

Paris : un tramway nommé désir

Rémy Prud'homme, Martin Koning, Pierre Kopp¹

11 janvier 2007

2945

Résumé – Sur le quart des boulevards des Maréchaux, le bus a été remplacé par un tramway et simultanément les voies routières ont été rétrécies. Une enquête auprès de 1000 usagers montre que le tramway n'a engendré presque aucun transfert modal de la voiture vers les TC. Mais il a engendré d'importants transferts intra-modaux, du bus et du métro vers le tramway pour les TC, des boulevards des Maréchaux vers le périphérique pour les voitures. Les gains et les pertes associés à ces changements sont évalués. Le gain très réel des usagers des TC est plus que compensé par la perte des automobilistes, et en particulier par les coûts externes de congestion sur le périphérique. Il en va de même en ce qui concerne les rejets de CO₂ : les réductions causées par l'élimination des autobus et de quelques voitures sont bien moins importantes que les augmentations causées par l'allongement des trajets automobiles et les encombrements accrus, particulièrement sur le périphérique. Même en ignorant les 350 millions d'euros d'investissement, le bilan pour l'ensemble des usagers est fortement négatif. Il l'est surtout pour les habitants de la banlieue. Mais il ne l'est sans doute pas si l'on considère les seuls habitants de Paris : ils empochent l'essentiel des bénéfices tout en supportant une faible partie des coûts.

En décembre 2006, la municipalité de Paris a inauguré une ligne de tramway de 8 km de long sur les boulevards des Maréchaux (ci-après : Maréchaux) dans le sud de la commune. Les tramways sont à la mode. En avoir un est perçu comme un symbole de « modernité » et comme une contribution à la lutte contre le réchauffement de la planète. Le désir de tramway à Paris était généralisé chez les politiciens. Celui qui nous occupe a été décidé par M. Tibéri, le maire précédent classé à droite, et réalisé par M. Delanoë, le maire actuel classé à gauche (en principe cette rare unanimité devrait protéger l'analyste critique du reproche d'être partisan). Comme il est normal, la

¹ Respectivement professeur (émérite) à l'Université Paris XII, doctorant à l'Université Paris XII, et professeur à l'Université Paris I

municipalité a présenté le tramway comme un grand succès. Les médias, comme il est peut-être moins normal, ont repris intégralement les communiqués de presse de la mairie et chanté la louange du projet sans la moindre note discordante. L'opinion publique (y compris l'opinion de la grande majorité qui n'a ni vu ni pris le tramway) a été conquise. La chose est entendue, le tramway de Paris est un grand succès. Circulez (si l'on ose dire), il n'y a rien à voir.

En réalité, comme le bon sens le suggère, le tramway a des bénéfices et des coûts. Il est donc légitime de chercher à identifier, et surtout à mesurer, ces bénéfices et ses coûts afin de produire une évaluation mieux informée et plus nuancée. C'est l'objet de la recherche présentée ici². On présentera d'abord les caractéristiques du projet, avant d'examiner les changements dans la structure des déplacements qu'il a entraînés, et de quantifier les gains et les pertes associés au projet. La première qualité d'une évaluation est la transparence et la répliquabilité. On s'est donc efforcé d'indiquer précisément (au risque de parfois lasser le lecteur) les méthodologies suivies, les valeurs des paramètres utilisées, les calculs effectués, afin de permettre à ceux qui souhaiteraient refaire les calculs et formuler des critiques précises.

La scène et le contenu du projet

Pour ceux qui ne sont pas familiers avec la géographie de Paris, il n'est pas inutile de décrire la scène. L'agglomération parisienne qui comprend près de 11 millions d'habitants se compose d'environ 1.200 communes. La plus centrale et la plus importante, la commune de Paris, comprend environ 2 millions d'habitants. Elle est ceinturée par deux voies routières à peu près parallèles d'une longueur d'environ 35 km : les boulevards des Maréchaux, qui datent du début du 20^{ème} siècle et sont généralement bordés d'immeubles ; le périphérique parisien, qui date des années 1960. Ces deux voies routières sont distantes d'environ 300 mètres. L'agglomération parisienne est un tout intégré, et les échanges entre ses différentes parties –en particulier entre la commune de Paris et le reste– sont intenses. Selon l'Enquête Générale de Transport (EGT) de 2001, les déplacements Paris-Paris sont moins importants que les déplacements banlieue-Paris. Les déplacements Paris-Paris constituent 45 % du total des déplacements en transport en commun ayant Paris pour origine ou destination. Le

² Cette recherche n'a bénéficié d'aucun financement

pourcentage est de 34 % pour les déplacements en voiture; mais ce dernier chiffre ne prend pas en compte les déplacements des véhicules utilitaires (majoritairement banlieue-Paris) ni les déplacements banlieue-banlieue qui passent par Paris.

Le tramway a été construit sur les boulevards des maréchaux entre la porte d'Ivry (13^{ème} arrondissement) et le pont de Garigliano (15^{ème}). Cette portion de 8 km correspond à peu près au quart de la longueur des boulevards des Maréchaux. Elle constitue ce que nous appellerons l'axe Ivry-Garigliano. Les déplacements sur cet axe sont assez différents les uns des autres. La plupart sont des portions de déplacements bien plus longs, dont l'origine et/ou la destination sont en dehors de la zone de l'axe. Mais d'autres sont des déplacements de proximité d'un point de l'axe à un autre point de l'axe. Cet axe, bien desservi par l'automobile et le camion, était assez mal desservi par les transports en commun. Il ne correspond à aucune ligne de métro spécifique, même si des combinaisons de lignes radiales permettent d'aller d'un point de l'axe à un autre. Il correspondait au contraire à une ligne d'autobus, la « Petite ceinture », qui parcourait l'ensemble des Maréchaux, et qui était la ligne d'autobus la plus fréquentée de Paris.

Le projet de tramway a trois composantes. La première est la suppression (entre Ivry et Garigliano) de la ligne d'autobus « Petite Ceinture ». La seconde est la construction d'un tramway moderne plus beau, plus rapide, plus confortable, plus spacieux³ que la ligne d'autobus qu'il remplace, et qui bénéficie d'une mise en site propre et d'une priorité vis-à-vis des autres modes de transport. La troisième composante est la réduction de l'espace viaire réservé aux automobiles et aux camions sur les Maréchaux (entre Ivry et Garigliano).

Cette réduction est importante : environ le tiers. Elle est pour partie la conséquence directe de la mise en œuvre du tramway, et pour partie la conséquence de la volonté affichée de la municipalité de réduire l'espace viaire. Il est difficile de savoir l'importance relative de ces deux causes. Il n'est ni possible ni utile de décomposer le projet et ses effets entre ses différentes composantes. On le prendra ici comme un tout.

³ 300 places dont 120 debout dans une rame de tramway contre 155 dont 114 debout dans un autobus de la ligne Petite Ceinture.

Les changements dans la structure des déplacements

Le projet évalué a entraîné des changements importants dans la structure des déplacements dans l'axe Ivry-Garigliano. Trois sources permettent de mesurer ces changements

La première est constituée par les comptages de véhicules sur les Maréchaux. L'Observatoire des déplacements de la municipalité dispose du trafic journalier pour 2003 et 2007, pour 11 tronçons dont on connaît la longueur et qui font au total 4,5 km. On peut transformer ces données en véhicules*km, et extrapoler au 7,9 km de l'axe considéré. L'année 2003 est choisie comme année « avant » le projet, de préférence à l'année 2006, à cause des travaux de construction du projet qui battaient leur plein en 2005 et 2006. On voit qu'entre 2003 (avant le projet) et 2007 (après) le nombre de véhicules*km passe de 152.800 à 89.500. Il y a donc une diminution de 63.300 véhicules*km, soit une diminution de 41 %. On peut traduire ces chiffres en termes de voyageurs*km, en les multipliant par le taux d'occupation des véhicules, 1,3. On obtient 198 000 voyageurs*km par jour en automobiles avant le projet et 116 000 après (-82 000 voyageurs*km).

La deuxième source est constituée par une enquête *ad hoc* que nous avons effectuée en avril-mai 2007 auprès de 1 000 usagers du tramway⁴. Pour assurer une sélection aléatoire des usagers, les enquêteurs se sont rendus à des stations de tramway, ont laissé partir un tramway, et interrogé les deux premiers usagers qui se sont présentés pour attendre le tramway suivant, les stations et les horaires étant choisis d'une façon représentative de l'utilisation. D'une façon générale, les usagers se disent très satisfaits du tramway. Les deux réponses les plus intéressantes pour notre analyse ont porté sur la longueur des déplacements en tramway : 2,56 km en moyenne, soit un tiers de la longueur totale parcourue par le tramway ; et surtout sur ce que ces usagers faisaient avant l'introduction du tramway.

⁴ Une présentation détaillée de cette enquête est disponible sur le site de Pierre Kopp (www.pierrekokopp.com)

Tableau 1 – Provenance modale des usagers du tramway

	%	voyageurs*km/j
Provenant :		
du métro	50,0	144 000
de l'autobus	33,5	96 000
de la voiture	2,6	7 000
du vélo	0,7	2 000
des 2-roues	0,5	1 000
à pied		-
mixte	12,8	-
Total	100,0	256 000

Source : Enquête des auteurs. Les réponses « mixtes » comprennent les usagers qui effectuaient auparavant le déplacement à l'aide de plusieurs moyens de transport.

Le tableau 1 présente les réponses à la question : avant le tramway, comment faisiez-vous ce déplacement ? Il apparaît que la majorité des usagers proviennent de l'autobus (50 %), ce qui n'est pas surprenant. Plus étonnant peut-être est l'importance des anciens usagers du métro (33,5 %). On voit enfin que le tram a attiré très peu d'usagers en provenance de la voiture (2,6 %). Le tramway n'a engendré qu'un très faible transfert modal⁵. Les autres mouvements sont pratiquement négligeables.

La troisième source est constituée par les mesures effectués sur le périphérique. Pour chaque tronçon de 500 m de longueur et chaque période de 6 minutes (16.800 tronçons-périodes par jour), on dispose de la vitesse, du flux et de la densité du trafic pour 2003 et 2006.

Ces données permettent de mettre en évidence les changements intervenus du fait du tramway.

Un certain nombre d'utilisateurs se servaient du métro pour leurs déplacements sur l'axe Ivry-Garigliano et y faisaient un nombre M (inconnu de nous, mais que nous n'avons pas besoin de connaître). Un peu moins de 40 000 d'entre eux ont abandonné le métro pour le tramway, où ils effectuent près de 100 000 voyageurs*km par jour. D'un côté, ces voyageurs ont amélioré leur situation (sinon, ils n'auraient pas changé). D'un autre, ils décongestionnent le métro.

Les quelque 56 000 utilisateurs qui se servaient du bus utilisent maintenant le tramway, où ils font 144 000 voyageur*km. Comme on le verra, leur situation s'est

⁵ Le nombre des déplacements en voiture qui ont Paris pour origine et/ou pour destination s'élève, en 2001, selon l'Enquête Générale de Transport, à 2,3 millions, non compris les déplacements de véhicules utilitaires (non enregistrés dans l'EGT). Le transfert modal induit par le tramway correspond donc à une réduction de moins de 1 pour mille des déplacements « parisiens » en voiture.

également améliorée. Ils retrouvent dans le tramway les 40 000 utilisateurs qui préféraient auparavant le métro faisant 100 000 voyageurs*km). Et les quelque 2.700 personnes (faisant 7 000 voyageurs*km) qui ont abandonné la voiture pour le tramway ainsi que les quelque 1 000 personnes qui utilisaient autrefois le vélo ou les deux-roues. Ces 100 000 utilisateurs du tramway ont tous gagné quelque chose au projet.

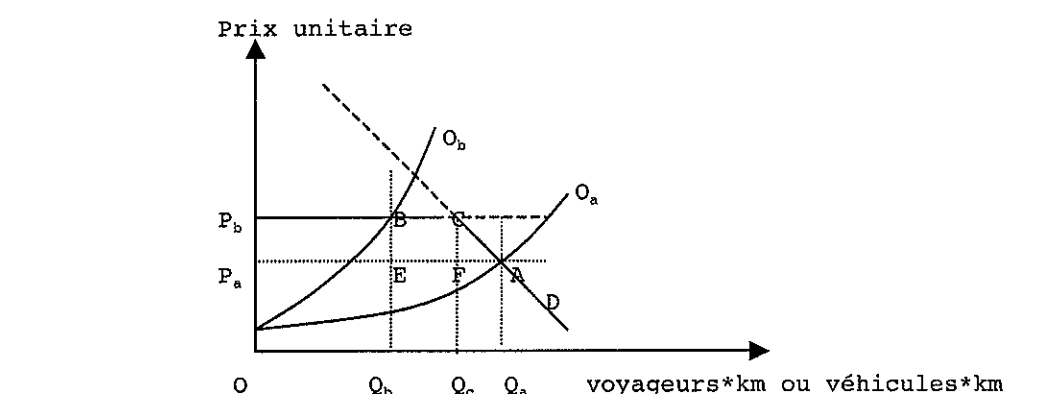
Qu'en est-il des Franciliens qui utilisaient voitures ou camions sur les boulevards des Maréchaux de l'axe Ivry-Garigliano ? On sait qu'ils y faisaient 198 000 voyageurs*km. Un petit nombre de ces voyageurs*km, environ 7 000, se retrouvent dans le tramway. Un peu plus de la moitié, 116 000 continuent d'être effectués sur les boulevards des Maréchaux. Ils le sont dans de moins bonnes conditions qu'avant le tramway, sinon leur nombre n'aurait pas diminué de 40 %. D'autres voyageurs*km ont été éliminés par l'évolution dans la période considérée des conditions de circulation à Paris, en particulier par la hausse du prix des carburants et le rétrécissement de nombreuses voies dans Paris. Le recul de la circulation dans Paris entre 2003 et 2007, évalué à 5 % par l'Observatoire des déplacements de la municipalité, donne une mesure de l'impact de cette évolution générale. En l'absence du projet, le trafic sur les boulevards des maréchaux aurait donc diminué de 10 000 voyageurs*km. On a ainsi $198\ 000 - 7\ 000 - 116\ 000 - 10\ 000 = 65\ 000$. Restent donc 65 000 voyageurs*km qui manquent à l'appel.

Une partie des déplacements correspondant à ces 65 000 voyageurs*km a sans doute été éliminée, engendrant un recul de la mobilité. Pour une autre partie ces déplacements sont effectués sur d'autres voies que les boulevards des Maréchaux. Le candidat évident est le boulevard périphérique. D'autres candidats sont les rues de Paris plus ou moins parallèle aux boulevards des maréchaux. Dans les deux cas, ce changement augmente la congestion sur ces voies alternatives, infligeant une externalité de congestion aux utilisateurs de ces voies. On fera l'hypothèse que le niveau de congestion sur ces deux types de voies est comparable (il est égalisé à la marge par le comportement des automobilistes), et donc que l'on peut pour les besoins de l'analyse considérer que ces « reports spatiaux » s'effectuent maintenant sur le périphérique.

La Figure 1 aide à comprendre et à estimer ces changements. La courbe de demande de déplacements automobiles sur les boulevards des Maréchaux est la ligne coudée P_bCA . La droite P_bC est le prix unitaire du

déplacement alternatif par le périphérique, et le point C correspond à une utilisation Q_c du système. Il n'y a aucune raison pour qu'un utilisateur des Maréchaux paye plus que le prix du trajet alternatif sur le périphérique. Par ailleurs, la courbe O_a décrit (classiquement) le phénomène de congestion sur les Maréchaux. Lorsque le nombre d'utilisateurs augmente, la congestion s'accroît, la vitesse diminue, et le coût d'utilisation augmente. L'intersection de O_a et de D au point A définit la situation d'équilibre avant le projet, avec le prix P_a et la quantité Q_a . Que fait le projet en rétrécissant l'espace viaire des boulevards des Maréchaux ? Il déplace la courbe d'offre O_a en O_b . Pour un même niveau d'utilisation, il y a davantage de congestion, et un prix plus élevé. L'intersection de O_b et de la courbe de demande P_bCD définit le nouvel équilibre, en B, avec le prix P_b et la quantité Q_b . On a donc Q_b voyageurs qui continuent d'utiliser le Maréchaux, $BC=EF=Q_cQ_b$ voyageurs qui utilisent maintenant le périphérique, et $FA=Q_aQ_c$ voyageurs qui ont renoncé à se déplacer et réduit leur mobilité, au moins sur l'axe Ivry-Garigliano.

Figure 1 – Comportement des automobilistes utilisateurs des boulevards des Maréchaux, avant et après le projet, avec le périphérique comme trajet alternatif



Pour estimer l'allocation des 65 000 voyageurs*km éliminés des Maréchaux entre BC (report vers le périphérique) et FA (recul de la mobilité), on dispose de deux approches bien différentes.

Observation du trafic du périphérique - La première consiste à comparer l'évolution du trafic sur le périphérique entre 2003 et 2006 dans l'ensemble du périphérique et dans sa partie Ivry-Gargliano. Le trafic du périphérique en général a augmenté de 1,45 % ; celui de la partie Ivry Garigliano de 4,05 %. La différence entre la hausse effectivement enregistrée sur cette partie et celle qui correspondrait à une hausse moyenne s'élève à

38.500 véhicules*km par jour, soit 50 000 voyageurs*km par jour. On a là une mesure de BC, le report sur le périphérique, et par voie de conséquence de CD, le recul de la mobilité (15 000 voyageurs*km).

Calcul à partir de l'élasticité de la demande - La seconde approche consiste à estimer directement FA au moyen de l'élasticité présumée (e) de la courbe de demande D. On a en effet $e = (\Delta Q/Q) / (\Delta P/P)$, soit $\Delta Q = e * Q * \Delta P / P$, avec, ici lorsque l'on considère le passage de A à C, $\Delta Q = FA$, $Q = Q_a$, $P = P_a$, $DP = P_a P_b$. Il est préférable de conduire l'analyse en termes de véhicules*km, et de revenir ensuite à des chiffres en voyageurs*km (au moyen d'une multiplication par 1,3)

On connaît Q_a (139.200 véhicules*km/jour). On peut calculer P_a en postulant une vitesse de 20 km/h sur les Maréchaux avant le tramway : on obtient 0,783 €/véhicule/km, qui est essentiellement un coût en temps. On peut également estimer $P_a P_b$, la différence entre le coût sur le périphérique et le coût sur les Maréchaux avant le projet, ou si l'on préfère la perte de bien-être qui résulte du changement d'itinéraire entraîné par le projet de tramway. On sait que cette perte est bien réelle: sinon, tout le monde aurait utilisé le périphérique. Il est logique de penser que ce surcoût est égal au surcoût engendré par le détour qu'engendre l'usage du périphérique, que l'on peut estimer au moyen de plusieurs hypothèses. La première est que la longueur moyenne des trajets sur les boulevards des Maréchaux est la moitié de la longueur du tramway, soit 4 km. La seconde est que le changement d'itinéraire rallonge le déplacement de 2 fois 400 mètres (300 mètres est la distance à vol d'oiseau qui sépare les deux voies), soit 800 mètres. La troisième est que cette distance est parcourue à une vitesse moyenne de 20 km/h. On calcule alors que le surcoût au véhicule*km est de 0,6 minute, soit 0,133 €/véhicule*km. C'est la valeur de $P_a P_b$.

Pour l'élasticité de la demande par rapport au prix, on partira de Litman (2007), qui propose des élasticités de l'utilisation des routes comprises entre -0,8 et -0,6. Ces élasticités ont été calculées pour des trajets entiers et ne sauraient convenir à l'analyse de nos déplacements sur les Maréchaux qui constituent bien souvent une sous-partie d'un déplacement bien plus long (environ deux ou trois fois plus long), la demande sur cette section est par conséquent plus inélastique. Il convient donc de prendre une élasticité (environ deux ou trois fois) inférieure en valeur absolue. Nous avons fait le calcul pour des élasticités comprises entre -0,4 et -0,2.

La mise en œuvre de cette approche conduit à estimer le nombre des découragés ou si l'on préfère le recul de la mobilité entre 4.730 et 9.460 véhicules/jour, ce qui fait entre 6.150 et 12.300 voyageurs*km.

Nos deux approches, bien que très différentes, aboutissent donc à des résultats très voisins, ce qui est rassurant. Nous allons considérer par la suite un recul de la mobilité (FA) de 10 000 voyageurs*km et un report viaire Maréchaux/périphérique (BC) de 55 000 voyageurs*km.

Tableau 2 – Déplacements de personnes sur l'axe Ivry-Garigliano, par mode avant et après le tramway

	Avant (2003) (voy*km/j)	Après (2007) (voy*km/j)	Différence (voy*km/j)	Conséquences
Transports en commun				
Metro	M	M-97 000		Décongestion
Bus & tramway	144 000	256 000		Δ surplus
Total TC	M+144 000	M+161 000	+7 000	
Voitures et camions				
LMaréchaux	198 000	116 000		Δ surplus
Bld périphérique	P	P+55 000		Congestion
Total voitures	P+198 000	P+171 000	-27 000	
Total général	P+M+352 000	P+M+332 000	-20 000	

Note : Pour retrouver les 198 000 voyageurs*km de 2003, il faut, aux 116 000 voyageurs*km qui continuent d'utiliser les Maréchaux et aux 55 000 voyageurs*km qui se sont reportés sur le périphérique, ajouter les 7 000 voyageurs*km qui utilisent le tramway, les 10 000 voyageurs*km qui ont été éliminés par la politique générale de circulation parisienne, et les 10 000 voyageurs*km qui ont été éliminés par le tramway.

Le tableau 2 synthétise les changements induits par le tramway. On voit qu'il a entraîné (i) d'importants transferts intra-modaux (à l'intérieur du mode transport collectif, du bus et du métro vers le tramway), (ii) pratiquement pas de transfert modal (de la voiture vers les transports collectifs), et (iii) d'importants transferts viaires pour les voitures (des boulevards des Maréchaux vers le boulevard périphérique). L'augmentation de l'offre de transports collectifs n'a pratiquement pas entraîné d'augmentation de la fréquentation des transports collectifs. Au total la mobilité sur l'axe a enregistré une diminution d'un peu moins de 6 %.

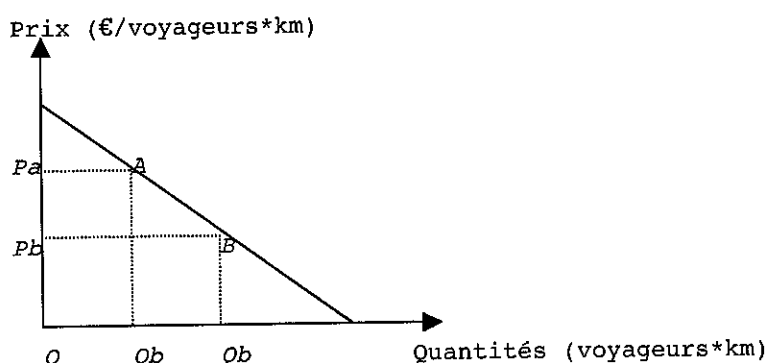
On peut maintenant estimer les différents gains et coûts associés à ces changements.

Variation du surplus des utilisateurs du tramway

Commençons par le plus évident de ces gains et coûts: le gain des utilisateurs du tramway, ou plus exactement des usagers des transports en commun. Il est représenté

par la figure 2. La droite AB^6 est la droite de demande de transport en commun sur l'axe Ivry-Garigliano ; cette demande est d'autant plus importante que le prix est bas. La situation avant le tramway est indiquée par le point A. On a vu que l'abscisse de A, Q_a , était égale à 144 000 voyageurs*km. Le prix unitaire en A est P_a que l'on n'a pas besoin de connaître. La situation après le tramway est indiquée par le point B. On a vu que l'abscisse de B, Q_b , était égale à 256 000 voyageurs*km. Le prix en B est P_b . Dire que le tramway est mieux que le bus revient à dire que $P_b < P_a$. De combien ? L'amélioration de l'offre, c'est-à-dire la substitution du tramway à l'autobus, a deux avantages : elle engendre des gains de temps et des gains de confort.

Figure 2 – Surplus des usagers des transports en commun



On peut assez exactement calculer la variation de surplus engendrée par les gains de temps. La vitesse est passée de 16 km/h (en bus) à 20 km/h (en tramway)⁷, soit un gain de temps de 0,633 minutes/voyageur*km. D'un autre côté le temps d'attente a augmenté, puisqu'il passe de 3,5 minutes (en bus) à 4 minutes en tramway, ce qui pour un trajet de 2,56 km correspond à une perte de temps de 0,195 minutes. Au total, le coût en temps diminue de 0,438 minutes par voyageur*km. La valeur du temps pour les transports urbains en Ile-de-France est fixée à 9,3 €/heure pour l'année 2000 dans l'Instruction-cadre du ministère de l'Équipement datée du 25 mars 2004. Ce même texte officiel recommande d'augmenter cette valeur en fonction de la dépense de consommation affectée d'un coefficient 0,7. Pour 2007, en supposant une augmentation de consommation de 2 % par an, on obtient ainsi une valeur

⁶ On a donné en italiques les lettres utilisées afin d'éviter tout risque de confusion avec les lettres utilisées dans le graphique 1.

⁷ 20 km/h était l'objectif visé ; il n'est pas certain qu'il soit toujours atteint ; on gardera pourtant ce chiffre, au risque d'une surestimation des gains de temps.

du temps de 10,2€/heure, valeur que nous retiendrons ici. Le coût en temps diminue donc de $0,438 \times 10,2/60$, soit 0,0745€ par voyageur*km. On a donc $P_b P_a = 0,0745$ €. On a vu que $Q_a = 144\ 000$ et $Q_b = 256\ 000$. L'aire $P_a A B P_b$, qui donne l'augmentation du surplus des utilisateurs, est égale à 14.900 €/jour. En comptant 300 jours par an, on obtient **4,47 M € par an.**

Il est beaucoup plus difficile d'estimer le gain dû à l'augmentation de confort des usagers des transports en commun. Il faudrait pour cela disposer de complexes et coûteuses évaluations contingentes de la disponibilité à payer pour le confort accru (ou l'inconfort réduit). On ne peut pas pour autant négliger ce gain. On fera l'hypothèse qu'il est du même ordre de grandeur que le gain de temps, tout en notant le caractère très fragile de cette hypothèse. On retiendra donc à ce titre un gain de **4,47 M € par an.**

La variation du surplus des automobilistes

La variation du surplus des automobilistes, ou plus exactement des automobilistes qui utilisaient les boulevards des Maréchaux (les autres ne sont affectés par le projet que par l'augmentation de congestion qu'il entraîne, estimée ci-dessous) est facile à calculer. Elle est égale à la perte de temps des automobilistes qui restent sur les Maréchaux mais qui y roulent moins vite (l'aire $P_b B E P_a$ de la figure 1), augmentée de la perte de temps des automobilistes qui font le détour par les périphérique (l'aire BCFE), augmentée de la perte de bien être des automobilistes qui ont été éliminés par le tramway (l'aire du triangle CAF). Elle est donc égale à $0,102 \times (171 + 181) / 2 \times 300$ (jours par an) soit 5,38 M € par an. Ce coût se répartit entre les automobilistes qui restent sur les Maréchaux à hauteur de 3,55 M €, ceux qui se reportent sur le périphérique à hauteur de 1,68 M €, et à hauteur de 0,15 M € pour ceux qui ont été éliminés.

Cette estimation ignore le fait qu'une partie, estimée à 20 %, des véhicules sont des véhicules utilitaires, et que la valeur du temps des véhicules utilitaires est bien plus élevée que celle des voitures. Selon la très officielle Instruction-cadre du 25 mars 2004, la valeur du temps des véhicules de transport de marchandises est 31,4 € par heure (au lieu de 10,2 €/heure pour les voyageurs). Un calcul simple montre qu'il convient d'augmenter le chiffre calculé sur la base de la valeur du temps des voyageurs de 27,3 %, c'est-à-dire appliquer un coefficient multiplicateur de 1,273, afin de

prendre en compte ce phénomène. Le véritable coût n'est donc pas 5,38 M € mais bien 6,85 M € par an.

L'externalité de congestion du périphérique

Le périphérique parisien est une voie encombrée. Chaque véhicule supplémentaire ajouté au flux de véhicules ralentit ce flux et donc tous les véhicules qui circulent, causant ainsi un coût économique. Ce coût est un coût marginal de congestion. On a vu que l'une des conséquences du projet de tramway est d'augmenter le trafic du périphérique de 55 000 voyageurs*km par jour, c'est-à-dire de 42.300 véhicules*km par jour. Il suffit donc de multiplier le coût marginal sur le périphérique par 42.300 pour avoir l'externalité de congestion du périphérique.

L'estimation la plus utilisée provient d'INFRAS (2000). Elle a été souvent reprise par la Commission Européenne, et par des organismes français comme par exemple l'Institut Français de l'Environnement (2004, p. 94). Elle estime les coûts marginaux de congestion en ville à 2,70 €/véhicule*km en cas de trafic dense et 3,10 €/véhicule*km en cas de congestion. Le périphérique est au moins un cas de « trafic dense ». Si on applique cette estimation aux 42 300 véhicules*km supplémentaires, on obtient un coût externe du tramway de 114 210 €/jour, c'est-à-dire de 45,06 millions d'euros par an. Cette estimation, financée par l'Union Internationale des Chemins de Fer, est cependant peut-être un peu exagérée. Elle a de plus le gros inconvénient d'être agrégée et d'utiliser un coût marginal unique alors que celui-ci varie, dans des proportions considérables, en fonction du trafic.

Relation vitesse-densité sur le périphérique - Nous préférons nous appuyer sur nos propres calculs, en appliquant la méthode utilisée par Prud'homme et Sun (2000) pour l'ensemble du périphérique en 1996. Nous disposons pour 2006 d'environ 120 000 ensembles de données relatives au flux, à la vitesse et à la densité du trafic sur la portion Ivry-Garigliano du périphérique. Une régression simple permet d'obtenir l'équation de la vitesse (v) en fonction de la densité (q). On obtient :

$$v = \alpha + \beta * q = 77,1 - 0,25 * q \quad (R^2=0,79) \\ (0,0004) \quad (0,05)$$

Coût marginal de congestion - Connaissant le coût monétaire au véhicule*km (0,12€), la valeur du temps (10,2€/h et par personne), et le taux d'occupation des

véhicules (1,3), on en déduit le coût $I(q)$ en fonction de la densité :

$$I(q) = 0,12 + 10,2 * 1,3 / v.$$

Le coût marginal de congestion (CM) est égal à la dérivée de $I(q)$ multipliée par le nombre de véhicules affectés, c'est-à-dire par la densité :

$$CM = 3,315 * q / (77,1 - 0,25 * q)^2$$

Ce coût marginal de congestion varie considérablement en fonction de la densité q et de la vitesse qui lui est associée. Très faible et presque négligeable (0,1 €/veh*km) lorsque la vitesse de la circulation est supérieure à 50 km/h, il devient très élevé pour des vitesses faibles (16 € pour une vitesse de 7,5 km/h).

Nos données nous permettent aussi de connaître la distribution du trafic sur le périphérique par plages de vitesse. En faisant l'hypothèse que les 42 300 véh*km supplémentaires se répartissent aujourd'hui comme ceux qui fréquentaient normalement le boulevard périphérique en 2006, nous pouvons calculer le coût marginal de congestion pour chacune des classes de vitesse comprise entre 2,5 km/h et 75 km/h. Il suffit de multiplier le coût marginal de la classe par le nombre de véhicules*km supplémentaires de la classe. En additionnant, on obtient le coût de congestion supplémentaire causé par les véhicules que le tramway a rejeté sur le périphérique. On trouvera en Annexe A le détail des calculs. Cette externalité du tramway s'élève à 26,23 M € par an.

Il faut ici aussi prendre en compte le fait que 20 % des véhicules considérés ici sont des véhicules utilitaires dont la valeur du temps est presque le triple de celle des automobilistes, et donc multiplier le chiffre de 26,23 par le coefficient 1,27. On obtient alors un coût marginal de congestion de **33,31 € par an**. Le surcroît de congestion du boulevard périphérique engendré par le tramway (et surtout les rétrécissements de voirie qui l'ont accompagné) est donc très coûteux en temps pour la société. Comme il s'agit de la conséquence la plus importante du tramway, et qu'elle dépend de l'importance du transfert viaire estimé, nous mènerons plus loin une étude de sensibilité pour tester l'influence de ce report viaire.

Le ralentissement des véhicules entrant dans Paris

Un certain nombre de radiales utilisées par les automobilistes de banlieue (ou de Paris) pour entrer dans Paris et pour en sortir sont perpendiculaires aux boulevards des Maréchaux, et donc à la ligne de tramway. Ces intersections sont réglées par des feux de signalisation. A la différence des autobus Petite Ceinture qu'il remplace, le tramway jouit d'une priorité à ces feux de signalisation. Cette priorité a pour effet de ralentir un certain nombre des véhicules entrant dans ou sortant de Paris.

On en connaît à peu près le nombre. Selon l'EGT 2001, le nombre des voyageurs en voiture Paris <—> banlieue s'élève en 2001 à 1,63 millions par jour. La ligne de tramway faisant à peu près le quart de la circonférence, on peut estimer que le quart de ces voyageurs, soit 407 000 par jour, est concerné.

On connaît moins bien l'attente moyenne imposée par le tramway à ces voyageurs. Estimons-le à 20 secondes ($=1/180$ d'heure). Comme la fréquence du tramway est de 3,5 minutes, soit 210 secondes, on peut dire que la probabilité d'être ainsi arrêté est d'environ $1/10$. Mais il nous faut aussi doubler ce chiffre si on veut tenir compte du fait que le tramway circule dans les deux sens. Le ralentissement concernerait donc 81.400 voyageurs par jour, sans compter les véhicules utilitaires. Avec les paramètres habituels, on calcule que la perte ainsi entraînée est de 1,83 M € par an.

L'externalité de décongestion du métro

Le tramway a entraîné un transfert intra-modal de 96 000 voyageurs*km du métro vers le tramway. Il a pu diminuer la congestion dans le métro, ce qui constituerait un gain du projet. Ce gain est malheureusement très difficile à estimer. Alors qu'il existe des centaines de milliers d'études sur la congestion automobile, il n'existe pratiquement rien (rien de publié du moins) sur la congestion dans les transports en commun qui entraîne une perte de confort en tout point comparable à la perte de temps entraînée par la congestion des routes. Les travaux d'Armelius (2006) et de Litman (2007) sont de rares exceptions. On ne dispose donc pas de fonction représentant le coût de la congestion dans les transports publics en fonction de leur utilisation. D'autre part, le rapport de ce transfert au total des voyageurs*km du métro (0,4 %) ou au total des places offertes (0,1 %) n'est pas très significatif, puisque ce transfert est concentré sur

une petite partie du réseau, dont on ne sait pas si elle était congestionnée ou non.

On tentera cependant –sans nourrir trop d'illusion sur la solidité du résultat– une estimation en s'appuyant sur Litman (2007, p. 11), qui propose une élasticité du coût en temps par rapport à la fréquentation égale à 0,4 (lorsque la fréquentation augmente de 10 %, le confort, mesuré en coût en temps, diminue de 4 %). La diminution de 0,4 % de la fréquentation du métro engendre une augmentation de confort égale à 0,16 % de la valeur du temps passé dans le métro. Sachant que le temps passé dans le métro est d'environ 280 M d'heures par an, la diminution de 0,4 % de la fréquentation du métro engendre ainsi une augmentation de confort égale à la valeur de 0,448 M d'heures, c'est-à-dire (à 10,2 €/h) égale à 4,57 M € **par an**. Comme on l'a dit, ce chiffre est à prendre avec précaution. Mais il n'est pas implausible. Il se trouve être du même ordre de grandeur que les gains de temps et aussi que les gains de confort des usagers du tramway.

L'impact sur les rejets de CO2

Le projet a cinq impacts sur les rejets de CO2. Deux sont positifs, et proviennent du remplacement des autobus par le tramway, et du (très modeste) transfert modal et économie de fait du CO2. Deux autres sont négatifs et proviennent des allongements de parcours et des réductions de vitesse des véhicules automobiles qui continuent de rouler. Le dernier, engendré par le recul de la mobilité sur l'axe considéré, est indéterminé. Il faut essayer de les mesurer. Auparavant, il faut s'interroger sur le lien entre vitesse et rejets de CO2.

Fonction rejets-vitesse - On sait que la consommation de carburant au km est une fonction de la vitesse. Elle est infinie lorsque la vitesse est nulle. Elle diminue régulièrement lorsque la vitesse augmente, jusqu'à 40-50 km/h. Elle stagne ensuite entre 40-50 km/h et 90-100 km/h, puis augmente avec la vitesse au delà de 90-100 km/h. Le graphique ci-après, qui provient du site du ministère de l'Energie des Etats-Unis, le montre clairement.

Ce graphique suggère que la fonction qui relie la consommation de carburant, et partant, les rejets de CO2, en fonction de la vitesse (v), est linéaire jusqu'à une vitesse de 50 km/h : $CO_2 = \lambda + \delta \cdot v$, puis constante au delà de 50 km/h. Il est facile d'en déterminer l'équation en considérant le point où la courbe coupe l'axe des

ordonnées⁸ et le point qui correspond à la vitesse de 30 miles/h⁹. On en déduit l'équation qui relie la consommation à la vitesse, et en multipliant par les rejets de CO₂ associés à 1 litre de carburant (2,35 kg)¹⁰ :

$$\begin{aligned}\text{Pour } 0 < v < 50 \text{ km/h : } \text{CO}_2(\text{en kg/km}) &= 0,624 - 0,00925 * v \\ \text{Pour } v > 50 \text{ km/h : } \text{CO}_2(\text{en kg/km}) &= 0,16\end{aligned}$$

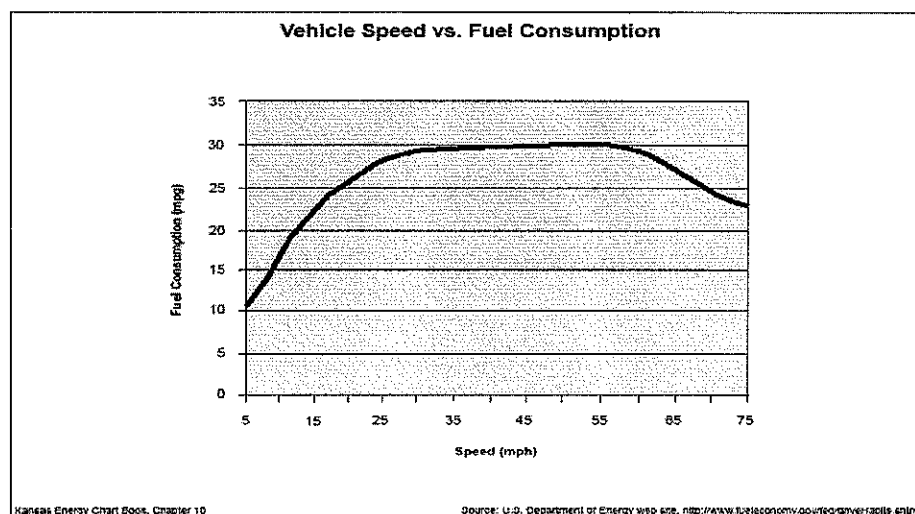
Cette fonction est relative à des voitures particulières. En réalité, dans la plupart des cas, le trafic comprend environ 20 % de véhicules utilitaires qui rejettent en moyenne environ deux fois plus de CO₂ que les voitures. Il conviendra dans ces cas de multiplier les rejets obtenus par un coefficient de 1,2.

⁸ (v = 5miles/h = 8,04km/h ; consommation de carburant = 10miles/gallon = 0,23litres/km)

⁹ (v = 48,27km/h ; consommation = 30miles/gallon = 0,078litres/km)

¹⁰ Nous n'avons pas trouvé d'équation semblable sur le cas de la France. Mais Renault nous a communiqué qu'en milieu urbain le passage d'une circulation de 10 km/h à 20 km/h entraînait une économie de carburant de 25%. Notre équation produit une économie de 17%, ce qui est assez proche.

Figure 3 - Consommation de carburant en fonction de la vitesse



Source : www.fueleconomy.gov/feg/drive-Habits.shtml

Note : la consommation est mesurée en miles per gallon, c'est-à-dire en km par litre, ce qui explique la forme inversée par rapport à un graphique en litres par km. Nous avons vainement cherché un graphique de ce type sur les sites des institutions françaises comme l'ADEME, le ministère des Finances (énergie), ou l'Institut Français du Pétrole

Remplacement des autobus — La fréquence du bus supprimé était à l'heure de pointe de 17 bus par heure. En comptant (généreusement) 18 heures de pointe, on avait 306 bus par jour, qui parcouraient ($306 \times 7,9 \text{ km} =$) 2.417 bus*km par jour. Selon les *Statistiques annuelles* de la RATP (p. 32), les bus consomment 0,567 litres de gazole par bus*km. Les bus de la portion de ligne supprimée consommaient donc 1.366 litres de gazole, et rejetaient ($1366 \times 2,6 \text{ kg/litre} =$) 3,55 tonnes de CO₂ par jour, soit 1 065 tonnes par an. Le tramway, qui fonctionne à l'électricité (nucléaire : il en irait bien autrement en Italie ou en Allemagne) économise donc ces rejets de CO₂.

Transfert modal — 7 000 voyageurs*km en moins font 5 380 véhicules*km en moins par jour. En postulant une vitesse de 20 km/h avant le tramway, c'est-à-dire un rejet de CO₂ de 0,439 kg/km, ces véhicules rejetaient 2,36 tonnes de CO₂ par jour, soit 709 tonnes par an. Le tramway, qui a attiré les utilisateurs de ces véhicules, entraîne donc une économie de rejets de CO₂ de ce montant.

Réduction de vitesse des véhicules restant - Le nombre des véhicules qui continuent d'utiliser les boulevards des Maréchaux sur l'axe Ivry-Garigliano a diminué de 36 %, mais il s'élève encore à 89.500 véhicules*km par jour. Comme on l'a vu, cette diminution provient d'une augmentation du coût en temps de l'utilisation de ces boulevards, c'est-à-dire d'une diminution de la vitesse (bornée par le coût du détour par le périphérique). On a estimé précédemment ce coût à 2,4 minutes. Avec une vitesse de 20 km/h, cette augmentation correspond à une réduction de la vitesse à 16,7 km/h, c'est-à-dire à une variation d'environ -17 %.

L'équation CO2 en fonction de la vitesse nous donne les rejets unitaires à 20 km/h (0,439 kg) et à 17 km/h (0,467 kg). Le produit de cette différence par le nombre de véhicules*km/jour (89.500) donne l'augmentation de CO2 par jour : 2,5 tonnes, soit 752 tonnes par an. Le trafic considéré inclut des véhicules utilitaires, et le chiffre obtenu doit de ce fait être multiplié par le coefficient 1,2. Il devient 902 tonnes par an.

Recul de la mobilité - On pourrait dire que les personnes qui subissent un recul de la mobilité sur l'axe considéré stoppent leur activité transport et ne consomment désormais plus d'essence. Cette économie quotidienne s'élèverait à 10 000 voyageurs*km, soit 7.692 veh*km. En reprenant les paramètres précédents, nous trouvons donc un gain annuel en CO2 de 720 tonnes. Mais en réalité, les déplacements éliminés sur l'axe Ivry-Garigliano sont sans doute dans beaucoup de cas remplacés par d'autres déplacements, souvent de banlieue à banlieue, qui sont sans doute aussi longs et peut-être même plus longs (c'est-à-dire aussi ou davantage émetteurs de CO2) que les déplacements initiaux. On ne comptera donc aucun gain ni aucune perte à ce titre.

Allongement des trajets des véhicules transférés sur le périphérique - Les véhicules transférés des boulevards des Maréchaux au boulevard périphérique font maintenant, comme on l'a vu ci-dessus, au moins 800 mètres de plus qu'auparavant. Certains font certainement bien plus. Ils consomment davantage de carburant et rejettent davantage de CO2. Ils concernent 42.300 véhicules*km par jour. En supposant des parcours moyens de 4 km, cela fait 10.575 déplacements de 0,8 km de plus, soit 8.460 véhicules*km de plus. Avec des rejets unitaires de 0,439 kg/km correspondant à une vitesse de 20 km/h, 300 jours par an et le coefficient de prise en considération des utilitaires de 1,2, on obtient une surémission de CO2 de 1.337 tonnes par an.

Vitesse réduite sur le périphérique - L'impact principal du projet de tramway sur les émissions de CO2 provient du ralentissement de la vitesse sur le périphérique engendrée par le transfert intra-modal de 42.300 véhicules*km par jour. Ces véhicules supplémentaires ralentissent en effet le flux de tous les véhicules utilisant le périphérique, augmentant ainsi leurs rejets (toutes choses égales par ailleurs). Le phénomène est tout simplement le versant rejets de CO2 de l'externalité de congestion étudiée précédemment. On peut calculer cette conséquence avec une assez bonne précision, classe de vitesse par classe de vitesse. On a :

$$\begin{aligned} \text{CO2} &= f(v) = \lambda + \mu*v \text{ (avec } \lambda = 0,624 \text{ et } \mu = -0,00925) \\ v &= g(q) = \alpha + \beta*q \text{ (avec } \alpha = 77,4 \text{ et } \beta = -0,25) \end{aligned}$$

D'où l'on tire :

$$\text{CO2} = h(q) = \lambda + \mu*\alpha + \mu*\beta*q$$

Le rejet marginal (CO2M), c'est-à-dire la quantité de CO2 supplémentaire causée par un véhicule ajouté à un flux de densité q , est la dérivée de cette fonction multipliée par q :

$$\text{CO2M} = h'(q)*q = \mu*\beta*q = 0,00231*q$$

Pour chaque classe de vitesse, et la densité associée, il est facile de calculer le rejet marginal de CO2. Il suffit alors de multiplier ce rejet marginal par le nombre de véhicules supplémentaires dans la classe de vitesse, et de sommer, pour avoir l'augmentation totale de rejets de CO2 engendrée par le report sur le périphérique. L'Annexe A présente les calculs effectués. La réduction de vitesse sur le périphérique fait apparaître une surémission de 8,4 tonnes de CO2 par jour, c'est-à-dire de 2 519 tonnes par an. Il convient d'appliquer à ce chiffre le coefficient de 1,2 pour prendre en compte les véhicules utilitaires. On obtient une augmentation des rejets de 3 022 tonnes de CO2 par an.

Tableau 3 - Impacts du tramway sur les rejets de CO2

	(en tonnes de CO2 par an)		
	Avant	Après	Variation
Suppression des autobus	1.065	Zéro	-1.065
Transfert modal	709	Zéro	-709
Diminution vitesse véhicules restant	11.787	12.538	+752
Allongement trajets	Zéro	1.114	+1.114
Diminution vitesse périphérique			+3.023
Total			+3.115
<i>Source : calculs des auteurs (voir explications au texte)</i>			

Le tableau 3 reprend ces différents impacts du tramway sur les rejets de CO2. Au total, et toutes choses égales par ailleurs, le tramway contribue à augmenter les rejets de CO2 de plus e 3 000 tonnes par an. Si on valorise le CO2 à 25 € la tonne, comme le prescrit l'Instruction-cadre officielle, on obtient au titre de l'effet de serre un coût de 78 000 € par jour, soit moins de **0,1 M € par an**, plutôt négligeable par rapport aux autres gains et coûts.

Coûts d'investissement et d'exploitation

Les informations publiées sur les coûts purement monétaires associés au projet sont bizarrement assez rares. On dispose seulement des coûts *ex ante* prévus dans la Déclaration d'Utilité Publique : **341,8 M €** pour l'investissement, **43,9 M €** pour le fonctionnement. L'expérience suggère que les coûts *ex post* sont sensiblement plus élevés. Supposons cependant que le tramway des Maréchaux a été une exception et que le coût effectif a été égal au coût prévu. S'agissant d'un investissement financé sur fonds budgétaires, il convient, dans le cadre d'une analyse coûts-bénéfices, de multiplier la dépense par le coût d'opportunité des fonds publics, officiellement fixé à 1,3. On a donc un investissement de **443,3 M €**.

Pour le fonctionnement, seule nous intéresse la différence entre le coût des autobus et celui du tramway. Le coût de fonctionnement des autobus n'est pas publié. Les *Statistiques Annuelles* de la RATP donnent bien un coût de fonctionnement moyen par voyage, qui est de 1,07 € par voyage. L'autobus supprimé assurait 55 000 voyages par jour, ce qui suggérerait un coût de fonctionnement de la ligne de 17,78 M € par an. Si l'on suivait ce calcul, le coût de fonctionnement du tramway serait 2,4 fois plus élevé que celui du bus qu'il remplace, et le surcoût annuel de 26 M €. Il faut cependant être prudent, car le coût de fonctionnement des autobus est certainement bien plus élevé que celui du métro, en sorte que le coût moyen

sous-estime à coup sûr le coût de fonctionnement des autobus. On considérera provisoirement que le coût de fonctionnement du tramway est comparable au coût de fonctionnement des autobus (en déplorant la rareté des informations disponibles sur ce sujet important, et en espérant que la publication de ce travail dénouera les langues et ouvrira les tiroirs).

Les paiements des usagers à l'exploitant ne sont guère affectés par l'introduction du tramway. La grande majorité des usagers payaient déjà la même somme auparavant. On a vu cependant que le tramway a attiré environ 3 850 nouveaux déplacements (en provenance de la voiture, du vélo ou des deux roues). S'ils payaient tous le tarif général de 1,09 €/voyage, cela augmenterait les recettes de la RATP de 1,26 M € par an. En réalité, beaucoup d'entre eux bénéficient sans doute de cartes d'abonnement et prennent le tramway à un prix marginal nul. On retiendra généreusement une recette supplémentaire induite par le tramway égale au deux-tiers de ces 1,26 M €, soit 0,84 M €.

Evaluation économique du tramway

Le tableau 5 présente les différents éléments de notre évaluation économique. Ils concernent les changements introduits par le projet, relativement à une situation de référence qui était la situation *ex ante* avec la ligne d'autobus PC et la situation de voirie antérieure. Certaines des estimations présentées sont plus fragiles que les autres. Trois en particulier sont très fragiles : l'estimation du gain de confort des usagers des transports en commun, l'estimation du gain de décongestion dans le métro, et la perte de temps des utilisateurs des véhicules entrant dans/sortant de Paris. Dans ces cas, l'état de la théorie économique et/ou les données disponibles ne permettent pas de produire des chiffres bien solides. On aurait pu ne pas donner ceux que l'on a essayé d'estimer. Mais il a semblé qu'une mauvaise estimation valait mieux que pas d'estimation du tout, s'agissant d'impacts dont la réalité n'est pas douteuse et qu'il est de toute façon important de présenter et d'analyser.

Tableau 4 - Gains et coûts induits par le tramway de Paris

	Initiaux (M €)	Annuels (M €)
Investissement	-444,34	
Fonctionnement		pm
Variation surplus opérateur		+0,84
Variation surplus usagers des TC :		
Gain de temps		+4,47
Gain de confort		+4,47
Gain de décongestion du métro		+4,57
Variation surplus usagers VP et VU		
Perte de temps usagers Maréchaux		-6,85
Perte de temps usagers entrant Paris		-1,83
Externalités		
Congestion accrue sur périphérique		-33,31
Rejets accrus de CO2		-0,10
Totaux	-444,34	-27,74

Sources et notes : calculs des auteurs. TC = transports en commun ; VP = voitures particulières ; VU = véhicules utilitaires ; CO2 = dioxyde de carbone.

Du point de vue socio-économique, le projet du tramway apparaît déplorable. Non seulement il a représenté un investissement important, mais il coûte chaque année plus qu'il ne rapporte.

On ne peut pas calculer un taux de rentabilité interne sociale du projet, puisqu'il n'existe aucun taux d'actualisation qui égaliserait la somme des flux actualisés. Redisons pour les non-spécialistes qu'il ne s'agit pas ici de flux financiers, mais bien de ressources sociales et environnementales. La VAN (valeur actualisée nette) du projet, avec le taux officiel de 4 %, sur 30 ans, s'établit à -888 M €. C'est une mesure de la perte de ressources entraînée par le projet.

Une autre façon, plus grossière mais peut-être plus parlante, de synthétiser ces données consiste à estimer le coût annuel de l'investissement, et à l'ajouter aux gains et coûts annuels de fonctionnement. Le coût annuel de l'investissement est égal au coût d'opportunité du capital investi augmenté de l'amortissement de ce capital. Avec un coût d'opportunité de 4 % et une durée d'amortissement de 30 ans, on obtient un coût annuel en capital de -59,24 M €. Ajouté aux gains et pertes annuels de -27,74 M €, on obtient un coût total du tramway de -87 M € par an.

Une bonne partie de cette perte provient du coût infligé aux automobilistes par le rétrécissement des boulevards des Maréchaux. On peut penser que ce rétrécissement n'était pas nécessairement imposé par le tramway, et que la perte exagère l'effet propre du tramway. Pour saisir cet effet, il suffit d'ignorer les

coûts relatifs à la perte de temps des usagers des Maréchaux et à la congestion accrue sur le périphérique (mais pas la perte de temps des usagers entrant dans Paris). On trouve alors, pour chaque année, non plus une perte de 28 millions d'euros, mais un gain de 12,5 millions d'euros. Il ne suffit malheureusement pas à couvrir l'investissement initial de 444 millions. Le TRI est négatif (-1 %), ainsi que la VAN, qui s'établit à -219 millions. En termes annuels, une perte nette de $(-59,24 + 12,50) = -46,70$ M €. Même si le tramway qui ne gênait pas les déplacements automobiles -hypothèse d'école- il ne serait pas justifié.

Conclusion

Cette recherche ne prétend pas être le dernier mot sur l'évaluation du projet de tramway parisien. Elle a souligné les lacunes théoriques et factuelles qui permettraient de progresser, et le cas échéant de corriger nos estimations. Mais elle apparaît suffisamment solide pour autoriser plusieurs conclusions.

Le tramway ouvert sur les boulevards des Maréchaux en décembre 2006 est un succès apparent. Il a capté la clientèle des usagers de l'autobus qu'il remplace, ainsi qu'une partie des usagers du métro. Ces usagers bénéficient du projet : ils se déplacent plus rapidement qu'avant, dans des conditions de confort plus grandes, et en prime la congestion du métro a diminué améliorant la situation d'un nombre bien plus grand d'usagers du métro. Ces bénéfices peuvent se mesurer ou s'estimer (difficilement il est vrai en ce qui concerne les deux derniers). Ils représentent, selon nos estimations, environ 15 millions d'euros par an.

En dépit de l'amélioration qu'il représente par rapport à la situation antérieure, le tramway n'a pratiquement pas entraîné de report modal. Seulement 2 ou 3 % des usagers du tramway sont d'anciens usagers de la voiture. Cette expérience grandeur nature montre une fois de plus les limites des « politiques de report modal ».

Cependant, le tramway a été accompagné d'un important rétrécissement de l'espace viaire des boulevards des Maréchaux. La question de savoir si ce rétrécissement était nécessairement entraîné par l'implantation du tramway peut être posée. Toujours est-il qu'il a eu lieu, qu'il est présenté comme faisant partie du même ensemble, et qu'il est traité ici comme tel. Ce rétrécissement a augmenté la congestion automobile sur les boulevards des Maréchaux, et réduit d'environ 40 % la circulation sur ces

boulevards. Les automobilistes évincés n'ont pas, on l'a vu, abandonné leur voiture pour le tramway. Où sont-ils donc passés ? Certains se sont découragés et ne se déplacent plus sur les Maréchaux. La plupart se sont reportés sur les voies parallèles aux boulevards des Maréchaux, et principalement sur le boulevard périphérique. C'est ici que le bât blesse. Ce faisant, ils ont utilisé des itinéraires plus longs, et perdu du temps par rapport à la situation antérieure. Les automobilistes qui sont restés sur les Maréchaux ont également perdu du temps, à peu près autant de temps que les autres (sinon ceux qui font des détours reviendraient sur ces boulevards). On a estimé à près de 7 millions d'euros la perte ainsi subie par ceux qui utilisaient voiture et véhicules utilitaires sur les boulevards des Maréchaux avant le projet de tramway, à quoi s'ajoute une perte apparemment peu élevée pour ceux qui rentrent dans Paris et qui sont retardés par la priorité donnée au tramway.

Mais le plus grave n'est pas là. Il est dans le fait que ces changements d'itinéraires ont augmenté la congestion sur le périphérique. Un véhicule de plus sur le périphérique ralentit tous les véhicules qui y circulent : il engendre un coût marginal de congestion. On s'est appuyé sur les données précises dont on dispose sur la circulation du périphérique pour estimer des coûts marginaux de congestion. Ils font apparaître une externalité de congestion de plus de 33 millions d'euros par an.

Le bilan est également, et pour les mêmes raisons, négatif en termes environnementaux, et particulièrement de rejets de CO₂ - contrairement aux objectifs visés. Certes, le remplacement des autobus par le tramway engendre une réduction de CO₂, que l'on mesure. Le minuscule report modal également. Mais les allongements des parcours et les réductions de vitesses des véhicules qui utilisaient auparavant les boulevards des Maréchaux, engendrent au contraire des augmentations de rejets de CO₂, que l'on mesure également. On sait en effet qu'aux vitesses urbaines, une réduction de la vitesse, entraîne une augmentation de la consommation de carburant, et donc une augmentation équivalente des rejets de CO₂. Mais l'impact le plus important a lieu là aussi sur le périphérique. En ralentissant tous les véhicules qui y circulent, et en augmentant de ce fait leurs rejets de CO₂, les anciens utilisateurs des Maréchaux qui se reportent sur le périphérique sont la cause d'augmentations importantes des rejets de CO₂. Au total, le projet engendre une augmentation des rejets de plus de 3 000 tonnes de CO₂ par an.

Au total, le projet tramway-rétrécissement des voies n'apparaît pas mériter le concert de louanges avec lequel il a été accueilli. Il a coûté cher. Les coûts qu'il entraîne sont plus importants que les gains qu'il procure, en particulier en ce qui concerne la lutte contre l'effet de serre. Les tramways sont à la mode. Mais la mode, disait Cocteau, c'est ce qui se démode.

En termes d'économie politique cependant, le projet est probablement intéressant pour la municipalité de Paris. Les principaux bénéficiaires sont les usagers du tramway, qui sont majoritairement (57 %) des Parisiens, c'est-à-dire des électeurs. Les coûts sont pour les automobilistes, qui sont principalement des banlieusards, qui ne votent pas à Paris. Le coût de l'investissement n'a été payé par la municipalité de Paris qu'à hauteur d'environ 15 %, et de toute façon les impôts de Paris sont principalement payés par des entreprises et relativement invisibles et indolores pour les électeurs. Le bilan environnemental est négatif, mais il n'est guère visible, et il est facile de persuader les électeurs qu'il est positif : les voitures en moins sur les boulevards des Maréchaux se remarquent davantage que les voitures en plus sur le boulevard périphérique. Il n'est donc pas très surprenant que le projet ait eu, et garde, la faveur d'à peu près tous les élus de Paris. L'idée de prolonger le tramway sur le reste des boulevards des Maréchaux à un coût prévisionnel de plus de 600 millions d'euros soulève assez peu d'opposition.

Références

Armelius, Hanna & Lars Hultzenkrantz. 2006. « The politico-economic link between public transport and road pricing : An ex-ante study of the Stockholm road-pricing trial ». *Transport Policy*, vol 13, pp. 162-172

Goodwin P.B, 1992. "A review of New Demand Elasticities with Special Reference to Short and Long Run Effects on Price Changes". *Journal of Transport Economics and Policy*, vol 26, n°2, pp. 155-169.

Institut Français de l'Environnement. 2004. *Les Coûts environnementaux de l'automobile*. 196p (Notes de méthode n° 14)

INFRAS-Zurich & IWW-Karlsruhe. 2000. *External Costs of Transport : Accident, Environmental and congestion Costs of Transport in Western Europe*. 140p.

Litman, Todd. 2006. "Transportation Elasticities : How Prices and others Factors affect Travel Behavior". Victoria Transport Policy Institute.

Litman, Todd. 2007. *Valuing Transit Service Quality Improvements*. Victoria Transport Policy Institute. 34p.(www.vtpi.org/traveltime.pdf)

Prud'homme, Rémy & Yue Ming Sun. 2000. « Le coût économique de la congestion du périphérique parisien : une approche désagrégée ». *Les Cahiers Scientifiques du Transport*. N° 37, pp. 59-73

Prud'homme, Rémy & Pierre Kopp. 2007. « Le péage de Stockholm : évaluation et enseignements ». *Transports*. N° 443 (Mai-juin 2007), pp. 175-189

Annexe A – Feuille de calcul du coût de la congestion et des rejets de CO2 supplémentaires sur le périphérique engendrée par le report de véhicules des Maréchaux

Calcul du coût marginal de congestion et du rejet marginal de CO2

Classes	Vitesse	Distrib.	Densité	CMCu	Report	CMC	RMPu	RMP
0-5	2,5	0,48	298	146	203	29644	0,69	140
5<v<10	7,5	4,06	278	15,9	1717	27306	0,64	1103
10<v<15	12,5	7,05	258	5,4	2982	16104	0,60	1777
15<v<20	17,5	6,36	238	2,54	2690	6833	0,55	1479
20<v<25	22,5	5,12	218	1,41	2166	3054	0,50	1091
25<v<30	27,5	4,37	198	0,86	1849	1590	0,46	845
30<v<35	32,5	3,78	178	0,56	1599	895	0,41	657
35<v<40	37,5	3,29	158	0,37	1392	515	0,36	508
40<v<45	42,5	2,98	138	0,25	1261	315	0,32	402
46<v<50	47,5	3,42	118	0,17	1447	246	0,27	394
50<v<55	52,5	4,6	98	0,12	1946	233	0,00	0
55<v<60	57,5	6,99	78	0,08	2957	237	0,00	0
60<v<65	62,5	10,6	58	0,05	4484	224	0,00	0
65<v<70	67,5	13,67	38	0,03	5782	173	0,00	0
70<v<75	72,5	14,8	18	0,01	6260	63	0,00	0
v>75	77,5	9,06	1	0,01	3832	38	0,00	0
Total (/jour)		100			42300	87471		8397

Classes: classes de vitesses, en km/h

Vitesse: vitesse moyenne de la classe, en km/h

Distribution: distribution, en %, des veh*km par classe de vitesse observée sur la partie Ivry-Gargliano du périphérique

Densité: (q), en véh./km, calculée au moyen de $v=77,1-0,25*q$ ($q=(77,1-v)/0,25$)

CMCu: coût marginal unitaire de congestion, en €/veh*km, calculé comme $= 3,315*q/(77,1-0,25*q)^2$

Report: en véh*km, est le produit du total des véhicules reportés par la colonne Distribution

CMC: coût marginal de congestion, en €/jour, est le produit des colonnes CMCu et Report

RMPu: rejet marginal unitaire CO2 (polluant), en kg/veh*km, est calculé comme $= 0,00231*q$ jusqu'à $v=50$, et zéro pour $v>50$

RMP: Rejet marginal de CO2, en kg de CO2/jour, est le produit des colonnes RMPu et Report

Annexe B - Valeur des paramètres utilisés dans l'analyse

Tableau B - Valeur des paramètres utilisés dans l'analyse

Paramètre	Valeur	Unité	Source
Taux d'occupation véhicules	1,3	voy/véh	Dire d'expert
Valeur du temps voyageur	10,2	€/h	Instruction-cadre
Valeur temps véh utilitaires	31,4	€/h	idem
Véh. Util/veh. Totaux	20	%	Dire d'expert
Coef. valeur temps utilitaires	1,27	coef.	Calcul
Cout fixe utilisation véh	0,12	€/km	Dire d'expert
Longueur déplacements tramway	2,56	km	Enquête ad hoc
Relation vitesse-densité périph :			
α	77,4	coef.	Régression
β	-0,25	coef.	idem
Relation rejets CO2-vitesse :			
λ	0,624	coef.	Calcul graphique
μ	-0,00925	coef.	Idem
Valeur du CO2	25	€/tonne	Instruction-cadre
Rejets de CO2 par litre gazole	2,60	kg	
Rejets de CO2 par litre essence	2,35	kg	
Coef. Rejets CO2 utilitaires	1,2	coef.	