



Les grandeurs de la mobilité en Ile de France : étude prospective des impacts potentiels de plusieurs stratégies gestionnaires

Fabien Leurent, Sheng Li

► To cite this version:

Fabien Leurent, Sheng Li. Les grandeurs de la mobilité en Ile de France : étude prospective des impacts potentiels de plusieurs stratégies gestionnaires. 2020. <hal-02461720>

HAL Id: hal-02461720

<https://hal.science/hal-02461720v1>

Preprint submitted on 30 Jan 2020

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

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



HAL Authorization

Les grandeurs de la mobilité en Ile de France : étude prospective des impacts potentiels de plusieurs stratégies gestionnaires

Fabien Leurent et Sheng Li, Ecole des Ponts ParisTech, LVMT

1. Introduction

1.1 Contexte

Le modèle STEM de Leurent et Li (2019) est un modèle stratégique de la mobilité à l'échelle d'une agglomération métropolitaine. Il représente les principaux enjeux de la mobilité dans un tel territoire, en termes d'impacts sociaux (service rendu aux usagers, accessibilité des lieux), d'impacts économiques (qualité de service, tarifs et recettes, coûts de production et financement) et d'impacts environnementaux (bruit, pollution de l'air, énergie et gaz à effet de serre).

L'acronyme STEM, pour *Strategic Technical and Economic Model* en anglais, signale la nature technique et économique du modèle. Il est destiné (i) à quantifier les différents enjeux, (ii) à simuler des états d'équilibre entre l'offre de transport et la demande de mobilité, et ce par « scénario de gestion » spécifié par un vecteur de variables d'action, (iii) à rechercher des états optimisés du système en calculant des variables d'actions qui optimisent une fonction objective tout en satisfaisant des contraintes imposées.

L'application typique est de rechercher un plan de tarifs et d'offre de transports collectifs (TC) qui maximise une fonction de bien-être collectif (somme du surplus de la demande, des profits des opérateurs et de la monétarisation des impacts environnementaux), tout en respectant une limite de subventionnement à l'exploitation des TC.

1.2 Objectif

Cet article présente une application du modèle STEM à l'étude de la mobilité en Ile de France, assimilée à l'agglomération parisienne.

L'étude comporte deux volets : d'une part la représentation synthétique des « choses de la mobilité dans le territoire » pour une situation de référence en 2010, d'autre part l'exploration de scénarios gestionnaires pour le système de transport composé des deux principaux modes motorisés : transport automobile et transport collectif. Nous mettons en évidence les grandeurs respectives des différents enjeux, ainsi que leurs variations de scénario en scénario.

Les scénarios explorés se rangent en trois groupes : primo des scénarios de tarification et de taxation, secundo des politiques de court terme pour l'offre de TC en jouant sur les fréquences et les tarifs, tertio des politiques de long terme pour l'offre de TC, en envisageant des variations non seulement des fréquences et des tarifs mais encore du linéaire de lignes et du nombre de stations.

1.3 Méthode

Le modèle STEM est constitué à trois niveaux :

- à la base se trouve le « modèle socle » pour représenter synthétiquement l'offre et la demande ;
- l'étage intermédiaire met en relation les sous-modèles d'offre et de demande afin de calculer les différents impacts,
- à l'étage supérieur, un solveur numérique permet de rechercher un jeu de variables d'action qui maximise une fonction objectif tout en respectant des contraintes.

1.4 Plan de l'article

La suite de l'article comprend quatre sections. Tout d'abord, nous indiquons brièvement les principes dans STEM pour représenter synthétiquement le système métropolitain de mobilité : synthèse des situations de demande, synthèse des conditions d'offre, fonctions de coûts de production, évaluation des impacts environnementaux. Puis, nous modélisons un état de référence 2010 pour le système de mobilité en Ile-de-France, pour les deux modes motorisés que sont la voiture particulière et le transport collectif. Le modèle stratégique permet de mettre en évidence les enjeux macroscopiques de ce système.

Ensuite, nous explorons un éventail de stratégies gestionnaires, réparties en trois lots. Le 1er lot regroupe des plans de tarification par mode : gratuité des TC, tarification automobile en zone centrale ou selon la distance parcourue. Dans le 2ème lot, les variables d'action sont des leviers à court terme pour les transports collectifs : les tarifs ainsi que les tailles de flotte qui déterminent les fréquences de service et par suite les temps d'attente pour les usagers. Le 3ème et dernier lot ajoute à ces leviers de court terme, les leviers de long terme qui régissent la configuration du réseau : par sous-région et sous-mode, la longueur des lignes et le nombre de stations. Pour chaque scénario nous évaluons les impacts sociaux, économiques et environnementaux.

Enfin, nous discutons de la portée et des limites pour le modèle et pour son application à l'Ile-de-France.

2. Aperçu du modèle STEM

Dans cette section, nous présentons le modèle partie par partie : territoire (§2.1), demande de mobilité (§2.2), mode automobile et réseau routier (§2.3), modes et réseaux de transports collectifs (§2.4), impacts environnementaux (§2.5). Nous terminerons par l'assemblage du modèle (§2.6).

2.1 Le territoire

Nous modélisons le territoire d'une agglomération urbaine comme une « région » constituée de « sous-régions » : centre, banlieue proche ou plus lointaine, reste de l'espace. Chaque sous-région, appelée aussi « zone », est le siège d'activités telles que Domicile et Travail. Les effectifs de population et d'emploi déterminent la demande de mobilité, ainsi que l'exposition aux impacts environnementaux. La superficie du territoire détermine les conditions d'accès aux transports publics.

2.2 La demande de mobilité

Nous modélisons la demande de mobilité comme un ensemble de déplacements répartis selon le type géographique et le type comportemental :

- Le type géographique se rapporte aux zones d'origine et destination, ainsi qu'à la classe de portée géographique (à courte, moyenne ou longue distance) et si besoin à un type d'itinéraire (ex. transitant par le centre ou l'évitant).
- Le type comportemental indique la situation de l'individu face aux deux modes motorisés : captif des TC, ou captif de la VP, ou flexible.

Pour chaque déplacement, par mode on modélise les conditions de qualité de service reçue par l'individu-usager, ainsi que le prix. Un « coût généralisé » pour l'utilisateur, de ce déplacement par ce mode, est la somme du prix et du temps de déplacement pondéré par une « valeur du temps ».

Pour les usagers flexibles, on simule le partage modal sur la base des coûts généralisés des deux modes, selon un modèle logit de choix discret.

2.3 Mode automobile et réseau routier

Le mode automobile repose sur l'infrastructure routière et sur la voiture particulière utilisée par l'individu.

Les conditions physiques et économiques de l'itinéraire suivi dépendent du type de véhicule et de ses facteurs d'impact. On peut décrire le type de véhicule comme une dimension comportementale supplémentaire dans la segmentation de la demande, ou agréger les différents types dans une moyenne pondérée qui constitue une « automobile composite ».

Par nature d'impact, on modélise le facteur d'émission par unité de distance parcourue.

Le parcours en automobile engendre des coûts monétaires : frais d'énergie en fonction de l'itinéraire suivi et des conditions de trafic, coût du parking à la destination, et le cas échéant les péages perçus en chemin. On évalue un coût complet d'usage de l'automobile qui comprend aussi le coût de détention.

De plus le déplacement prend du temps à l'utilisateur, selon les distances et les vitesses de circulation le long de l'itinéraire.

On agrège le coût monétaire et le coût en temps, pondéré par une valeur du temps qui est un paramètre : le total constitue le coût généralisé du mode automobile pour le déplacement considéré.

Circulation et réseaux routiers. La circulation des automobiles sur le réseau induit des quantités de trafic. Nous modélisons un sous-réseau routier par zone : afin de rapporter la quantité de trafic à une capacité de flux qui totalise les capacités d'écoulement des différents tronçons de route. Par sous-réseau, le rapport entre trafic et capacité détermine la vitesse moyenne, par une fonction dite de « diagramme fondamental macroscopique » (cf. Daganzo et Géroliminis, 2008).

2.4 Les transports collectifs

Le mode TC combine des infrastructures et des véhicules pour offrir des « trajets » par ligne entre deux stations. Chaque déplacement TC d'un individu articule un ou plusieurs trajets à bord d'un véhicule, avec des phases « à pied » d'accès, d'attente et de correspondance.

Dans STEM, le réseau de TC est modélisé par des « composantes » modales et locales : une composante par sous-région et par sous-mode. Chaque composante est décrite par trois facteurs structurels : le linéaire de ligne L_r , le nombre de stations σ_r et la quantité de matériel roulant N_r . Ces facteurs déterminent d'autres caractéristiques d'exploitation par l'intermédiaire de relations techniques spécifiques : (i) l'espacement entre stations, (ii) la vitesse commerciale, (iii) la fréquence de service, (iv) la distance moyenne d'accès à l'origine ou à la destination du déplacement.

Les caractéristiques ainsi obtenues permettent de calculer des temps élémentaires par trajet et par phase de rabattement, d'attente, de roulage, de diffusion.

Les temps élémentaires permettent de modéliser le temps de tout déplacement en TC, selon son couple origine-destination, sur la base de coefficients d'affectation de ce couple aux différentes composantes modales. Les coefficients d'affectation jouent un rôle équivalent à celui d'un modèle d'affectation du trafic aux itinéraires sur un réseau. On les obtient par un traitement statistique spécial des résultats d'une enquête de mobilité auprès des ménages (et ce, pour le territoire étudié).

De même que pour le mode automobile, on définit le coût généralisé d'un déplacement en TC comme la somme du tarif et des temps passés selon les composantes et les phases, en pondérant par des valeurs du temps spécifiques aux types des phases.

Moyens et coûts de production. Du côté de l'offre, les coûts de production sont modélisés par composante sur la base des facteurs techniques L_r , σ_r , N_r , avec les coûts unitaires respectifs de c_{Lr} , $c_{\sigma r}$ et c_{Nr} qui intègrent les coûts d'exploitation et les coûts d'investissement amortis sur toute la durée de vie technique. On en déduit un coût d'exploitation par composante et par année d'activité, qui est la somme des indicateurs de moyens pondérés par leurs coûts unitaires respectifs.

A ces coûts d'exploitation s'ajoutent des frais généraux notamment de gestion et de commercialisation : nous les évaluons de manière proportionnelle au nombre de trajets réalisés.

Réciproquement, les déplacements réalisés en TC produisent des recettes tarifaires : nous modélisons un tarif moyen par relation origine-destination.

2.5 Impacts environnementaux

Les impacts environnementaux d'un système de transport se produisent tout au long de son cycle de vie : il faut intégrer le développement des équipements et des services de mobilité ainsi que les processus d'exploitation du transport. Les origines des impacts sont multiples : la construction et la maintenance des infrastructures et des matériels roulants, la production / distribution / consommation d'énergie, le fonctionnement des véhicules. Ces impacts sont locaux (par exemple, le bruit et la pollution de l'air) ou globaux (par exemple, les émissions de carbone). Le niveau des impacts locaux dépend non seulement de la quantité émise mais également de la population qui y

est exposée localement : ainsi, la densité locale de population doit être prise en compte dans la valorisation économique (Quinet et al., 2013).

Ici, nous limitons notre champ d'analyse à deux types d'impacts, à savoir (i) la pollution de l'air par les véhicules, qui comprennent les automobiles qui induisent le trafic par sous-réseau ainsi que les véhicules des transports collectifs qui circulent quotidiennement pendant une durée déterminée, (ii) les émissions de gaz à effet de serre mesurées en équivalent carbone, qui dépendent dans chaque zone de la quantité de trafic et aussi de la vitesse moyenne de circulation.

Par nature d'impact, on évalue un coût monétaire en multipliant la quantité physique par un coût unitaire spécifique. Pour un impact local tel que la qualité de l'air, le lieu d'impact détermine le nombre d'habitants exposés au dommage : de ce nombre dépend le coût unitaire de l'impact.

2.6 Assemblage du modèle

En base annuelle, on évalue un indicateur de profit par catégorie d'acteurs : noté P^u pour le profit des usagers, pour P^o l'opérateur de TC et P^e pour l'environnement.

A partir de ces profits catégoriels, on définit un indicateur d'intérêt collectif : la fonction de bien-être social. Nous considérons soit $P^{ou} = P^o + P^u$, soit $P^{oue} = P^{ou} + P^e$ qui inclut aussi l'environnement.

La fonction de profit collectif dépend d'un jeu diversifié de paramètres : prix de l'énergie, tarifs modaux, niveaux des facteurs structurels qui résument une composante de TC. Le modèle STEM permet de chercher des valeurs qui optimisent la fonction d'intérêt collectif, tout en respectant l'ensemble des contraintes techniques (formation du coût généralisé, choix modal, phénomènes de congestion, production des impacts environnementaux).

La figure 1 résume l'architecture d'ensemble du modèle.

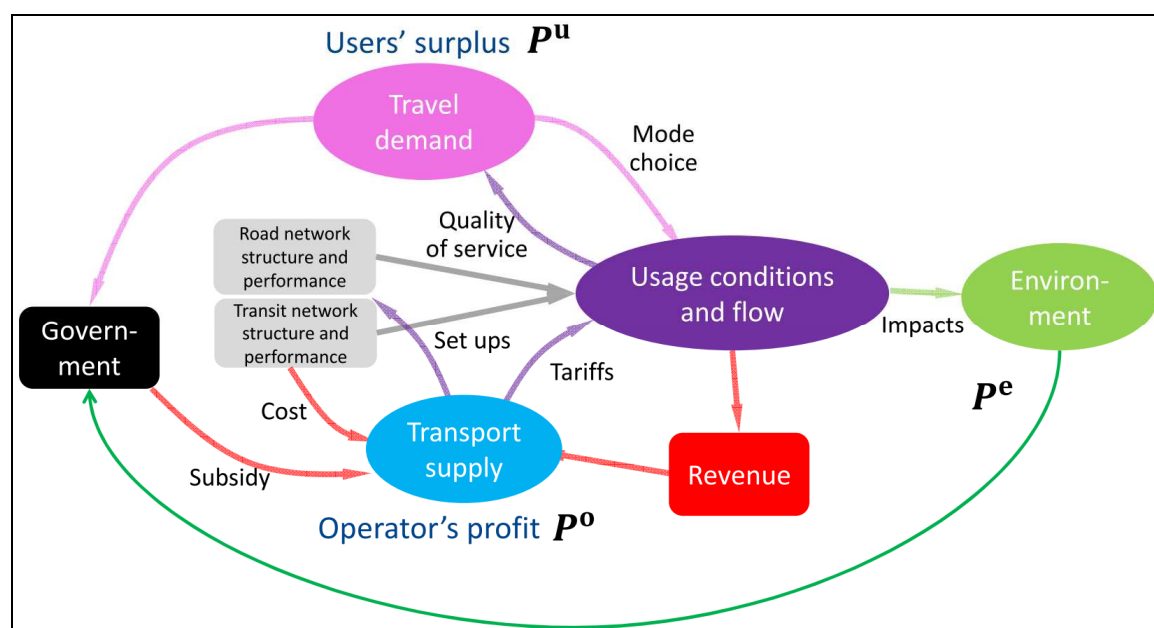


Fig. 1. Architecture du modèle STEM bimodal.

3. Application à Paris-Région en l'état de 2010

Notre application de référence concerne l'agglomération parisienne et la région Ile-de-France qui contient cette agglomération, en l'état de 2010 qui est l'année de réalisation de la dernière Enquête de Mobilité auprès des Ménages : l'EGT 2010.

Dans cette section, nous reprenons l'ordre de la présentation théorique du modèle dans la section 2 afin de traiter le cas particulier de l'agglomération parisienne : (1) le territoire, (2) la demande de mobilité motorisée, (3) le mode VP et le réseau routier, (4) les TC en termes de modes et de composantes, (5) les impacts environnementaux, (6) les grandeurs économiques et les leviers d'action pour la planification du système de mobilité.

3.1 Le territoire de Paris - Région Ile-de-France

La région Ile-de-France s'étend sur 12 100 km². En l'état de 2010 elle rassemble 11.8 millions d'habitants, dont 11 M font partie de l'agglomération parisienne, elle-même étendue sur une surface urbanisée d'environ 2 700 km². Ainsi 90% des habitants vivent dans 25% de l'espace régional, avec une densité moyenne de 4 000 h/km². L'agglomération parisienne est l'une des toutes premières métropoles européennes, et sa densité moyenne est très supérieure à celles des autres villes françaises.

La figure 2 montre l'organisation fortement monocentrique de l'agglomération et de la région :

- (a) les densités de population sont beaucoup plus fortes en zone centrale, qui correspond à la Ville de Paris : 2.2 M d'habitants sur 105 km² soit une densité moyenne de 21 000 hab/km². La densité est encore forte dans la banlieue proche qui correspond à peu près aux trois départements administratifs dits de « Petite couronne » : 4.4 M hab sur 657 km², soit environ 7 000 hab/km². Autour de la petite couronne, la banlieue extérieure en limite de l'agglomération compte 4.3 M hab sur 1 950 km², soit environ 2 200 hab/km², au sein de la « Grande couronne » qui rassemble 5.1 M hab sur 11 250 km², soit environ 500 hab/km².
- (b) La vue prismatique des populations met en évidence les concentrations dans le centre, et le gradient spatial de la densité en allant du centre vers la périphérie.
- (c) La vue prismatique des emplois manifeste une polarisation encore plus forte en faveur du centre.
- (d) La carte des infrastructures structurantes de transport : voirie routière principale, voies ferrées et leurs gares, reflète l'organisation spatiale selon un motif centre-périphérie.

Au niveau régional, l'organisation du transport public relève d'une agence publique : Ile-de-France Mobilités, qui agit pour le compte de la Région et des Départements administratifs qui la composent.

Nous avons modélisé ce territoire en trois zones : la zone centrale pour la Ville de Paris, la banlieue proche pour la petite couronne et la banlieue éloignée pour la grande couronne.

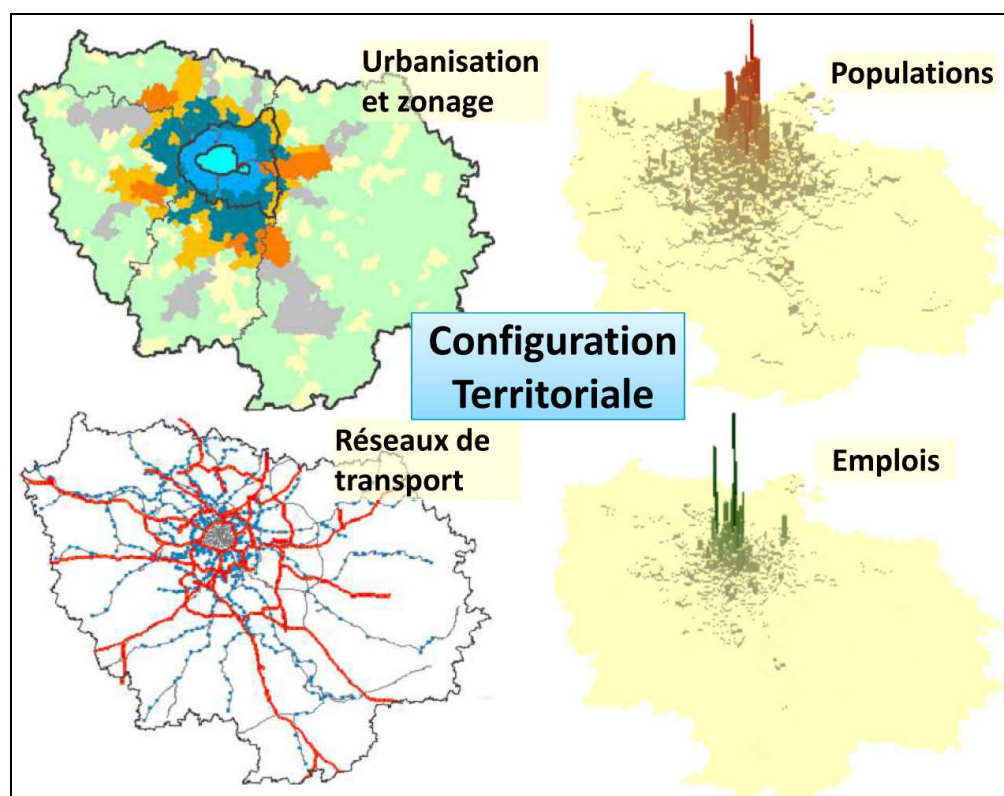


Fig. 2. Territoire francilien en 2010 : composition urbaine, population, emplois, transports.

Tab. 1 : Effectifs journaliers de déplacements motorisés selon la disposition bimodale.

Plurimodalité	Déplacements (M/jour)	Distance moyenne (km)	Temps moyen (min)
TC, captifs	5,2	7,3	46
TC, flexibles	2,8	12,2	54
VP, flexibles	8,4	6,3	22
VP, captifs	7	6	23
Total	24,3		

3.2 La demande de mobilité motorisée

D'après l'Enquête de Mobilité des Ménages de 2010 (EGT 2010 : source Omnil, 2012), les individus franciliens réalisent par jour ouvrable moyen 24.3 M de déplacements motorisés : i.e. environ 2.2 déplacements par jour et par personne. Ces déplacements se répartissent en trois tiers : 7.9 M de déplacements dépendants de l'automobile, encore 8.4 M en automobile mais flexibles, plus 8 M de déplacements en TC dont 3 M sont flexibles et 5 M sont captifs. En moyenne, les déplacements en TC sont un peu plus longs en distance et nettement plus longs en temps que leurs homologues en VP.

En plus de la disposition multimodale, nous avons segmenté la demande selon les trois critères géographiques suivants :

- (a) La portée géographique, distance à vol d'oiseau entre le point d'origine et le point de destination, en distinguant 3 classes : la « courte portée » définie par l'intervalle de 0 à 3 km, la « moyenne portée » entre 3 et 10 km, la « longue portée » au-delà de 10 km.

- (b) La zone d'origine et la zone de destination : cela localise la relation O-D selon une logique radiale ou plutôt de rocade.
- (c) Selon que la ligne droite entre le point d'origine et le point de destination traverse la zone centrale, ou la contourne.

En tout il y a 21 segments géographiques de déplacements. Leurs caractéristiques respectives en termes d'effectifs et de coefficients d'affectation aux réseaux modaux sont tirés de l'EGT 2010.

Pour les automobiles, nous avons considéré un type moyen, à moteur thermique intermédiaire entre essence et diesel. Pour les tarifs en TC nous avons également supposé des conditions identiques pour tous les usagers.

Les coûts généralisés modaux sont décrits chacun dans la sous-section de son mode.

Pour les usagers flexibles, le modèle logit binaire de choix modal a été estimé avec un coefficient $\theta = .27$ et un malus modal de $\zeta = 3$ € pour les TC. La figure 3 montre l'ajustement réalisé, avec par segment σ de demande, la répartition du volume flexible $Q_{\sigma,F}$ entre VP et TC en fonction des coûts généralisés : la relation estimée est $\ln(Q_{\sigma,F}^{VP} / Q_{\sigma,F}^{TC}) = \theta(g_{\sigma}^{TC} - g_{\sigma}^{VP})$.

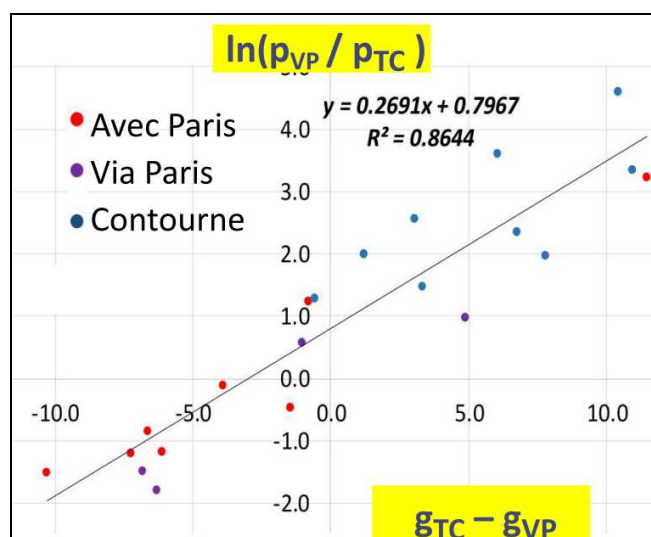


Fig. 3. Ajustement du modèle de répartition bimodale.

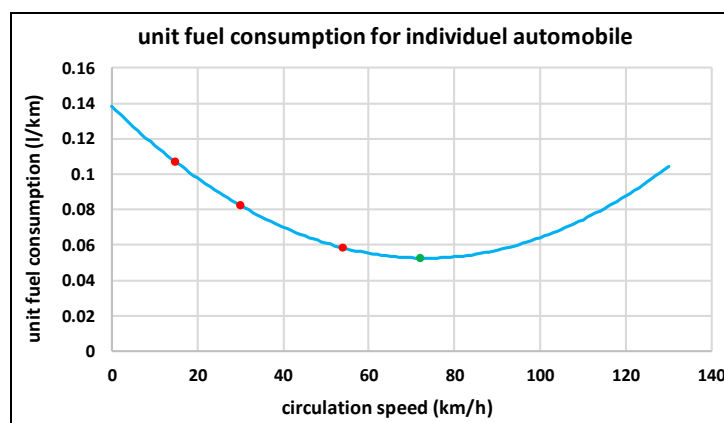


Fig. 4. Consommation de carburant de « l'automobile composite », en fonction de la vitesse.

3.3 Mode automobile et réseau routier

Le modèle moyen de véhicule automobile est un véhicule composite, intermédiaire artificiel entre moteur diesel et moteur à essence. La figure 4 montre la fonction de consommation d'énergie, en litres de carburant par kilomètre parcouru en fonction de la vitesse de circulation (source Copert).

Les coûts monétaires en énergie sont déduits des consommations, au prix unitaire de 1.2€ le litre. Nous avons négligé les péages autoroutiers car en 2010 la Région ne compte que deux sections routières à péage, toutes deux dans la partie ouest de l'agglomération.

Nous avons aussi ajouté un coût de parking en fonction du lieu de destination : fixé forfaitairement à 3.5 € en zone centrale, 1 € en banlieue proche et 0 en banlieue éloignée. Ces coûts reflètent les tarifs en parc public pour une durée d'environ 2 heures, ainsi que les loyers des garages selon la zone.

Par segment, le temps passé en déplacement automobile est estimé en fonction des distances parcourues dans chaque zone, et de la vitesse moyenne de circulation sur le réseau routier de cette zone. Le taux d'occupation moyen des voitures est 1,2 p/véh. On prend aussi en compte un facteur multiplicatif de 140% pour convertir une distance en ligne droite en une distance via le réseau.

Les caractéristiques du réseau routier sont déduites du modèle de planification MODUS de la DRIEA (Ladegaillerie, 2011). Dans ce modèle à quatre étapes de la demande de transport, le modèle d'affectation du trafic sur le réseau routier détaille environ 35 000 tronçons monodirectionnels, avec pour chaque tronçon la longueur, le nombre de files et la capacité de flux, ainsi qu'un type de route : voies séparées ou non, urbaine ou interurbaine, si urbaine le niveau d'interaction avec le stationnement, les piétons et les deux roues.

Le tableau 2 présente les caractéristiques principales de trois sous-réseaux selon la zone dans le territoire. Par sous-réseau, un Diagramme Fondamental Macroscopique reliant la densité de trafic et la vitesse par la formule $R_z(v) = \omega_z \ln(v_z^0 / v)$ a été estimé.

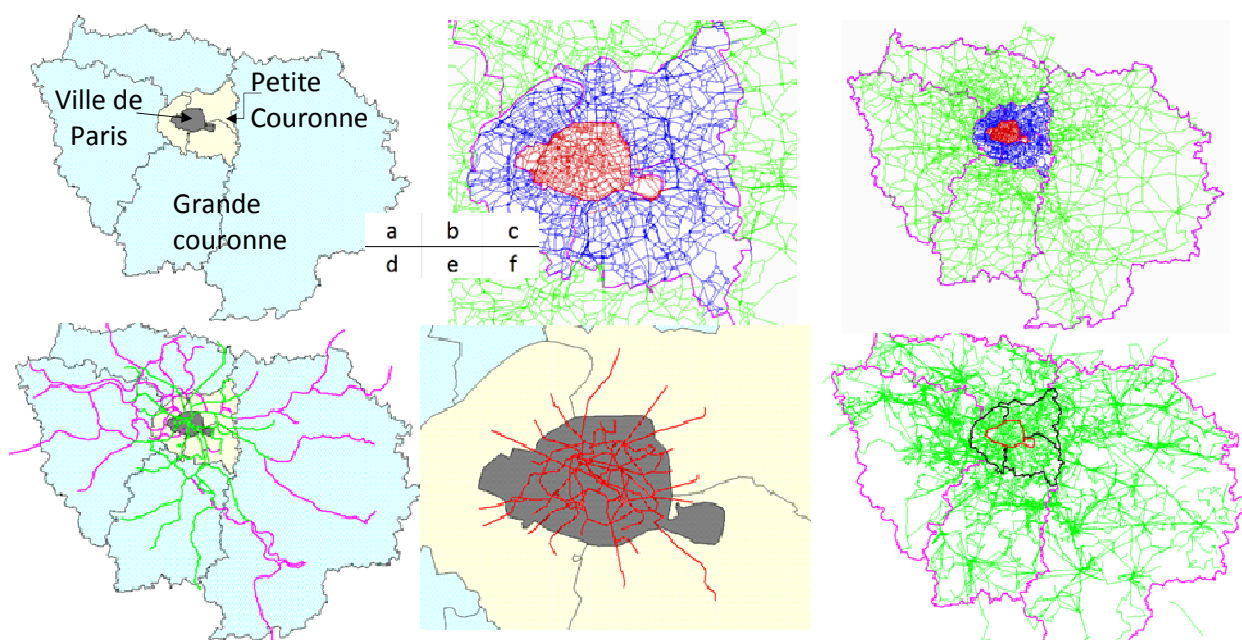


Fig. 5: Répartition en sous-régions, tracés des réseaux de voirie et des modes de transport collectif.

Tab. 2 : Caractéristiques du réseau de voirie et fixation des paramètres.

Sous-région	l_z km de file	ω_z	v_{0z} km/h	F_z €	Flux auto M veh/day	Trafic auto M veh*km/day
Ville de Paris	1670	48,5	38,0	2,0	2,35	13,3
Petite couronne	4417	53	48,0	0,5	6,59	39,2
Grande couronne	19097	40	59,0	0,0	10,67	84,3

On a considéré une « période active » homogène H de 10 heures pour représenter la densité moyenne de la circulation durant la journée. Le calibrage du modèle de choix modal interagit avec celui du MFD par composante du réseau routier. Les vitesses de circulation obtenues in fine sont de 18 km/h en zone centrale, 30 km/h en banlieue proche et 50 km/h en banlieue extérieure.

3.4 Les TC : un réseau multimodal en plusieurs composantes

En région Ile-de-France, le système de TC est intégré en termes de tarification et d'information, sous la responsabilité de l'autorité organisatrice de la mobilité, Ile-de-France Mobilités (IDFM). Le système est composé d'un ensemble de lignes de métro exploitées par la RATP, d'un ensemble de lignes d'autobus, exploitées en zone centrale et en petite couronne par la RATP mais en grande couronne par différents opérateurs, et d'un ensemble de lignes de train exploitées principalement par le service régional Transilien de la compagnie ferroviaire nationale SNCF mais aussi par la RATP pour la majeure partie des lignes A et B du RER (Réseau Express Régional), qui structurent l'agglomération l'une selon un axe est-ouest l'autre selon l'axe nord-sud. Quelques lignes de tramway complètent le réseau de métro.

Nous avons modélisé cet ensemble diversifié en 11 composantes selon la zone et la technique modale. Le tableau 3 liste les composantes et indique les descripteurs synthétiques que sont le linéaire de lignes, le nombre de stations et la taille de la flotte de véhicules. On relève qu'en zone dense les modes ferrés présentent des linéaires réduits mais des tailles de flotte assez importantes, afin d'offrir des fréquences élevées. Les composantes d'autobus présentent des flottes plus nombreuses en apparence, mais chaque autobus est moins capacitif qu'une voiture de métro ou de train : or une rame de métro compte en moyenne 5 voitures et les trains sont souvent composés de 10 voitures, avec même des voitures en duplex sur certaines lignes.

C'est pourquoi les trafics des voyageurs sont répartis entre les composantes de manière assez équilibrée. En termes de voyageurs.km par jour, le métro domine en zone centrale, le RER en banlieue proche, tandis qu'en banlieue lointaine RER et train suburbain font jeu égal, chacun assurant deux fois plus de trafic que les lignes d'autobus.

Les caractéristiques des segments de demande ont été calculées à partir de l'Enquête de Mobilité des Ménages (EGT 2010). Les fréquences moyennes de service sont celles de la pointe du matin, calibrées à partir du modèle d'affectation du trafic sur le réseau de TC dans le modèle MODUS (car les tailles de flotte comptent une part de véhicules immobilisés pour entretien, maintenance ou tout simplement en attente de reprise de trafic, par exemple après retournement au terminus).

Tab. 3 : Caractéristiques des composantes de transport collectif.

Systems	Subarea	Sub-mode	Supply			Traffic	
			Network length (km)	Number of stations	Fleet size	Quantity (M pax/day)	Volume (M pax*km/day)
Transit networks	Paris	Bus	598	1795	1295	1.25	2.58
		Métro	171	248	572	3.97	15.9
		RER	57	29	107	1.91	9.58
		Transilien	13	6	22	0.62	1.95
	inner suburbs	Bus	2894	7575	3078	2.03	4.6
		Métro	39	52	111	1.35	2.5
		RER	181	85	129	2.06	14.3
		Transilien	123	40	90	0.77	5.09
	outer suburbs	Bus	20032	25173	4271	1.24	4.29
		RER	355	128	107	1.13	8.72
		Transilien	761	187	207	0.65	8.24
	Total						77.8

Pour passer des temps physiques élémentaires aux temps physiques par déplacement en moyenne par segment, nous avons utilisé des coefficients d'affectation. Pour évaluer les temps généralisés TC nous avons pondéré les temps en véhicule, en attente et en rabattement, par des coefficients de pénibilité, de valeurs respectives 1.0, 1.5 et 2.0.

Par segment encore, nous avons estimé un tarif moyen à partir des différentes formules tarifaires déclarées dans l'Enquête de Mobilité des Ménages et des statistiques d'utilisation des abonnements de transport collectif (Omnil, 2012). La moyenne d'ensemble est de 1.2 € par déplacement (soit 3G€/300/8M).

Les **coûts généralisés en TC** pour différents types de trajets sont mentionnés dans le tableau 4.

Venons-en aux **coûts de production**. Nous avons considéré les coûts d'exploitation d'une année courante, en incluant la maintenance et la réhabilitation des lignes existantes mais en excluant les investissements pour le développement de nouvelles lignes. Les coûts sont déclarés par les opérateurs par mode de transport et par fonction, en distinguant Lignes, Stations, Matériels roulants et Fonctions d'ordre général (management, commercialisation, études etc). Nous avons assimilé le coût de ces fonctions au coût fixe $c_1 Q^T$, pour en déduire $c_1 = .8$ € par déplacement.

Nous avons rapporté les autres natures de coût aux facteurs L_r , σ_r et N_r pour déduire des coûts unitaires en base annuelle, cf. tableau 5. Pour mémoire, le coût unitaire d'un véhicule inclut son fonctionnement, donc le coût en énergie et les salaires des conducteurs : ce dernier terme est plus fort dans le centre car la plage horaire journalière y est plus étendue. Nous avons supposé que les matériels roulants de type RER ou Transilien ont des coûts homogènes entre les sous-réseaux.

Tab. 4 : Temps et coût par trajet pour un usager du transport collectif.

Sous-région Numéro de composante TC Mode de transport	Ville de Paris				Petite couronne				Grande couronne		
	1 Bus	2 Metro	3 RER	4 Train	5 Bus	6 Metro	7 RER	8 Train	9 Bus	10 RER	11 Train
Flux de voyageurs (M pax/jour)	1,25	3,97	1,91	0,62	2,03	1,35	2,06	0,77	1,24	1,13	0,65
Espacement des stations (km)	2,06	4,01	5,02	3,15	2,27	1,85	6,94	6,61	3,46	7,72	12,68
Temps à bord (min)	14,7	19,4	15,0	10,9	15,3	5,9	15,9	13,0	10,1	13,6	13,5
Distance d'accès (km)	0,29	0,41	0,54	1,74	0,28	0,52	0,65	0,57	0,31	0,91	0,98
Coût généralisé (€/trajet)	6,84	9,24	5,64	4,23	7,36	5,84	7,72	6,19	7,70	12,59	13,38

Tab. 5 : Coûts de production en base annuelle, par moyen technique et par opérateur.

Operators	RATP	SNCF	Optile	Total
Expenditure by sector (bn€/y)				
Line	0.46	0.82	0.04	1.31
Station	0.71	0.58	0.01	1.31
Rolling stock	2.18	0.94	0.53	3.65
General cost	1.15	0.49	0.26	1.89
Total	4.50	2.83	0.83	8.16

Tab. 6 : Coûts unitaires en base annuelle, par moyen technique et selon la composante.

Sub-region	Sub-mode	L_r M€/km/y	σ_r M€/station/y	N_r M€/vehicle/y
Paris	Bus	0.008	0.011	0.343
	Metro	1.250	1.450	0.980
	RER	1.000	2.400	2.140
	Transilien	1.100	2.500	1.575
inner suburbs	Bus	0.006	0.009	0.231
	Metro	1.050	1.300	0.980
	RER	0.720	1.800	2.140
	Transilien	0.700	1.400	1.575
outer suburbs	Bus	0.002	0.001	0.124
	RER	0.630	1.700	2.140
	Transilien	0.618	1.330	1.575

Par année, la production des TC coûte environ 8 G€ alors que les recettes tarifaires n'apportent que 3 G€. La collectivité équilibre le bilan financier des opérateurs TC par une subvention annuelle d'environ 5,7 G€. Par déplacement, la subvention représente en moyenne 2 €, près de deux fois plus que le prix moyen. Le coût total en moyenne par déplacement est d'environ 3 €, bien moins cher que ce que coûterait une course en taxi sur la même liaison.

3.5 Impacts environnementaux

En matière de transport, les impacts environnementaux les plus connus du public sont les émissions de gaz à effet de serre (GES), qui ont une portée globale, et au plan local les émissions de polluants atmosphériques (COV, NOX, PM) et de bruit.

Les émissions de GES peuvent être évaluées à partir des consommations d'énergie des véhicules, sur la base de facteurs d'émission de CO₂ par unité énergétique – litre de carburant pour un moteur thermique ou kWh pour l'électricité. On compte environ 3 kg de CO₂ par litre d'essence, et .053 kg CO₂ par kWh d'électricité produite en France.

Dans la simulation de l'état de 2010, les vitesses moyennes sur les réseaux routiers selon la zone induisent des consommations respectives de .10, .08 et .06 litre par km, pour le type moyen de voiture. Pour un autobus à moteur thermique, le facteur est de .46 litre par km. Les émissions de CO₂ sont donc de .3 à .2 kgCO₂/km pour une automobile, et atteignent 1.38 kgCO₂/km pour un

autobus. Au prix tutélaire de 0.032 €/kgCO₂ en 2010, les coûts associés varient de .002 à .01 €/km pour une automobile, contre .04 €/km pour un autobus.

Nous avons aussi évalué les émissions de carbone induites par la circulation des modes ferrés : en Ile-de-France, leurs véhicules ont des moteurs électriques. Le coefficient de conversion est de 0.053 kgCO₂/kWh d'énergie consommée. Les consommations d'énergie sont de 5.9 kWh/km pour un métro et 13.5 kWh/km pour un train (RER ou Transilien).

Les différentes valeurs citées sont reprises du rapport Quinet (2013) réalisé pour le Conseil d'Analyse Stratégique national afin d'orienter les décisions d'investissement public vers le développement durable. Nous nous sommes aussi basés sur ce rapport pour évaluer les « effets amont » des modes de transport, i.e. les impacts engendrés par la fabrication des véhicules et des consommables ainsi que par leur transport jusqu'au territoire d'utilisation, et par la fabrication des infrastructures : cependant leur valorisation monétaire est inférieure d'un ordre de grandeur à celui des émissions de gaz à effet de serre.

Pour les émissions de polluants locaux, les facteurs d'émission par véh.km dépendent de la vitesse selon des fonctions en forme de U : cf. la figure 4. La monétarisation de l'impact dépend du nombre de personnes exposées, et donc de la densité urbaine dans la zone d'émission. Comme la zone centrale de l'Ile-de-France est trois fois plus dense en population que la densité urbaine très haute évoquée dans le rapport Quinet, nous avons multiplié par 3 les coûts unitaires de la pollution atmosphérique locale dans cette zone. Le tableau 7 fournit les coûts environnementaux de la circulation des différents types de véhicules, et ce selon la zone d'impact, par année, en euros pour 100 km.

Au total, pour la région parisienne en situation de 2010, les impacts environnementaux sont évalués à 5.3 G€ en dommages annuels. Dans ce total, 90% sont imputables aux voitures et 10% aux autobus. Les GES sont très minoritaires à 6% du total, face à la pollution locale qui représente 94% dont 78% pour l'automobile et 16% pour les TC routiers (autobus thermiques). Par zone géographique, le centre supporte 37% soit 870 € par habitant, la petite couronne 41% soit 520 € par habitant et la grande couronne 12% soit 200 € par habitant.

Tab. 7 : Coûts environnementaux des transports motorisés en Ile-de-France, année 2010.

Zone	TC (G€/an)	Automobile (G€/an)	2 modes (G€/an)	Par tête (€/an)
Ville de Paris	0,32	1,63	1,95	870
Petite Couronne	0,17	2,13	2,3	520
Grande Couronne	0,03	1,00	1,03	200
Ensemble	0,52	4,76	5,28	450

3.6 Synthèse quantitative des enjeux de la mobilité motorisée

Nous avons déjà mesuré l'économie du mode TC : par année, 8 G€ de coûts de production, contre 3 G€ de recettes et donc 5 G€ de subventions.

Pour le mode automobile, les dépenses annuelles s'élèvent à 3.6 G€ pour le carburant, au sein d'environ 15 G€ de coût privé.

Les dommages des transports à l'environnement atteignent un montant équivalent d'environ 5 G€. Il reste à comptabiliser les profits des usagers.

Toujours par année, les coûts généralisés atteignent 21 G€ pour les captifs des TC (soit 9 € par déplacement), 7.5 G€ pour les dépendants de l'automobile (soit 5.6 € par déplacement) et 27 G€ pour les usagers flexibles (soit 8 € par déplacement) : au total 57 G€, dont 32 en TC et 27 en VP.

Ainsi les coûts généralisés pour les usagers dominent le tableau d'ensemble : ils sont supérieurs d'un ordre de grandeur aux coûts de production des TC comme aux dommages environnementaux. Dans ces coûts généralisés, la partie monétaire représente un tiers seulement, les deux autres tiers sont la valorisation monétaire des temps passés par les usagers. Leur montant annuel peut être rapporté au PIB régional, de l'ordre de 600 G€ en 2010 : près de 10% donc.

On peut aussi rapporter les coûts généralisés annuels à la population de l'agglomération : le montant par habitant est de l'ordre de 5 000 € par an.

4. Exploration de politiques de mobilité

Le modèle nous permet non seulement de représenter le système dans un état de référence et d'en faire un diagnostic mais encore de simuler la réponse du système à une politique gestionnaire agissant sur les différents leviers d'action mentionnés. Dans cette section, nous prospectons les impacts potentiels d'un éventail de politiques gestionnaires, réparties en trois groupes : d'abord des politiques de tarification ciblant les TC ou le mode automobile (lot 1), puis des politiques mixtes d'investissement et de tarification pour les TC, à court terme en jouant sur la fréquence de service (lot 2) ou à long terme en jouant aussi sur le linéaire de lignes et le nombre de stations (lot 3).

Chaque politique a été évaluée en termes économiques de surplus des usagers, de profit des opérateurs de TC, de coût pour l'environnement et pour les finances publiques. Nous présenterons successivement les résultats pour chaque lot de scénarios, avant de tirer une comparaison d'ensemble.

4.1 Politiques de tarification

Scénario 1 : gratuité des TC. La mise en gratuité des TC fait l'objet d'un débat de société en Ile-de-France (IDFM, 2018) et dans d'autres villes en France, en Allemagne et dans d'autres pays. Les avantages espérés sont l'augmentation de la fréquentation des TC, la réduction des nuisances environnementales grâce au report modal depuis le mode automobile, ainsi que la réduction des coûts de perception du tarif. En revanche, la hausse des trafics dans les TC entraînerait des surcoûts d'exploitation, elle pourrait augmenter la congestion ou rendre nécessaires des investissements supplémentaires : de plus, il faudrait trouver d'autres ressources financières pour remplacer les recettes tarifaires, et ce pour un montant d'autant plus important que le réseau est plus développé.

Notre premier scénario est d'imaginer de rendre gratuits les TC en Ile-de-France, tout en maintenant la composition de l'offre en l'état de référence. En déplacements par jour, la fréquentation des TC augmenterait d'environ 10%. Les déplacements en mode automobile baisseraient d'autant : le trafic routier baisserait de 7 M véh.km/jour, les vitesses augmenteraient dans chaque zone et le coût pour l'environnement baisserait de 4% (2.7% par réduction du trafic et 1.3% par amélioration du régime de circulation). Le gain environnemental est évalué à 0.22 G€/an, qui s'ajouterait aux +2.8 G€/an d'avantages pour les usagers ; cependant il faudrait financer les 2.4 G€/an de recettes tarifaires qui viendraient à manquer dans l'équation budgétaire. Pour les finances publiques, gagner .22 côté environnement au prix de 2.4 d'argent public est une opération très peu rentable.

Scénario 2 : surtaxe sur les carburants. Nous avons simulé une augmentation de 7 c€ par litre du prix du carburant pour les automobiles : soit un surcoût de 5% qui s'ajoute à la TICPE (Taxe Intérieure sur la Consommation des Produits Énergétiques) – dont le niveau de base est déjà ressenti comme élevé par les automobilistes français. Une telle mesure aurait pour conséquences de réduire faiblement le trafic en automobile (-1%) ainsi que le surplus global des usagers (-1%) et que les nuisances environnementales (-1%). L'effet serait positif sur les finances publiques, à +0.35 G€/an.

Scénarios 3 et 4 : péage urbain en zone centrale. Alors qu'une surtaxe sur les carburants pénaliserait l'ensemble des déplacements automobiles (les véhicules électriques étant très rares dans la situation de référence), un péage urbain ciblant la zone centrale viserait une réduction locale du trafic automobile, donc des nuisances environnementales et de la gêne causée aux riverains. Nous avons utilisé le modèle pour rechercher le tarif par unité de distance permettant d'optimiser le surplus des usagers et des opérateurs, dans le scénario 3, ou le surplus global intégrant aussi l'environnement, dans le scénario 4. Les valeurs respectives seraient de 0.26 €/km et 0.77 €/km : l'incorporation de l'environnement fait passer du simple au triple, par rapport à la seule considération de la congestion routière. Ce rapport dose les conséquences respectives du transfert modal de 0.5 ou 1.5% des déplacements vers les TC, les recettes de péage de 0.49 ou 1.11 G€/an et un surcroît de recettes tarifaires de 0.03 ou 0.09 G€/an pour les TC. Le gain environnemental serait de 4.2 ou 12.9%, provenant essentiellement (aux trois quarts) de la réduction quantitative du trafic mais aussi (pour un quart) de l'amélioration des vitesses qui en résulterait localement.

Tab. 8 : Résultats des scénarios du Lot 1, « tarifaires ».

Indicator	2010 State (Reference)		Scenario 1: Free transit fares	Scenario 2: Energy tax +7c€/L	3: Road charge for max W1	4: Road charge for max W0
Transit fare revenues	2.38			2.4	2.4	2.5
Transit production costs	-8.1		-8.2	-8.1	-8.1	-8.2
Operator's profit Po	-5.72	ΔP_o	-2.5	0.4	0.4	1.0
Users' surplus Pu	-56.6	ΔP_u	2.9	-0.3	-0.4	-1.3
Environment surplus Pe	-5.28	ΔP_e	0.2	0.05	0.2	0.7
W1 = Pu+Po	-62.3	ΔP_{ou}	0.4	0.04	0.1	-0.3
W0 = Pu+Po+Pe	-67.6	ΔP_{oue}	0.6	0.09	0.3	0.4
TICPE revenues		ΔE_R	-0.08	0.4	-0.06	-0.15
Road charge revenues		ΔR_{CR}			0.5	1.1

Synthèse des simulations tarifaires. L'impact sur l'environnement varie de très faible (réduction de 1% des nuisances) pour la surtaxe du carburant, à modéré pour le péage urbain triple (13%), en passant par un niveau faible (4%) pour le péage simple comme pour la mise en gratuité des TC. On pourrait envisager de combiner les instruments afin de superposer les conséquences : le risque serait de multiplier les oppositions sociales, alors qu'il serait plus équitable de demander à chacun d'apporter une contribution à un objectif global. Un péage routier en zone centrale au niveau triple qui est très élevé, rapporterait 40% des recettes tarifaires des TC en situation de référence, soit 15% du coût de leur production. Parmi les avantages des usagers, rappelons la part prépondérante que tient la valorisation du temps passé dans la valorisation du coût généralisé et donc du surplus.

4.2 Gestion à court terme des TC

Notre modèle permet aussi de simuler des adaptations de la gestion des TC, en termes de plan d'offre comme de tarifs, et de rechercher des stratégies gestionnaires optimisées. Dans le deuxième lot de scénarios, nous avons envisagé de redimensionner les flottes de véhicules et donc de jouer sur les fréquences, et aussi de varier les tarifs par segment géographique de demande. Cela s'apparente à une stratégie de Pay-per-use, mais en considérant non seulement les coûts de production, mais aussi l'ensemble des recettes commerciales, la concurrence modale avec l'automobile et le surplus des usagers : nous avons optimisé d'une part une fonction objectif $P^{ou} = P^o + P^u$, d'autre part la fonction $P^{oue} = P^o + P^u + P^e$ qui intègre aussi les impacts sur l'environnement. De plus nous avons distingué deux cas respectivement avec ou sans contrainte de subventionnement de la production des TC par la collectivité. Dans le cas contraint, le déficit d'exploitation est limité à $-S_1 = -5.7$ G€/an, ce qui ajoute une contrainte $P^o + S_1 \geq 0$ à la simulation.

Au niveau agrégé, l'application de la contrainte budgétaire se révèle plus déterminante que l'incorporation de l'environnement. L'optimisation à court terme permettrait de réduire le coût environnemental de -4% ou -6%, soit une amélioration assez faible selon l'échelle définie précédemment. Le relâchement de la contrainte budgétaire permet un choc d'investissement en TC : il serait bon de leur allouer 3G€/an de plus, ce qui drainerait une augmentation de 6% des déplacements en TC (contre +1% dans le cas contraint), améliorerait le surplus des usagers de 7% (contre 2% dans le cas contraint). Le surplus collectif P^{ou} augmenterait de 1.5% ou 1.8% selon le cas sans ou avec contrainte, et P^{oue} de 1.8% ou 2.1%.

Tab. 9 : Scénarios des Lots 2 et 3 : écarts à la situation de référence, en G€/an.

Scenario	ΔU	ΔO	ΔE	$\Delta \Sigma$
1/ Free transit fares	+2.9	-2.5	+0.2	+0.6
2/ Energy tax +7c€/L	-0.3	+0.37	+0.05	+0.1
3,4/ Road charge in central area, 0,26 or 0,77€/km	-0.4 -1.3	+0.4 +0.1	+0.2 +0.7	+0.3 +0.4
5-8/ Short-run optimization, under budget constraint or not	+1 +4	0 -3	+0.25 +0.3	+1.3 +1.4
9-12/ Long run optimization, under budget constraint or not	+3 +6	0 -2.7	+0.25 +0.3	+3.6 +3.9

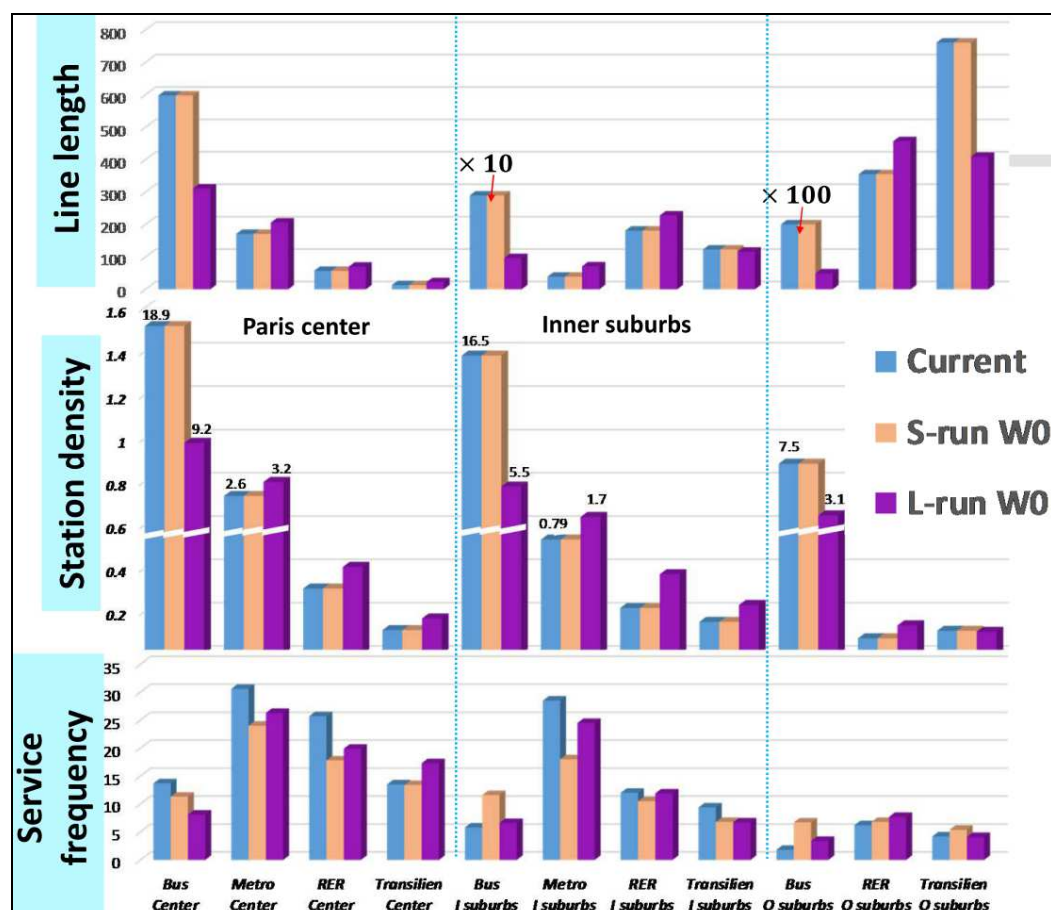


Fig. 6 : Variations du plan d'offre TC, scénario 6 et scénario 10 pour le court et le long terme.

Détaillons à présent les **variations du plan d'offre** selon les composantes de TC, en termes de fréquence de service qui est ici directement liée à la taille de flotte. La figure 6 montre que les stratégies de court terme tendraient :

- en zone centrale, à réduire les fréquences sauf pour le train suburbain,
- en banlieue proche, à augmenter sensiblement la fréquence de bus mais à réduire légèrement celles des modes ferrés,
- en banlieue éloignée, à augmenter les fréquences de tous les sous-modes ce qui suggérerait donc de renforcer globalement les TC.

Quant à la **structure tarifaire**, le modèle suggère des dispositions originales pour les scénarios soumis à contrainte budgétaire. Pour fixer les idées, voici les résultats du scénario 6 – maximisation du profit global P^{oue} sous contrainte de subventionnement des TC et d'encadrement des tarifs dans un intervalle allant de 0 à 6 € par déplacement :

- pour les déplacements longs i.e. à plus de 10 km, d'annuler le tarif, vraisemblablement pour promouvoir le report modal et ainsi éviter les nuisances environnementales de longs parcours en automobile.

- pour les déplacements courts à moins de 3 km, tarifier chaque déplacement à 2 ou 3 € selon la relation origine-destination, et ce afin de constituer un niveau suffisant de revenus commerciaux,
- pour les déplacements intermédiaires de portée entre 3 et 10 km, des tarifs à niveau intermédiaire variant entre 0.5 et 2 €, sauf en banlieue éloignée avec 6 € par déplacement (borné).

Ainsi le modèle suggère de renverser la logique intuitive de payer sur la base des distances parcourues, en vue d'épargner l'environnement tout en maintenant un niveau cible de recettes commerciales.

Dans les scénarios qui ne sont pas soumis à la contrainte budgétaire de subventionnement, les valeurs estimées pour les tarifs optimaux sont proches de zéro.

4.3 Gestion à long terme des TC

Dans le troisième lot de scénarios, nous cherchons à optimiser l'offre de TC au moyen de la tarification et du plan d'offre en termes non seulement de taille de flotte de véhicules mais aussi de linéaire de lignes et d'espacement entre stations. Nous avons à nouveau croisé deux fonctions objectifs, P^{ou} ou P^{oue} , avec deux cas de subventionnement avec ou sans limitation au niveau S_1 . Il en résulte quatre scénarios numérotés de 9 à 12.

Les principaux résultats ont été présentés dans le tableau 9. Au niveau agrégé, à nouveau l'application de la contrainte budgétaire se révèle plus déterminante que la considération de l'environnement. L'optimisation à long terme permettrait de réduire le coût environnemental de manière modérée mais sensible : de 9% ou 12% selon que le subventionnement est limité ou non. L'ampleur de la réduction est double de celle qu'apporterait l'optimisation à court terme de la gestion du système. Concernant les surplus collectifs, l'optimisation à long terme rapporterait trois fois plus que celle à court terme, avec un gain de 5% ou 10%. Il y aurait également un choc d'investissement dans les TC, bien qu'à un niveau un peu inférieur car la considération du long terme permet de mieux répartir les adaptations du système, sur un ensemble plus large de leviers d'action.

4.4 Comparaison entre court et long terme

Dans le détail selon les composantes, les leviers d'action à mobiliser pour le long terme sont sensiblement différents de ceux pour le court terme :

- Il serait bon de reconfigurer l'offre de bus en réduisant les linéaires de lignes dans les trois sous-régions ; et de développer tous les sous-modes ferrés dans toutes les trois sous-régions, hormis le train suburbain en banlieue éloignée. Cela conforte à la fois le développement récent de lignes de tramway en banlieue, et le projet du Grand Paris Express qui renforcera les modes ferrés surtout dans la proche couronne.
- Les reconfigurations de lignes seraient à mener aussi en termes de re-disposition des stations : augmenter l'espacement entre les stations de bus et réduire l'espacement entre les stations des modes ferrés.

- Quant aux fréquences de service (hors considération de capacité), le modèle suggère de les réduire en zone centrale et en proche couronne sauf pour l'autobus (cf. développement des tramways), mais de les augmenter en banlieue éloignée.

En résumé, le modèle suggère que l'offre de TC ferrés est à renforcer en banlieue, et que l'offre d'autobus est à reconfigurer.

Concernant la structure tarifaire, les résultats varient selon les scénarios : par situation avec ou sans contrainte de subventionnement, la logique d'ensemble est analogue à celle pour optimiser la gestion à court terme.

La figure 7 présente une analyse des coûts par unité de trafic (passager.km), selon les composantes et l'horizon temporel entre état de référence, court terme ou long terme. Chaque barre superpose le coût de production et le coût pour l'environnement. Le coût de production dépend fortement du sous-mode : entre 0.4 et 0.6 € par p.km en autobus, contre 0.3 €/p.km pour le métro et 0.1 à 0.3 €/p.km pour les trains. Des économies de densité jouent sensiblement en zone centrale par rapport à la banlieue. Les coûts environnementaux dépendent encore plus fortement du sous-mode, en raison à la fois de la technique de transport (type de motorisation, infrastructure routière ou ferroviaire) et de la configuration du mode dans l'espace : entre 0.1 et 0.3 €/p.km pour l'autobus en zone centrale et en proche couronne, mais pour les modes ferrés des montants de l'ordre de quelques centièmes d'€/p.km.

Le modèle oriente le développement de l'offre de TC vers une réduction sensible du coût environnemental pour les déplacements en autobus, par reconfiguration de l'offre entre les composantes des TC, en plus du transfert modal depuis l'automobile vers les TC. Pour mémoire, le coût environnemental du mode automobile s'élève à 0.5 €/véh.km en zone centrale ou 0.2 €/véh.km en banlieue, soit nettement plus par voyageur que par l'autobus, et deux ordres de grandeur de plus que par les modes ferrés.

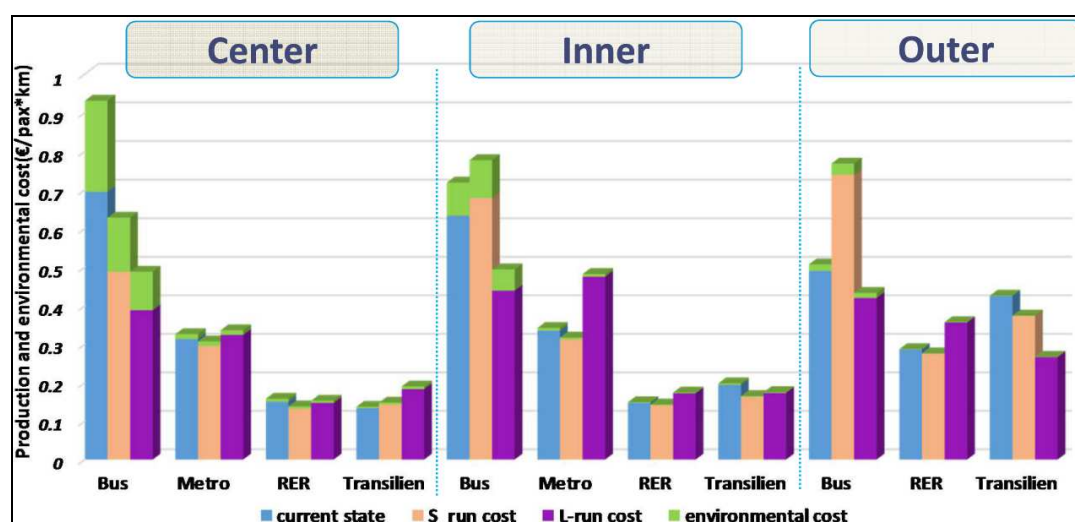


Fig. 7 : Coûts par unité de trafic (personne.km).

5. Conclusion

Résumé. Le modèle STEM est un modèle stratégique qui couvre des enjeux majeurs de la mobilité motorisée dans une métropole : les besoins de mobilité, les composantes techniques et les impacts environnementaux, le tout dans l'espace pour le desservir et le traverser. Nous avons explicité la composition du modèle afin de rendre transparentes les diverses hypothèses : c'est bien ce jeu d'hypothèses qui détermine la portée et les limites du modèle.

L'application du modèle à l'agglomération parisienne montre sa portée synthétique et stratégique : nous avons représenté le mode automobile et les sous-modes de transport collectif par composantes, en conciliant la spécification technique et la configuration spatiale. Au plan économique, nous avons intégré :

- (i) la demande segmentée par type de liaison et selon la flexibilité plurimodale,
- (ii) la production des transports collectifs et ses coûts,
- (iii) les consommations d'énergie et les frais d'usage du mode automobile,
- (iv) la monétarisation des principaux impacts environnementaux.

En adaptant les valeurs tutélaires de la pollution atmosphérique aux densités urbaines particulièrement fortes dans l'agglomération parisienne, nous avons évalué le coût des impacts environnementaux à environ 5 G€/an, soit sensiblement le même montant que le financement public des transports collectifs. Les coûts environnementaux sont en large majorité imputables au mode automobile, et fortement dominés par l'enjeu de la qualité de l'air.

Enfin nous avons exploré des stratégies gestionnaires pour le système de mobilité métropolitain, à travers un ensemble de scénarios répartis en trois lots. Le premier lot de scénarios concerne des instruments simples de tarification pour les transports collectifs ou pour le mode automobile. Au plan agrégé, les impacts sont faibles pour la production des TC mais potentiellement massifs pour leur financement dans l'éventualité d'une gratuité tarifaire. Dans tous les cas les impacts environnementaux seraient réduits, à un niveau variant de très faible à modéré, atteignant 13% pour une tarification élevée de la circulation automobile en zone centrale (à 0.77 €/km).

Les autres scénarios concernent la gestion des TC en termes de plan d'offre et de tarification, à court terme pour le lot 2 et à long terme pour le lot 3. Il en ressort de façon consistante le besoin de renforcer l'offre de TC en banlieue, en y développant les modes ferrés et en reconfigurant le réseau d'autobus. Les impacts sur l'environnement seraient assez faibles à court terme (environ -4-5%) et modérés à long terme (-13%). Les impacts économiques sur le surplus collectif seraient faibles à court terme (+2%) mais plus élevés à long terme (+5%). Pour les atteindre en ne jouant que sur les TC, un choc d'offre est nécessaire, ce qui rejoint la politique récente de renforcement systématique du réseau existant et d'investissement dans le réseau du Grand Paris Express à l'horizon 2030-2040.

L'application du modèle suggère aussi des politiques originales de tarification : pour atteindre l'optimum collectif il conviendrait de rendre gratuits les déplacements longs – épargnant ainsi les impacts environnementaux d'une alternative automobile – et à contrario de tarifier assez fortement les déplacements courts, afin d'assurer la contribution des usagers au financement du système. Or,

les habitants de la zone centrale sont-ils prêts à payer afin de bénéficier d'une meilleure qualité de l'air ?

Portée et limites. Les résultats de nos simulations doivent évidemment être interprétés avec précaution. Il faut garder en mémoire (i) la description synthétique du système, (ii) notre connaissance limitée des coûts de production des TC, (iii) la relativité des valeurs tutélaires, tant pour la valorisation des temps passés en déplacement par les individus, que pour celle des impacts environnementaux. A ce sujet, la place des gaz à effet de serre, faible dans notre étude, pourrait prendre beaucoup d'ampleur en intégrant les valeurs beaucoup plus fortes recommandées récemment (Quinet *et al*, 2019).

Quant à la méthodologie de modélisation, il faut rester conscient (i) du caractère statique du modèle, qui n'intègre les problématiques de capacité et de congestion que pour le mode automobile, (ii) de l'absence des modes actifs, marche et surtout les deux-roues qui pourront concurrencer davantage les véhicules motorisés plus grands grâce au développement des engins électriques, (iii) de l'absence de services partagés de mobilité basés sur l'automobile tels que le covoiturage, et aussi de combinaisons intermodales notamment entre automobile et mode ferroviaire, (iv) pour l'automobile comme pour les autobus nous avons considéré seulement des motorisations thermiques, alors que l'électrification des flottes constitue certainement un enjeu important – la part de 15% des autobus thermiques dans la pollution atmosphérique due aux transports, disparaîtra quand l'ensemble de la flotte sera devenue électrique, à l'horizon 2025 sous l'impulsion du Conseil régional d'Ile-de-France.

Prolongements. Nous projetons de développer le modèle de simulation afin de remédier aux carences signalées. Au plan économique, il sera bon d'étudier finement les relations entre les acteurs du système : d'une part l'équité entre les segments de demande et ce en considérant aussi la distribution des revenus, et d'autre part la place des entreprises dans le financement du système, en lien avec les bénéfices qu'elles retirent des déplacements de leurs employés. Au plan politique, il conviendrait d'étudier d'une part les arbitrages collectifs entre les différentes natures d'impacts et la fixation de leurs valeurs tutélaires respectives ; et d'autre part, les places respectives des différentes sous-régions dans les impacts, les bénéfices, les coûts et le financement public du système de mobilité dans le territoire.

Remerciements. Cette recherche s'inscrit dans le cadre de deux chaires de recherche de l'Ecole des Ponts ParisTech : la Chaire d'Éco-conception des ensembles bâtis et des infrastructures, en mécénat du groupe Vinci, et la Chaire Mobilité Urbaine, soutenue par Ile-de-France Mobilités (IDFM). Nous leur exprimons ici notre reconnaissance. Nous remercions aussi IDFM pour avoir mis à notre disposition l'enquête sur les déplacements des ménages (EGT), et la DRIEA qui nous a fourni le modèle de demande de transport « MODUS ».

6. Références

Badia, H., Estrada, M., Robusté, F. (2014) *Competitive transit network design in cities with radial street patterns*, Transportation Research Part B 59, 161-181.

Combes, F., van Nes, R. (2012). *A simple representation of a complex urban transport system based on the analysis of transport demand: the case of Region Ile-de-France*. Procedia – Social and Behavioral Sciences 48, 3030–3039.

Daganzo, C.F., Geroliminis, N., (2008) *An analytical approximation for the macroscopic fundamental diagram of urban traffic*. Transportation Research Part B 42, 771-781.

Estrada, M., Robusté, F., Amat, J., Badia, H., Barceló, J. (2012). *On the optimal length of the transit network with traffic performance microsimulation application to Barcelona*. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board 2276, 9-16.

Insee (2012) La population légale de l'Ile-de-France : 11 786 234 habitants au 1 janvier 2010. Note Insee « faits et chiffres » n°298, décembre, 3 pages.

Ladegaillerie, E. (2011) *Notice de présentation du modèle MODUS*. DRIEA, Paris.

Leurent, F., Combes, F., van Nes, R., 2016. *From Strategic Modelling of Urban Transit Systems to Golden Rules for their Design and Management*. (document provisoire)

Leurent, F. et Li, S. (2019a) *Un modèle stratégique de mobilité : application à l'Ile de France*. Communication au congrès RDMI 2019.

Leurent, F. et Li, S. (2019b) *A strategic model for urban transport planning: policy exploration for the Paris region*. Communication à la conférence ITEA (juin)

Mohring, H., 1972. *Optimization and scale economies in urban bus transportation*. The American Economics Review 62.4, 591-604.

OMNIL (2012) *Enquête globale transport : la mobilité en Ile de France*. N°1, septembre 2012, 20 p.

Quinet, E. et al. (2013) *L'évaluation socioéconomique des investissements publics*. Rapport du Commissariat général à la stratégie et à la perspective, République Française.

Quinet, A. et al. (2019) *La valeur de l'action pour le climat*. Rapport du Commissariat général à la stratégie et à la perspective, République Française.

Rapoport, J. et al. (2018) *Rapport du Comité sur la faisabilité de la gratuité des transports en commun en Île-de-France, leur financement et la politique de tarification*. Octobre 2018. 263 pages.

Van Nes, R., 2002. *Design of multimodal transport networks a hierarchical approach*. T2002/5, TRAIL Thesis Series, Delft University Press.