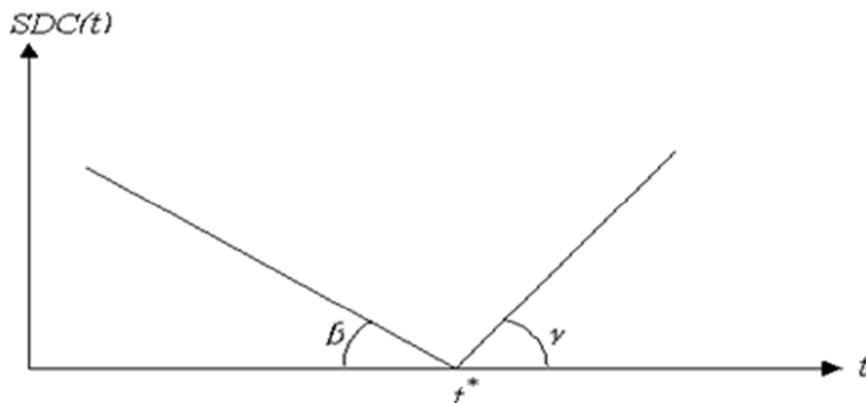
Le coût généralisé du mode « voiture » inclut trois composantes : le coût du temps de déplacement, le coût du deshorage (coût d'arriver en avance ou en retard) et les charges supportées par l'utilisateur. Cette fonction, pour une heure de départ t suit le modèle classique introduit par Vickrey (1969) :

$$C_{car}(t) = \alpha_{car}T(t) + \beta \left[t^* - \Delta / 2 - t - T(t) \right]^+ + \gamma \left[t + T(t) - t^* - \Delta / 2 \right]^+ + \tau(t).$$

On a $Max(0, A) \equiv A^+$, α_{car} représente la valeur du temps de trajet en voiture ; $T(t)$ représente le temps de trajet et t^* est l'heure d'arrivée souhaitée à la destination ; Δ est une zone de non pénalité par rapport à l'heure idéale d'arrivée à la destination, t^* . L'utilisateur supporte un coût de deshorage, β (coût de l'avance) et γ (coût du retard) par unité de temps. $\tau(t)$ est la tarification, fonction de l'heure.

Le coût de deshorage est représenté à la figure suivante, dans le cas où $\Delta = 0$. Des spécifications non linéaires ont aussi été testées analytiquement, et empiriquement (de Palma, A., A. Khattak, et D. Gupta, 1997). Dans le modèle original de Vickrey, il est aussi fait mention d'une formulation en fonction de l'heure de départ à l'origine, et en fonction de bénéfices, plutôt que de coûts. Toutes ces formulations sont équivalentes, mais une formulation peut être plus pratique d'un point de vue théorique ou numérique qu'une autre en fonction de la nature des déplacements. Notons qu'une formulation analogue a été développée dans le cas du pic du soir (de Palma, A. et R. Lindsey, 2002).

Figure 3 : Coût de deshorage



Source : Handbook of Transport Economics, 2011

La probabilité que l'utilisateur utilisant sa voiture parte à la date t est donnée par un modèle Logit continu, défini comme suit :

$$P_{car}(t)dt = \frac{\exp\left(\frac{-C_{car}(t)}{\mu_t}\right)}{\int_{T_0}^{T_1} \exp\left(\frac{-C_{car}(u)}{\mu_t}\right) du} dt.$$

Le surplus de l'utilisateur de la voiture : $\partial/\partial t$

$$CS_{car} = \mu_t \log \int \exp\left(-\frac{C_{car}(u)}{\mu_t}\right) du$$

En ce qui concerne l'alternative « transport en commun », le coût généralisé d'un déplacement entre une origine et une destination donnée est considéré comme une donnée exogène et indépendante de l'horaire. Ainsi, les transports en commun ne génèrent pas d'externalités négatives ni positives, de sorte que les choix d'itinéraires et d'horaires de départ ne sont pas modélisés explicitement. Le coût généralisé des transports en commun est donné par:

$$C_{pt} = \alpha_{pt} tt_{pt} + F$$

où α_{pt} est la valeur du temps pour les transports en commun, tt_{pt} est le temps de trajet pour les transports en commun, et F le coût monétaire. Le choix modal, entre la voiture individuelle et le transport en commun est déterminé au niveau du nœud supérieur du modèle logit emboîté (Nested Logit). L'utilisateur fait son choix sans avoir connaissance au préalable de son heure de départ, mais sur la base d'une attractivité ou surplus attendu. Le choix modal est donc déterminé en fonction de la formule ci-après : $CS_{car} = \ln \int_{T_0}^{T_1} \exp(-C_{car}(u)/\mu) du$. Le choix de la voiture est donné par un modèle Logit qui prend comme utilité des attractivités ou des surplus de consommateurs. La probabilité de choisir la voiture est donnée par :

$$P_{car} = \frac{\exp\left(\frac{A_{car}}{\mu}\right)}{\exp\left(\frac{A_{car} + k_v}{\mu}\right) + \exp\left(\frac{-C_{pt} + k_v}{\mu}\right)}$$

où k_v est un paramètre de pénibilité des transports en communs.

En définitive, le surplus des usagers est donné par :

$$CS = \mu \log \left(\exp\left(\frac{A_{car} + k_v}{\mu}\right) + \exp\left(\frac{-C_{pt} + k_v}{\mu}\right) \right)$$

METROPOLIS utilise un modèle de choix d'itinéraire fondé sur les temps de trajets dynamiques d'un point à un autre. L'utilisateur sélectionne l'itinéraire pour lequel le temps de trajet dynamique est le plus court. Cette décision est prise en fonction de la situation en temps réel sur les tronçons considérés, ainsi que sur le reste du réseau au-delà de la destination. Remarquons que dans METROPOLIS, une journée est équivalente à une itération. Le logiciel définit un processus d'apprentissage dans lequel les usagers acquièrent chaque jour des connaissances sur leurs déplacements

et utilisent ces informations pour modifier leurs choix de déplacement le jour suivant. Dans la version de METROPOLIS utilisée, les informations sont échangées entre tous les utilisateurs, de sorte que l'on parle d'apprentissage collectif. Les résultats de simulation correspondent à un état stationnaire, qui est atteint lorsque les temps de trajets sur chacun des tronçons du réseau changent marginalement de jour en jour.

Le bien-être est mesuré à l'aide du surplus social, W . Le premier composant de W est le surplus des consommateurs, CS , qui prend en compte les externalités liées au temps de trajet et au deshorage. La seconde composante R est formée par les revenus du péage et des autres charges. Ces revenus sont multipliés par un coefficient de Coût d'Opportunité des Fonds Publics, $COFP$, fixé à 0,14¹. La composante finale du surplus social est constituée des coûts monétarisés des externalités autres que de la congestion, C_{EXT} . L'impact d'un projet de tarification sur le surplus social est donc donné par ΔW :

$$\Delta W = \Delta CS + (1 + COFP) \cdot \Delta R - \Delta C_{EXT}.$$

Nous avons négligé les effets de revenus dans cette analyse. La prise en compte des effets de revenus est plus délicate (voir de Palma et Kilani, 2009), et très peu d'études en tiennent compte en pratique.

5 Ajustement vers un état stationnaire

Pour chaque heure de départ, l'individu doit choisir un itinéraire pour lequel le temps de trajet espéré est le plus court. Le choix de l'individu chaque jour est fonction de ses anticipations sur ce temps de trajet qui dépendent, d'une part, des informations publiques et privées sur le réseau à la date t , d'autre part, des expériences passées de ce dernier.

Pour chaque individu, il existe donc un phénomène d'apprentissage à l'échelle la journée. L'ensemble des jours qui précèdent (la date t) apportent de l'information sur le temps de trajet actuel espéré, en plus des informations disponibles à la date t .

Il existe plusieurs phénomènes d'apprentissage, de type linéaire, quadratique, ou encore exponentiel. Nous présentons ici le processus exponentiel d'apprentissage. D'après les simulations, tous les processus permettent d'atteindre un état stationnaire, c'est seulement le taux de convergence qui diffère d'un processus à l'autre.

Si nous prenons un processus d'apprentissage de type exponentiel, nous avons :

$$X_{w+1}^H = \tau_{w+1,i}^H(t) = (1 - \lambda) \tau_{w,i}^H(t) + \lambda \tau_{w,i}^S(t),$$

avec $\tau_{w,i}^H(t)$, le temps de trajet historique du jour w , pour l'heure de départ i , et

$\tau_{w,i}^S(t)$, le temps de trajet simulé du jour w en date t .

(1) Cette valeur n'est pas arbitraire mais reprise du modèle macroéconomique développé par le Bureau du Plan.

Si $\lambda \rightarrow 1$, alors l'individu ne prend pas en compte les temps de trajets historiques pour effectuer ses anticipations.

Celui-ci est stationnaire, si :

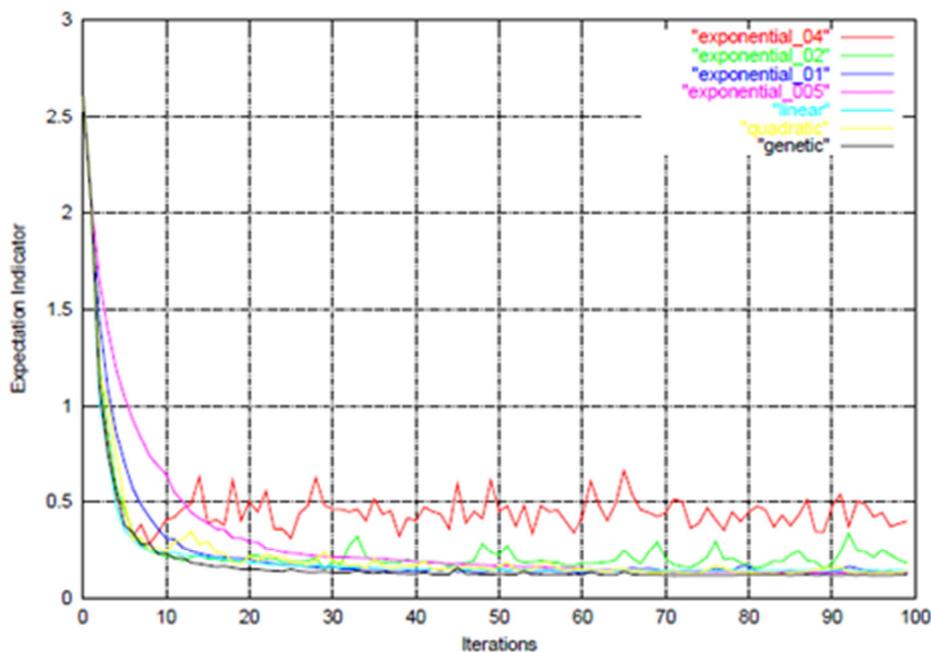
$$\lim_{w \rightarrow \infty} \left\| \tau_{w+1}^H(t) - \tau_w^S(t) \right\| = 0$$

La figure 4 ci-après représente l'indice de convergence en fonction du nombre d'itération. Les simulations montrent qu'un état stationnaire est atteint après environ 50 itérations pour un paramètre de convergence λ plus petit que 0.1.

Nous représentons le mécanisme d'ajustement de jour en jour du système METROPOLIS à la figure 5. À chaque itération, les informations sur les temps de trajets sur les différents liens en fonction de l'heure de la journée sont stockées et comparées aux prédictions des utilisateurs.

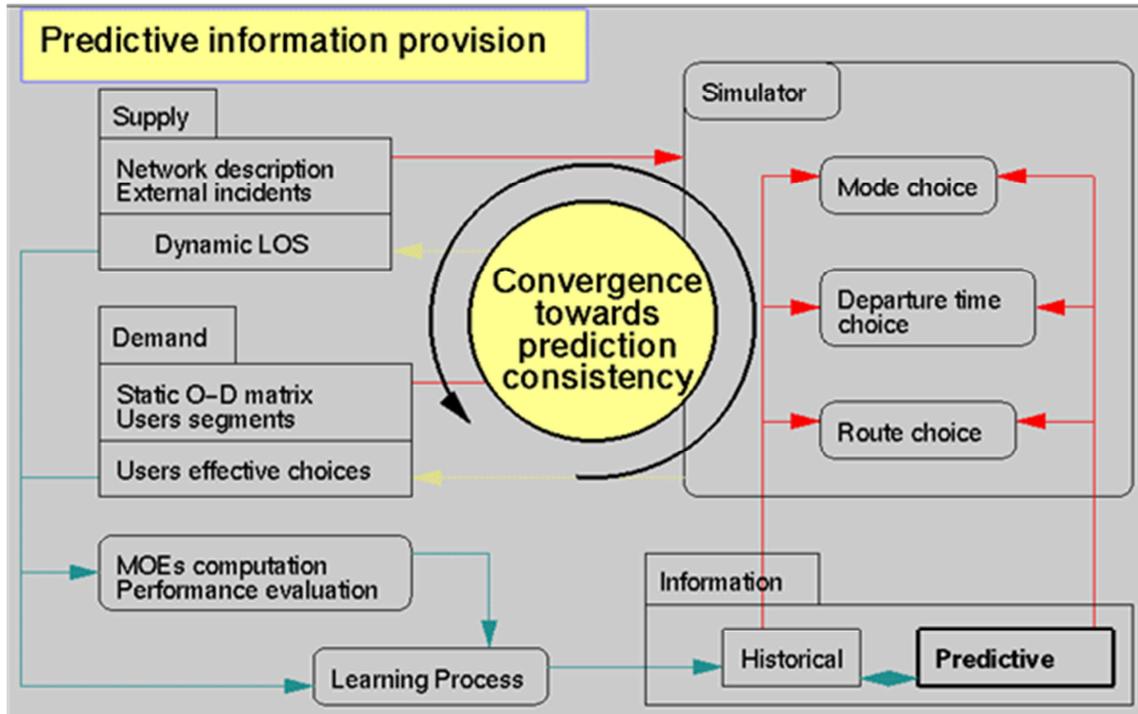
Un processus d'ajustement permet de générer de meilleures prédictions pour les jours suivants. Les informations collectées par les différents utilisateurs sont mis en commun dans le système. Différents processus d'apprentissage sont possibles. On considère ici un processus moyen mobile. Nous avons effectué aussi des simulations sur des très longues périodes (plusieurs siècles) pour nous assurer que le système converge bien vers un état stationnaire stable. Il n'existe pas à ce jour de preuve analytique de convergence pour les grands systèmes. Cependant, un grand nombre d'expériences de calculs effectués sur différents réseaux ont montré que la dynamique d'ajustement considérée dans METROPOLIS convergeait bien vers un état stationnaire unique et stable.

Figure 4 : Convergence vers l'état stationnaire du temps de trajet espéré



Source : Marchal, 2001

Figure 5 : Le fonctionnement de convergence de METROPOLIS



Source : Marchal, 2001

6 Résultats théoriques

Nous résumons brièvement les propriétés théoriques du modèle de base.

6.1 L'équilibre

On considère une origine, une destination, un goulet d'étranglement. Nous avons:

$$T_1 - T_0 = \frac{N}{s}$$

avec T_1 l'heure de départ de l'utilisateur partant le dernier, et T_0 l'heure de départ de l'utilisateur partant le premier.

La désutilité d'arriver en avance ou en retard est la même. En d'autres mots, le premier et le dernier individu ont les mêmes coûts de sorte que,

$$\beta (t^* - T_0) = \gamma (T_1 - t^*) ,$$

où t^* est l'heure d'arrivée idéale. On a utilisé le fait que le premier usager et le dernier usager ne font pas face à de la congestion. On en déduit des valeurs pour le début T_0 et la fin T_1 du pic horaire:

$$T_0 = t^* - \frac{\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N}{s}$$

$$T_1 = t^* - \frac{\beta}{\beta + \gamma} \frac{N}{s}$$

Le coût doit-être le même pour tous les voyageurs à l'équilibre, quelle que soit l'heure de départ. À l'équilibre de Nash, aucun usager ne devrait trouver un avantage à changer son heure de départ. Cette condition caractérise un équilibre de Nash non-coopératif.

Prenons l'exemple de l'individu qui part à T_0 , on remplace la date de départ dans l'équation du coût, on obtient l'équation du coût d'équilibre:

$$C^* = \frac{\beta\gamma}{\beta + \gamma} \frac{N}{s} \equiv \delta \frac{N}{s}$$

On peut vérifier facilement que le coût du premier et du dernier individu est le même. La congestion est maximale pour une arrivée à l'heure optimale d'arrivée. En écrivant le fait qu'un usager arrive exactement en t^* , on peut en déduire le temps de trajet maximal. Dans ce cas, le coût du trajet correspond seulement au coût de la congestion. Inversement, pour les heures maximales de retard et d'avance, la congestion est nulle. Dans ce cas, le coût C^* correspond seulement au coût du retard et de l'avance respectivement.

On peut montrer facilement que la moitié des coûts sont due à la congestion tandis que l'autre moitié est due au deshorage.

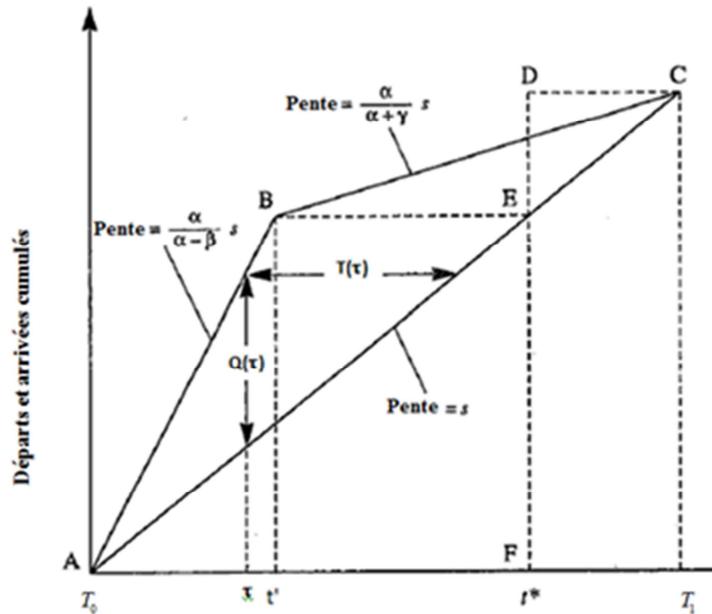
6.2 Optimum et tarification de premier rang

À l'optimum, il ne peut y avoir de congestion puisque l'attente est une perte sèche pour les individus. Une tarification, fonction du temps permet aux usagers de partir uniformément au taux s . Dans ce cas, le taux de départ est $\rho(a) = s$. À l'heure optimale, t^* , la tarification est la plus élevée. Inversement, la tarification sera nulle pour l'heure maximale de retard et d'avance puisqu'il n'y avait pas de congestion à l'équilibre. Entre ces deux cas extrêmes, la tarification évolue de manière linéaire au cours du temps, de sorte que la tarification est égale à l'inverse du coût de deshorage, à une constante additive arbitraire près.

Puisque le coût généralisé doit être le même pour tous les instants de départ possibles, il en résulte que l'équation de la tarification, fonction de l'heure de départ est croissante de T_0 jusqu'en t^* au taux β et décroissante après t^* jusqu'en T_1 au taux γ .

La solution avec tarification permet de maximiser le surplus collectif puisqu'on internalise par la tarification les externalités négatives de chaque usager sur l'ensemble des autres usagers.

Figure 6 : Equilibre et tarification optimale



Source : *Economics of a Bottleneck*, Richard Arnott et al., 1987

Comme vous pouvez l'observer sur le graphique, sans tarification, la pente AB est supérieure à la pente s, c'est-à-dire que le taux de départ est supérieur au taux maximal que peut supporter l'infrastructure routière. La conséquence en est qu'il se crée une file d'attente, maximale à la date t' (heure optimale d'arrivée), égale à $Q(t')$. Donc, le temps de trajet est aussi maximum pour l'individu qui part à t' , égal à la distance BE.

Avec une tarification optimale, le flux de départ correspond exactement au flux s, à la pente AC sur le graphique. La tarification est donnée par les formules suivantes :

$$P(\tau) = \delta \left(\frac{N}{s} \right) - \beta(t' - \tau) \text{ pour } \tau \in [T_0, t']$$

$$P(\tau) = \delta \left(\frac{N}{s} \right) - \gamma(\tau - t') \text{ pour } \tau \in [t', T_1]$$

7 Simulation

À titre d'exemple, nous présentons ci-dessous des résultats de simulation.

7.1 Domaine d'étude

L'étude présentée se concentre sur la Région Île-de-France, à savoir Paris et sa banlieue. Elle couvre environ . L'Île-de-France ne représente seulement que 2 % de la surface totale en France alors que la proportion d'habitants qui y résident est de 19 %. Par ailleurs, l'Île-de-France concentre à elle seule 22 % des emplois et 29 % du PIB de la Nation (de Palma, Motamedi, Picard et Waddell, 2005).

Nous divisons cette région entre 3 zones : Paris, la petite couronne et la grande couronne.

Actuellement, les seules routes payantes autour de Paris sont l'autoroute A1 (échangeur au Sud de Roissy près de l'aéroport Charles-de-Gaulle et en direction de la Belgique), l'autoroute A14 (échangeur Ouest à Montesson), l'autoroute E5/A13 (échangeur Ouest à Buchelay et Heudebouville). Seule l'autoroute A14 appartient à notre domaine d'étude.

D'après l'étude de recensement en 2008, la population parisienne avoisine les 2.2 millions d'habitants, et la population totale au niveau de la région est d'environ 11,7 millions. La population au centre de Paris devrait rester stable sur les 30 prochaines années mais la population totale de la région devrait croître à un taux d'environ 0,3 % par an (le taux était de 0,4 % pour Paris et de 0,7 % pour toute la région sur les 9 dernières années). La population résidant en banlieue se répartit entre 46 % pour la petite couronne et 54 % pour la grande couronne.

L'emploi total en Ile de France était de 5,6 millions en 2008. Il a augmenté à un taux de 1,2 % par an sur les 9 dernières années. Environ 1,77 million d'emplois étaient localisés à Paris et ce chiffre était en progression. À l'extérieur de Paris, 8 communes concentrent à elles seules plus 500 000 emplois.

Le nombre total de trajets générés au sein de la région étaient estimés à hauteur de 35,16 millions par jour en 2001 et de 36,9 millions en 2005. Le modèle MODUS (DREIF, 2008) prévoit pour 2025 et 2035 respectivement 41,37 et 46,61 millions de trajets. Par contre, la mobilité individuelle des habitants en Île-de-France est restée inchangée depuis 1976 égale à 3,5 trajets par personne et par jour (Debrincat et al., 2006). Les simulations reproduisent la distribution géographique des trajets sur le réseau pour différentes heures de la journée.

Le réseau de transport est souvent congestionné. Les routes à voies rapides de la région sont composées de 590 km d'autoroutes payantes et de 250 km de parcelles gratuites, avec un total de 4 500 km de voies. La répartition modale pour les trajets domicile-trajet est de 50 % pour la voiture particulière, de 36 % pour les transports en commun et de 14 % pour le vélo ou la marche à pieds. Le tableau ci-après expose le nombre de trajets qui utilisent spécifiquement la voiture comme mode de déplacement au sein de la région. À Paris, comme nous pouvons le contacter, c'est le transport en commun qui est le plus souvent emprunté.

Tableau 2 : Proportion des trajets utilisant exclusivement la voiture

	P	PC	GC	OUT
P	14 %	26 %	41 %	68 %
PC	22 %	56 %	44 %	58 %
GC	21 %	59 %	80 %	83 %
OUT	32 %	8 %	85 %	

Source : André de Palma et al., 2013

7.2 Les données d'entrée

7.2.1 Calibrage du modèle

Le réseau d'Île-de-France est codé à l'aide de 1 289 zones internes. 50 de ces zones représentent les points d'entrée/sortie de la région avec les régions voisines. Les arrondissements de Paris et les communes les plus grandes ont été divisés en plusieurs zones. Les communes les plus petites dans les franges périphériques de la région ont été agrégées. Notre réseau codifié contient 43 857 liens reliés par 4 462 connecteurs.

7.2.2 Les paramètres de comportement

La mise en œuvre d'un simulateur dynamique requiert l'estimation de paramètres de comportement spécifiques à l'aire d'étude. Les principaux paramètres nécessaires au calage de METROPOLIS sont la valeur du temps α , et les pénalités de deshorage, β pour l'arrivée en avance et γ pour l'arrivée en retard.

7.2.3 Estimation de α , β et γ

Cette étude est aussi l'occasion de comparer les résultats obtenus avec l'utilisation de différents paramètres de comportements. Ainsi, nous sommes en mesure de caler le modèle en utilisant les paramètres issus de l'enquête MADDIF (Multimotifs Adaptée à la Dynamique des comportements de Déplacement en Île-de-France, par de Palma et Fontan, 2000), mais aussi ceux issus de l'enquête MIMETIC.

Le rapport final du projet QUATUOR (de Palma et al., 2002) nous offre des informations essentielles sur les déplacements en Île-de-France. Ainsi, une segmentation de la population a pu être faite selon le motif de déplacement et la destination (voir tableau ci-dessous) :

Tableau 3 : Paramètres de comportement selon la destination et le motif

	Effectif	α	β	γ	β/α	γ/α
Motif « travail » vers Paris et la petite couronne	648	0,081 (0,015)	0,038 (0,007)	0,047 (0,023)	0,469	0,580
Motif « travail » vers la grande couronne »	509	0,130 (0,022)	0,084 (0,013)	0,175 (0,045)	0,646	1,346
Autres motifs	544	0,089 (0,019)	0,036 (0,008)	0,073 (0,03)	0,404	0,820

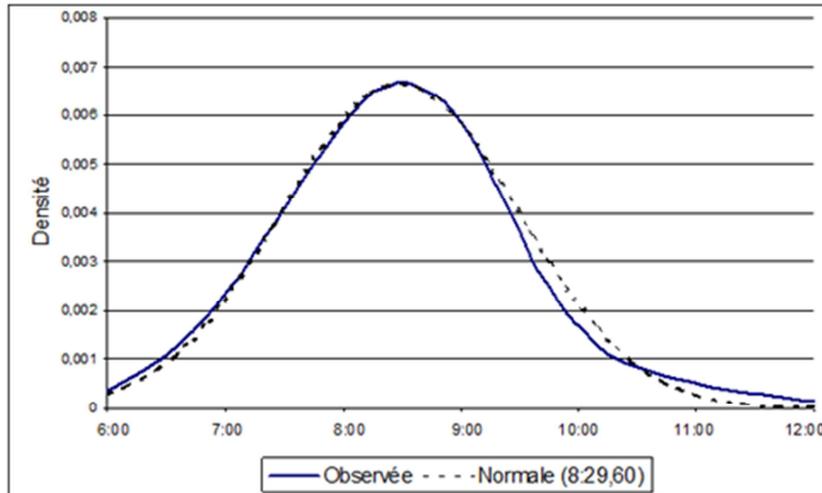
Source : Rapport Final du projet QUATUOR (de Palma et al., 2002)

Une nouvelle enquête, MIMETIC en collaboration avec le ThEMA, Université de Cergy-Pontoise, a été effectuée en 2012. Les résultats ne sont pas encore disponibles dans leur intégralité.

7.2.4 Horaires préférés d'arrivée

La distribution des horaires préférés d'arrivée pour les trajets d'une même catégorie sont présentés dans les deux figures ci-dessous.

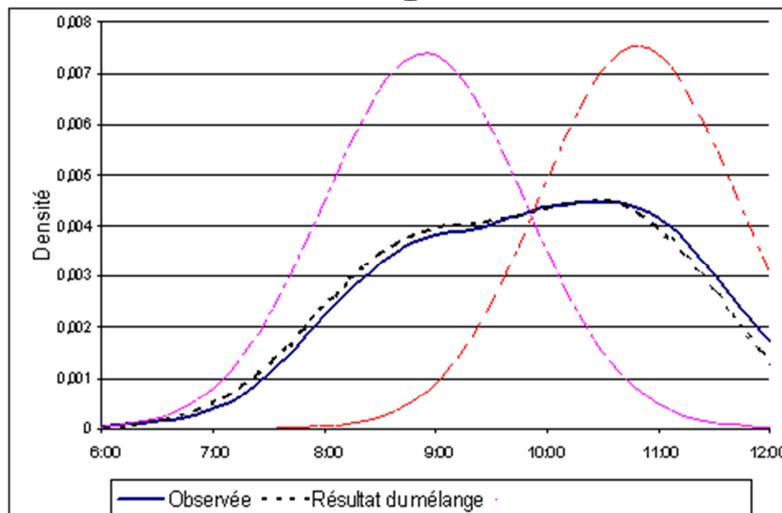
Figure 7 : Distribution de l'heure d'arrivée des déplacements ayant pour motif le « Travail » vers Paris et petite couronne



Source : *Rapport Tarification des Transports Individuels et Collectifs à Paris - Dynamique de l'Acceptabilité - 2012.*

Pour les autres motifs, les distributions des heures d'arrivée ne sont pas normales. Nous utilisons dans ce cas, des combinaisons de normales, qui peuvent raisonnablement bien approximer des distributions quelconques.

Figure 8 : Distribution de l'heure d'arrivée des déplacements ayant pour motif le « Travail » vers grande couronne



Source : *Rapport Tarification des Transports Individuels et Collectifs à Paris - Dynamique de l'Acceptabilité - 2012.*

7.2.5 Bases de données utilisées

La modélisation dynamique en Île-de-France nécessite des données sur le réseau routier, la demande de transport, les paramètres de comportement, la distribution de l'horaire préféré d'arrivée, et différentes observations utiles pour le calibrage du modèle. MODUS est un modèle de transport traditionnel à 4 étapes développé par la Direction régionale de l'équipement d'Île-de-France (DREIF), l'EGT est l'Enquête globale de transport et la DIRIF la Direction interdépartementale des routes d'Île-de-France.

L'utilisateur de METROPOLIS peut développer le modèle à quatre étapes lui-même. Par ailleurs, lorsque le modèle est intégré à un modèle d'occupation du sol, ce dernier fournit la matrice origine-destination. C'est la procédure utilisée dans le cadre du projet européen SustainCity. Pour ce projet, nous mettons en place un interface entre METROPOLIS et le modèle d'occupation du sol URBANSIM (Waddell, 2002).

Tableau 4 : Bases de données utilisées pour modéliser et calibrer le modèle

Description	Source	Année
Réseau routier	MODUS	2009
Demande de Transport	MODUS	2009
Paramètres de comportement des usagers	MADDIF PREDIT	2000 2012
distribution de l'horaire préféré d'arrivée	MADDIF	2000
Calibrage du modèle	MODUS EGT DIRIF	2009 2001 2009, 2010

Source : *Rapport Tarification des Transports Individuels et Collectifs à Paris - Dynamique de l'Acceptabilité - 2012.*

8 Données de sortie

À titre d'exemple, nous fournissons ci-dessous des résultats de simulation dans le cadre de l'étude de la tarification en Ile-de-France (projet PREDIT).

8.1 Le scénario de base, sans tarification

Le modèle a été calibré en utilisant des flux de trafic sur certains liens sélectionnés (environ 14 % du réseau total), des temps de trajet sur certains couples Origine-Destination sélectionnés, la distribution des heures de départ et d'arrivée et le temps de déplacement moyen. Pour de plus amples informations sur le processus de modélisation, les lecteurs peuvent s'intéresser au document de travail « Calibration of METROPOLIS for Île-de-France », de Palma, Motamedi et Saifuzzaman (2012). Ici, nous nous intéressons principalement d'une part à la calibration du modèle de base, d'autre part à l'application de différents projets de tarification de la congestion, et enfin nous comparons ces résultats avec le scénario de base.

Le scénario de base s'appuie sur la demande de transport estimée pour l'année 2009 par le modèle régional MODUS. Pour des raisons de gains de temps de simulation,

nous ne conservons que 14 % de l'échantillon initial, et toutes les autres composantes du modèle sont adaptées à cette modification.

L'Enquête globale de transport 2001 montre que le temps moyen de trajet en voiture personnelle est d'environ 19 minutes à l'heure de pointe du matin. Notre simulation suggère un temps moyen de trajet de 19,44 minutes entre 6 heures du matin et 10 heures, ce qui est très proche des observations de l'EGT. Cette même enquête montrait la répartition modale suivante : 50 % voiture personnelle, 36 % transports en commun et 14 % vélo/marche à pieds. METROPOLIS ne considère que deux modes de déplacement : la voiture personnelle et les transports en commun. La répartition simulée est 51,5 % de déplacements en VP et 48,5 en transports en commun. Le coût moyen d'un déplacement en VP est d'environ 10,2 €. L'indice de congestion, défini comme le rapport du temps de déplacement avec congestion sur le temps de déplacement sans congestion s'élève à 54 %, ce qui signifie que les trajets sont moitié plus longs entre 6 et 10 heures que lorsqu'il n'y a pas de congestion. Le coût moyen de deshorage par déplacement s'élève à 3,4 €. Environ 20 % des voyageurs arrivent à l'heure, 54,3 % arrivent en avance et le reste arrive en retard.

Les coûts externes combinés de bruit, d'accidents et d'émissions de CO₂ (tous considérés comme proportionnels à la distance) s'élèvent à 0,83 € par conducteur dans la fourchette basse de l'évaluation, et à 1,50 € par conducteur dans la fourchette haute.

L'un des résultats les plus importants du tableau ci-après est que le coût de deshorage représente environ un tiers du coût du temps de trajet. Ces coûts sont totalement négligés dans les modèles statiques. La situation est plus grave dans le sens où une partie des coûts de trajets sont des coûts de trajet sans congestion. On estime qu'approximativement la moitié des coûts due à la congestion relèvent du deshorage. Les modèles statiques, en conséquence, oublient la moitié des coûts et externalités dus à la congestion.

Tableau 5 : Données de sortie pour le scénario de base, résultats moyens et agrégés

	Scénario de base	Description
Nombre de déplacements en voiture personnelle ¹	601 032	Nombre de déplacements faits par voiture personnelle (un individu par véhicule)
Part des TC (%)	48,48 %	Part des individus qui choisissent d'utiliser les transports en commun
Temps de trajet (min)	19,44	Temps moyen de déplacement en VP
Coût de trajet (€)	10,22	Coût moyen de déplacement en VP
Coût de deshorage (€)	3,40	Coût moyen de deshorage
Revenus du péage (€)	4 702,9	Revenus du péage collectés sur l'autoroute A14
Surplus des consommateurs (€)	- 9,38	Surplus des usagers
Équité (€)	6,02	Écart-type de l'accessibilité
Arrivées en avance (%)	54,27	Pourcentage d'individus arrivés plus tôt que l'heure préférée d'arrivée

(1) Basé sur 10 % de la demande de transport du matin.

	Scenario de base	Description
Arrivées à l'heure (%)	20,03	Pourcentage d'individus arrivés à leur heure préférée d'arrivée
Arrivées en retard (%)	25,70	Pourcentage d'individus arrivés plus tard que l'heure préférée d'arrivée
Congestion (%)	53,99	Ratio entre le temps de trajet observé (T) et le temps de trajet sans congestion (T ₀), Congestion $C = (T - T_0) / T_0$
Vitesse (km/h)	45,85	Vitesse moyenne par véhicule
Distance parcourue (10 ⁶ veh-km)	8,38	Somme des kilomètres parcourus en voiture
Distance par déplacement effectué en VP (km/veh)	13,94	Moyenne de la distance parcourue en voiture

Source : Rapport Tarification des Transports Individuels et Collectifs à Paris - Dynamique de l'Acceptabilité - 2012

Tableau 6 : Externalités liées au transport par Voiture Personnelle

	Valeur basse	Valeur haute
Bruit des voitures (€)	21 864,49	46 744,78
Accidents des voitures (€)	291 777,88	291 777,88
Pollution des voitures (€)	75 478,57	353 182,75
Émissions de gaz à effet de serre (€)	104 715,00	204 236,14
Coût social des fonds publics ¹ (€)	5 361,31	5 361,31
Coûts externes totaux ² (€)	499 197,25	901 302,85
Coûts externes par conducteur (€)	0,83	1,50

Source : Rapport Tarification des Transports Individuels et Collectifs à Paris - Dynamique de l'Acceptabilité - 2012.

Il est possible d'observer les temps de trajet à partir d'une seule origine vers différentes destinations (isochrone de 20 minutes pour une heure de départ donnée et pour le mode voiture).

8.2 Résultats des différents projets de tarification de la congestion

8.2.1 Schémas de tarification

Plusieurs schémas de tarification sont envisagés. Ils sont fournis dans le tableau ci-dessous à titre d'exemple.

(1) Coût Social des fonds publics : revenus du péage multiplié par le coût d'opportunité des fonds publics.

(2) Coûts externes totaux : somme des autres coûts.

Tableau 7 : Les différents projets de tarification envisagés en Ile-de-France

Scénarios de péages urbains	Description du scénario	Montant total (€)	
		6AM – 10AM	Reste du jour
Situation de base – « au fil de l'eau »	Un unique péage déjà existant sur l'A14	7,8	5,7
Péage cordon sur Paris	Les individus entrant dans Paris doivent s'acquitter du péage.	7,8	5,7
Péages cordons pour Paris et la petite couronne	Les individus entrant dans Paris ou la petite couronne doivent s'acquitter du péage. S'ils traversent les deux, ils doivent payer deux fois.	7,8	5,7
Péage cordon pour la petite couronne	Les individus entrant dans la petite couronne doivent s'acquitter du péage.	7,8	5,7
		5	3,7
Péage de zone dans Paris	Les individus circulant dans Paris doivent s'acquitter du péage. Réduction pour les résidents suivant le modèle de Londres.	8 €/jour 0,8 €/jour pour les résidents dans Paris intra-muros.	

Source : *Rapport Tarification des Transports Individuels et Collectifs à Paris - Dynamique de l'Acceptabilité – 2012.*

Nous abordons 5 scénarii de tarification de la congestion dans ce travail. La situation de base correspond à la situation actuelle en Île-de-France où le seul péage en vigueur concerne l'autoroute A 14.

8.2.2 Résultats agrégés

Les résultats agrégés représentent la performance du réseau pris dans son ensemble. Pour chacun des scénarii de tarification, METROPOLIS calcule les équilibres et en déduit les impacts au niveau de chaque lien, et de chaque utilisateur. Les résultats peuvent être agrégés à l'ensemble du réseau, ce qui permet une meilleure compréhension des impacts des politiques de tarification.

Les résultats agrégés sont repris dans le tableau ci-dessous.

Il est utile d'analyser les impacts du montant de la tarification pour différentes valeurs du niveau de tarification du cordon (petite couronne). On voit que la tarification optimale est atteinte pour environ 8 € (le prix de l'A 14, incidemment). Par contre, la valeur maximisant les recettes est plus élevée et égale à 12. Bien évidemment, les coûts externes diminuent d'autant.

La comparaison avec les résultats de simulation à l'aide de modèle mono-centrique est extrêmement intéressante. En effet, le modèle mono-centrique (avec congestion) appliqué à l'Ile-de-France prévoit un gain de bien-être de 286 € par an et par personne. Ce chiffre est légèrement supérieur à ce que nous obtenons avec METROPOLIS (et qui est de 200 € par an et par personne). Ces chiffres sont semblables (ce qui est une bonne nouvelle, étant donné que les deux modèles sont totalement différents). Par contre, ils montrent que les effets sont plus importants sur

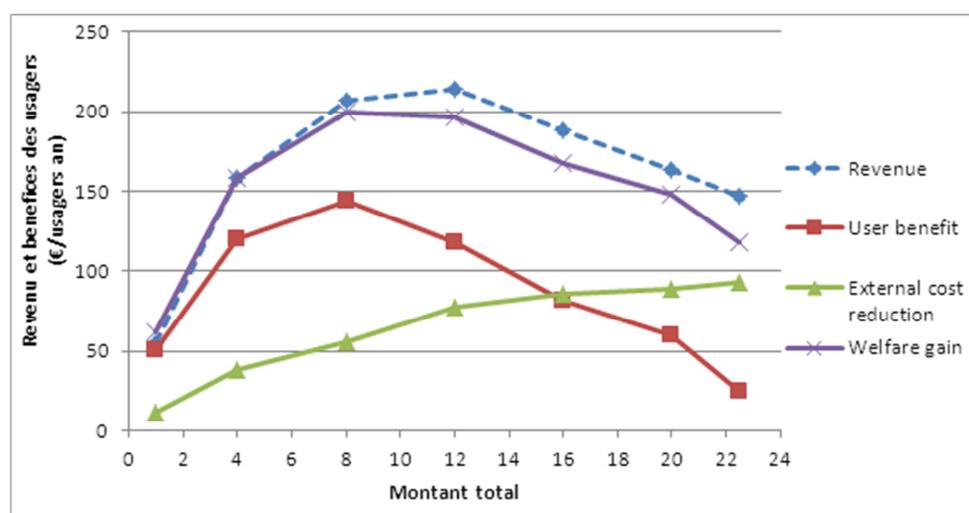
le long terme. En effet, sur le long terme, les agents économiques ont l'occasion de se relocaliser, de sorte que suite à la tarification, il y a une re-densification de la ville (le rayon passe de fait de 73 km à 47 km). Cette densification explique partiellement la différence entre 286 et 280 € par an et par personne. Il faut rajouter que le modèle mono-centrique possède un modèle de congestion statique. Son extension dynamique sera faite par les générations futures. Le modèle mono-centrique nous apprend aussi que la tarification de cordon permet d'approcher assez raisonnablement l'équilibre de premier rang (le gain de surplus est de 181 € par an et par personne, pour la tarification de cordon). Ces résultats corroborent qualitativement les résultats obtenus avec METROPOLIS.

Tableau 8 : Principaux résultats statistiques des différents projets de tarification

Projet	Description	Revenu (€10 ⁶ /an)	Gain des usagers (10 ⁶ €/an)	Diminution des coûts externes (10 ⁶ €/an)	Gain de bien-être (10 ⁶ €/an)
Péage Cordon autour de Paris	7,8 € en période de pointe et 5,7€ en dehors	319,09	235,31	65,5	300,81
Péages cordons pour Paris et la petite	7,8 € en période de pointe et 5,7 € en dehors	1 119,95	648,56	322	970,56
Péage cordon autour de la petite couronne	7,8 € en période de pointe et 5,7 € en dehors	855,24	436,74	246,5	683,24
Péage cordon autour de la petite couronne	5,3 € en période de pointe et 3,7 € en dehors	707,46	361,57	195,5	557,07
Péage de zone dans Paris	(0,8 € pour les résidents dans Paris et 8 € pour les autres)	390,44	93,27	202,09	295,36

Source : Rapport Tarification des Transports Individuels et Collectifs à Paris - Dynamique de l'Acceptabilité - 2012.

Figure 9 : Impacts du montant de la tarification



Source : André de Palma et al., 2013

Nous observons que METROPOLIS prédit une réduction de la congestion plus importante (– 10 % pour METROPOLIS contre – 6 % pour la ville mono-centrique) dans la situation d'un péage cordon autour de la petite couronne. Le prix du péage dans l'analyse mono-centrique étant trois fois supérieur à celui donné dans METROPOLIS, l'augmentation du surplus du consommateur y est également plus importante (181 €/an contre 105 €/an dans METROPOLIS).

de Palma, A., M. Kilani et R. Lindsey (2005) ont conduit une étude similaire en utilisant la demande de transport de l'année 2002. Bien que les projets de tarification soient différents de ceux abordés plus hauts, l'un des scénarii alors abordés est assez proche de notre étude. Ainsi, dans la situation d'un péage cordon autour de Paris, le revenu du péage et le gain de bien-être obtenu par de Palma, A., M. Kilani et R. Lindsey (2005) s'élevaient respectivement à 331 et 346 millions d'€ par an, alors que l'étude de 2012 prédit un revenu et un gain de 319 et 300 millions d'€ par an.

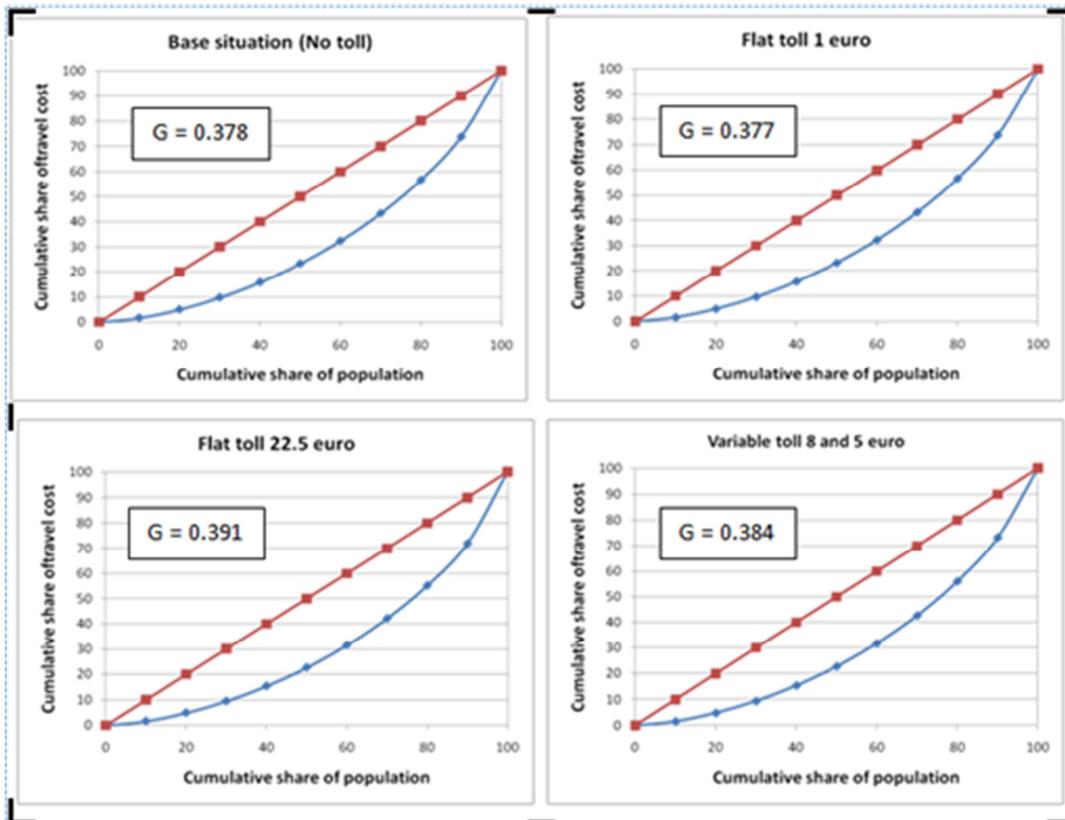
Dans cette étude, différents scénarii de tarification de la congestion sont analysés. Des améliorations considérables de la performance sur les réseaux ont été observées. Les meilleurs résultats ont été observés lors de la mise en place simultanée de deux péages cordons, l'un autour de Paris et l'autre autour de la petite couronne, que ce soit pour la performance du réseau ou le gain de bien-être. Les différents impacts selon les zones peuvent être représentés sur une carte, et il semble important d'utiliser les revenus du péage pour gommer cette hétérogénéité géographique en augmentant la couverture du territoire des transports en commun.

Enfin, nous pouvons comparer les résultats obtenus par de Palma, A., M. Kilani et R. Lindsey (2005), avec ceux présentés ici. Pour le même scénario de péage, à savoir un péage cordon autour de la petite couronne, METROPOLIS montre un surplus du consommateur de 105 €/an alors que le modèle « classique » obtient un surplus de 77 €/an.

L'équité joue un rôle essentiel dans l'acceptabilité de la tarification. Nous avons calculé avec METROPOLIS des indices d'équité, qui nous permettent de savoir quels sont les impacts distributifs ou anti-redistributifs de la tarification.

Nous observons dans ces figures que de petites valeurs du montant de tarification n'affectent que faiblement les valeurs du coefficient de Gini. Ces résultats montrent, comme attendu, que la distribution des richesses est négativement affectée par la tarification. Cet impact est significatif pour des valeurs plus élevées 8 ou même 22,5 € par usager.

Figure 10 : Courbe de Lorenz et indice de Gini



Source : André de Palma et al., 2013

9 Conclusion

Nous avons présenté dans cet article un modèle dynamique de trafic individuel capable de calculer des équilibres sur de grands réseaux de transport.

METROPOLIS est un logiciel qui a mis en œuvre deux types de modèle: le modèle de Vickrey (initialement développé pour un seul lien) et les modèles de choix discrets développés initialement par Daniel McFadden, tous les deux prix Nobel d'économie. METROPOLIS possède des bases économiques et économétriques solides et robustes, et il constitue le seul modèle dynamique permettant de faire de l'analyse économique sans aucune approximation. En effet, les fonctions de demande et les fonctions de surplus sont à la base de la modélisation.

Nos résultats montrent que les approximations des modèles statiques sont inacceptables. En effet, non seulement les modèles statiques omettent des phénomènes très importants, comme le décalage du pic horaire suite à des politiques de transport, mais ils omettent environ la moitié des coûts significatifs. Enfin, les modèles statiques sont incapables de décrire des politiques pourtant fondamentales, telles que la tarification modulaire ou les horaires flexibles ou décalés.

METROPOLIS a été utilisé depuis plus d'une quinzaine d'années par différentes équipes et dans différentes villes. Il a montré sa robustesse. Récemment, il a été

appliqué à la ville de Stockholm et ses résultats ont été comparés à un autre outil dynamique (qui est un assemblage entre un modèle d'affectation dynamique et un modèle de demande), Sylvester (voir Engelson, L., I. Kristoffersson, A. de Palma, K. Motamedi, et M. Saifuzzaman, 2012), pour étudier la tarification dans la ville de Stockholm. Il a été montré que les résultats des deux modèles sont comparables et que METROPOLIS rend mieux compte des données de flux et de comptage.

Enfin, METROPOLIS a été choisi par UrbanSim afin de construire un outil intégré pour simuler les impacts du grand Paris. Ce modèle intégré constitue un outil unique dans le monde pour simuler les impacts à court, moyen et long terme des politiques de tarification.

10 Références

- Anderson, S., A. de Palma et J.-F. Thisse (1992), *Discrete Choice Theory of Product Differentiation*, MIT Press, (423p).
- Arnott, R., A. de Palma et R. Lindsey (1993), A Structural Model of Peak-Period Congestion: A Traffic Bottleneck with Elastic Demand, *American Economic Review*, 83, 161-179.
- Arnott, R., A. de Palma et R. Lindsey (1998), Recent Developments in the Bottleneck Model, in *Road Pricing, Traffic Congestion and the Environment*, K. Button et E. Verhoef (eds.), Elgar's Economics, 79-110.
- Beckmann M. J., McGuire C. B. and Winsten C. B. (1956), *Studies in the Economics of Transportation*, Yale University Press, New Haven, Connecticut; published earlier as Rand RM 1488, May 12, 1955.
- Ben-Akiva M., Lerman S. (1985), *Discrete choice analysis*, The MIT Press, Cambridge Massachusetts.
- Ben-Akiva, M., A. de Palma et P. Kanaroglou (1986), Dynamic Model of Peak Period Traffic Congestion with Elastic Arrival Rates, *Transportation Science*, 20(2), 164-181.
- de Palma, A. (1992), A Game Theoretic Approach to the Analysis of Simple Congested Networks, *American Economic Review, Papers and Proceedings*, 82(2), 494-500.
- de Palma, A. et F. Marchal (1996), METROPOLIS: un outil de simulation du trafic urbain, *Revue Transports*, 378, 304-315.
- de Palma, A. et F. Marchal (1999), Analysis of Travel Cost Components Using Large-Scale, Dynamic Traffic Models, *Journal of the Transportation Research Board*, 1676, 177-183.
- de Palma, A. et F. Marchal (2005), Tarification modulaire des réseaux de transport: une approche par simulation, in *La tarification des transports, Enjeux et défis*, *Economica*, 219-242.
- de Palma, A. et F. Marchal (2008), Measurement of Uncertainty Costs with Dynamic Traffic Simulations, *Journal of the Transportation Research Board*, 2085, 67-75.
- de Palma, A. et K. Kilani (2009), Transition choice probabilities and welfare analysis in additive random utility models, *Economic Theory*, sous presse.
- de Palma, A. et R. Lindsey (2002), Comparison of Morning and Evening Commutes in the Vickrey Bottleneck Model, *Transportation Research Records*, 1807, 26-33.
- de Palma, A. M. Kilani., M. de Lara et S. Piperno. (2011), Cordon pricing in the monocentric city model: theory and application to Paris region, *Recherche Economique de Louvain*, numéro special en l'honneur de M. Fujita.
- de Palma, A., A. Khatkhat, et D. Gupta (1997), Commuters' Departure Time Decisions in Brussels, Belgium, *Journal of the Transportation Research Board*, 1607, 139-146.
- de Palma, A., Ben-Akiva, C. Lefèvre et N. Litinas (1983), Stochastic Equilibrium Model of Peak Period Traffic Congestion, *Transportation Science*, 17(4), 430-453.

de Palma, A., et M. Fosgerau (2011). Dynamic Traffic Modeling, dans «A Handbook of Transport Economics.» édité par A. de Palma, R. Lindsey, E. Quinet et R. Vickerman, 188-212. Edward Elgar.

de Palma, A., et P. Hansen (1991), Optimum Departure Times for Commuters in Congested Networks, *Annals of Operations Research*, 25, 279-290.

de Palma, A., F. Marchal et Yu. Nesterov (1997), METROPOLIS: Modular System for Dynamic Traffic Simulation, *Journal of the Transportation Research Board*, 1607, 178-184.

de Palma, A., M. Kilani et R. Lindsey (2005), Congestion Pricing on a Road Network: A Study Using the Dynamic Equilibrium Simulator METROPOLIS, *Transportation Research, A*, 39, 588-611.

de Palma, A., P. Hansen et M. Labbé (1990), Departure Time and Route Choice for the Morning Commute, *Transportation Science*, 24, 276-286.

Engelson, L., I. Kristoffersson, A. de Palma, K. Motamedi, et M. Saifuzzaman (2012), Comparison of two dynamic transportation models: The case of Stockholm congestion charging, *Proceedings of the 4 th TRB conference on Innovations in Travel Modeling*.

Vickrey, W.S.(1969), Congestion theory and transport investment, *The American Economic Review* 59, n° 2: 251-260.

Waddell, P. (2002), UrbanSim: Modeling urban development for land use, transportation, and environmental planning, *Journal of the American Planning Association*.

Yosef Sheffi (1985), Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods, *Prentice-Hall*, Inc. Englewood Cliffs, NJ 07632.