

UN CALCUL DES COUTS DE CONGESTION ET DES PEAGES OPTIMAUX DANS LA ZONE REGULEE AU CENTRE DE PARIS

Francis PAPON
INRETS
Arcueil - France

La congestion de la circulation routière dans les grandes agglomérations est un phénomène important. Il est fondamental d'en avoir une évaluation. En effet, la congestion a un coût social qui constitue un gaspillage de ressources pour la collectivité. Pour y remédier et améliorer l'efficacité de la circulation, les économistes préconisent des mesures de tarification de la circulation. Ainsi, connaître les coûts de congestion revient à connaître les avantages que l'on peut attendre d'une tarification optimale de la circulation.

Une tentative d'évaluer les avantages de la tarification de la congestion en Ile-de-France (Papon, 1988) a été faite à partir de courbes débit-vitesse issues de la DREIF (Chemin, 1987), aussi bien pour les voies traditionnelles à feux que pour les voies rapides urbaines. Ces calculs étaient effectués dans trois hypothèses d'élasticité de la demande par rapport au temps de parcours: -0,5; -1 et -1,5. Le tableau T.1 rappelle le bénéfice économique obtenu, en pourcentage du temps de circulation initial, en fonction du débit initial.

Tableau T.1. Bénéfice économique de la tarification optimale de la congestion (en pourcentage du temps de circulation initial, d'après Papon, 1988, p.77).

Débit Capacité	Voie traditionnelle à feu			Voie rapide urbaine		
	Elasticité de la demande			Elasticité de la demande		
	-0,5	-1	-1,5	-0,5	-1	-1,5
0,2	7%	7%	7%	-1%	-1%	-1%
0,3	13%	13%	13%	0%	0%	0%
0,4	10%	10%	10%	1%	1%	1%
0,5	11%	11%	11%	5%	5%	5%
0,6	15%	15%	15%	12%	12%	12%
0,7	17%	21%	21%	17%	20%	20%
0,8	28%	31%	31%	25%	25%	25%
0,9	44%	44%	44%	26%	26%	31%
1	59%	59%	59%	40%	40%	40%

Nous constatons que le bénéfice de la tarification optimale croît avec le débit initial, et qu'il dépend peu des hypothèses d'élasticités de la demande. Nous en déduisons, pour l'ensemble de l'Ile-de-France, un bénéfice potentiel de l'ordre de 20 milliards de francs par an.

Ci-après, nous effectuons un autre calcul des coûts de congestion et des bénéfices du péage, suivant les mêmes principes, mais avec des hypothèses plus détaillées et à partir de données de trafic relevées dans la zone régulée au centre de Paris.

1. UN BREF RAPPEL DE LA THEORIE ECONOMIQUE

1.1. Le diagramme fondamental

En ingénierie du trafic, le fonctionnement de la circulation est bien décrit par trois variables microscopiques instantanées: la vitesse u (en km/h), le débit horaire q (en veh/h) et la concentration k (en veh/km): ces trois variables microscopiques sont reliées entre elles par une relation qui tient à leur nature physique: $q = k*u$, et par une relation qui provient du fonctionnement de la circulation: le diagramme fondamental, que l'on peut représenter dans l'un quelconque des plans (u,q) , (u,k) , ou (q,k) .

Si l'on s'intéresse maintenant à un ensemble de tronçons de la voirie, de longueur L , et à une période d'une heure, on peut y définir des variables agrégées (GTM Entrepose, 1988 d'après Bonvallet & Robin-Prévaillée, 1987) : la vitesse moyenne v (en km/h) ou son inverse le temps de parcours kilométrique t (en h/km), le trafic T (en véh*km/h), et le nombre de véhicules en circulation ou temps passé en circulation par heure $t*T$ (en véh ou veh*h/h). Au niveau de ces variables agrégées, on peut étudier également la relation existant entre 2 quelconques de ces trois variables, et plus particulièrement (GTM Entrepose, 1988) t et T , que nous appellerons également diagramme fondamental. Cette relation n'est pas fonctionnelle, puisqu'à un trafic T donné, correspond deux valeurs possibles pour t :

- l'une correspondant à un régime fluide: $t = t_f(T)$ (R.1),
- l'autre correspondant à un régime saturé: $t = t_s(T)$ (R.2).

D'un point de vue économique, le diagramme fondamental n'est qu'une courbe d'offre qui donne le coût (en temps de parcours) du kilomètre parcouru sur cet ensemble de tronçons en fonction du nombre total de véhicules-kilomètres produits par heure sur cet ensemble de tronçons.

1.2. L'élasticité de la demande

On peut considérer que le point observé sur le diagramme fondamental à une heure donnée est l'intersection de la courbe d'offre (diagramme fondamental) et d'une courbe de demande de circulation. Il y a de nombreuses courbes de demande, correspondant à des heures différentes.

On sait peu de choses sur ces courbes de demande, puisqu'on n'en observe qu'un point. Pour s'en faire une idée, on peut apprécier leur pente, ou encore leur élasticité, à l'aide de calculs indirects (Papon, 1991).

1.3. Le coût social de congestion

En régime fluide, l'utilisateur marginal de l'ensemble de tronçons supporte un temps de parcours kilométrique $t = t_f(T)$, mais impose à chacun des autres usagers, en ralentissant la circulation, un coût externe de congestion $t_f'(T)$. Le coût social de cet usager marginal, exprimé en temps de parcours kilométrique est donc:

$$t_m = t_f(T) + T * t_f'(T) \text{ (R.3)}$$

L'utilisateur ne supportant pas son coût marginal social, l'usage qu'il fait du réseau n'est pas optimal pour la collectivité.

Figure F.1 : Tarification de la congestion (situation initiale fluide)

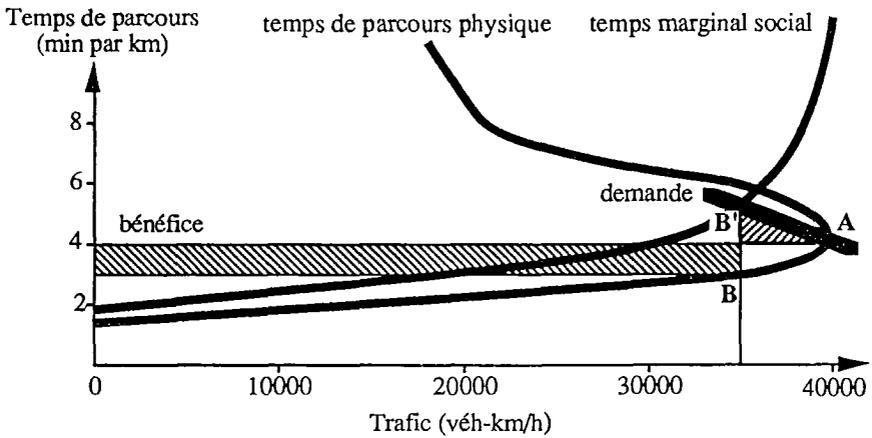
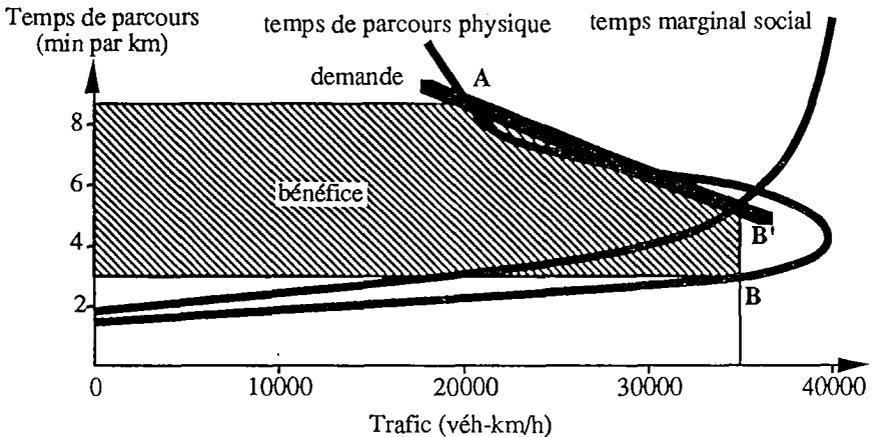


Figure F.2 : Tarification de la congestion (situation initiale saturée)



En régime saturé, le fonctionnement de la circulation est dégradé, et le temps de parcours est plus élevé que ce qu'il pourrait être en régime fluide avec le même trafic, et l'usage du réseau n'est donc pas non plus optimal.

1.4. La tarification de la congestion et le péage optimal

La théorie micro-économique classique de l'allocation optimale des ressources prévoit que l'usage le plus efficace peut être obtenu par une tarification au coût marginal social. Ainsi, si nous appelons:

t_1 : le temps de parcours kilométrique initial (sans péage);

T_1 : le trafic initial;

$A = (t_1, T_1)$;

si nous construisons:

$B' = (t_{m2}, T_2)$ le point d'intersection de la courbe de demande (qui passe par le point $A = (t_1, T_1)$) avec la courbe de coût marginal social (t_m, T) ;

$B = (t_2, T_2)$, où $t_2 = t_f(T_2)$;

T_2 est le trafic final (obtenu avec le péage), optimal pour la collectivité;

t_2 est le temps de parcours kilométrique final;

$t_{m2} - t_2$ est le péage de congestion optimal (exprimé en temps kilométrique).

Notons que cela reste vrai que la situation initiale soit fluide ou saturée (voir figures F.1 et F.2).

1.5. Le temps perdu

Le bénéfice obtenu pour la collectivité de l'application du péage de congestion optimal, exprimé en véh*h/h est la différence de deux termes:

$$B = (t_1 - t_2) * T_2 - \frac{1}{2} * (t_{m2} - t_1) * (T_1 - T_2) \quad (R.4),$$

où le premier terme représente le gain de temps pour les usagers restant et le deuxième terme la perte de surplus des usagers dissuadés par le péage, le produit du péage n'étant qu'un transfert au sein de la collectivité.

Ce bénéfice représente le temps perdu par la collectivité en l'absence de péage de congestion.

Il est possible d'agréger ces bénéfices pour l'ensemble de l'année, en calculant le bénéfice global pour l'ensemble des situations de l'application du péage :

$$BG = \int_0^{\infty} \lambda(t_1) \cdot B(t_1) \cdot dt_1 \quad (R.5);$$

où $\lambda(t_1)$ représente la densité d'heures dans l'année correspondant à la situation initiale caractérisée par le temps de parcours kilométrique t_1 .

2. LA COURBE D'OFFRE: LE DIAGRAMME FONDAMENTAL

2.1. Les données utilisées

Les données relatives à l'offre sont issues du document (GTM Entrepose, 1988). Ce document est établi à partir des mesures de trafic effectuées à Paris dans la zone régulée (axes: rue de Rivoli, quais rive droite, quais rive gauche, Boulevard Saint Germain, Boulevards Saint Michel et de Sébastopol, rues de la Cité et Saint Jacques, de longueur totale 19,2 km représentant 69,6 km de voies.

Ces données concernent 252 jours de semaine de l'année 1987, soit 6048 heures.

Nous utilisons le classement de ces heures par tranches de vitesse pour établir la courbe d'offre. Ce classement permet d'avoir, entre autres, pour chaque tranche de vitesse, le nombre d'heures correspondant, la vitesse moyenne de la tranche, et le trafic moyen correspondant. Ce sont ces trois séries de valeurs que nous utiliserons.

Les figures F.3, F.4 et F.5 donnent une représentation de ces données dans les trois plans du diagramme fondamental (t,T), (t^*T,T) et (v,t^*T).

Figure F.3 : Paris, zone régulée.

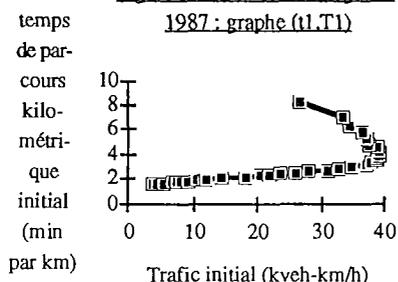


Figure F.5 : Paris, zone régulée.

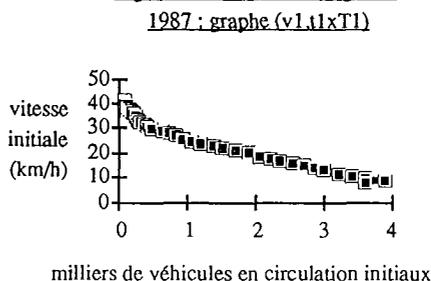
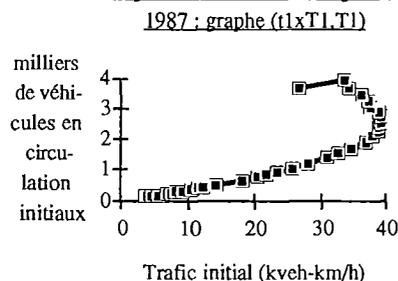


Figure F.4 : Paris, zone régulée.



(Source : GTM Entrepouse, 1988
d'après Ville de Paris)

2.2. Critique des données utilisées

L'usage des données que nous faisons présente deux inconvénients principaux :

— Elles sont agrégées sur plusieurs tronçons distincts, et donc ne permettent pas de représenter la variabilité différentielle des temps de parcours entre les tronçons : à une certaine heure le tronçon A peut être congestionné et le tronçon B fluide, à une autre heure, le tronçon A sera fluide et le tronçon B congestionné ; dans les deux cas, la vitesse moyenne obtenue sera la même, mais le trafic écoulé pourra être différent. La vraie courbe d'offre est donc en réalité un faisceau et non pas une courbe. On peut supposer néanmoins que cet effet est faible, à cause d'une relative homogénéité du niveau de la demande entre les différents tronçons.

— Elles ne permettent pas de tenir compte d'une variabilité du niveau de l'offre avec les périodes horaires. Cette variabilité est due essentiellement aux stationnements et arrêts illicites, qui restreignent la capacité à certaines heures.

3. LES COURBES DE DEMANDE: NOS HYPOTHESES

3.1. La formule utilisée

Nous supposons:

- qu'il existe une seule courbe de demande passant par chaque point observé de la courbe d'offre (t, T) ;
- que cette courbe de demande est une droite (au moins au voisinage du point considéré);
- que l'élasticité de cette courbe de demande en le point d'intersection avec la courbe d'offre est de la forme:

$$e(t) = \eta \cdot \varepsilon \cdot t^{1-\alpha} \quad (\text{R.6}), \text{ où } \eta, \varepsilon, \alpha \text{ sont des paramètres.}$$

Le paramètre η sera fixé à 1 dans un premier temps. Il permettra de faire varier l'élasticité plus tard.

Les valeurs suivantes du paramètre α sont remarquables:

$\alpha = 1$: élasticité constante;

$\alpha = 0$: élasticité proportionnelle au temps de parcours;

$\alpha = -1$: élasticité proportionnelle au carré du temps de parcours.

Il est légitime de penser que l'élasticité de la demande croît avec le temps de parcours, car les reports modaux risquent d'être plus massifs si le temps de parcours en voiture particulière est élevé.

3.2. Le calibrage des paramètres

Pour apprécier la pente de la courbe de demande, nous avons utilisé des résultats de l'Enquête Générale de Transport de 1983 (DREIF, 1985). En observant le comportement de choix modal des usagers à deux périodes horaires différentes présentant des conditions de circulation différentes, nous obtenons une information sur l'élasticité de la demande au temps de parcours, que nous avons mise à profit pour tirer une relation entre α et ε .

ε a été calibré pour différentes valeurs de α dans le tableau T.2:

Tableau T.2: Relation entre les paramètres α et ε .

α	-3	-1	-0,5	0	0,5	1	3
ε	-0,034	-0,2	-0,31	-0,48	-0,73	-1,1	-5,1

A l'aide de ces résultats, nous effectuons une régression exponentielle entre α et ε de la forme:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \exp(k_\alpha \cdot \alpha) \quad (\text{R.7}).$$

On trouve:

$$\varepsilon_0 = -0,4557 \text{ et } k_\alpha = 0,839.$$

3.3. Les hypothèses étudiées

Dans la suite, nous supposerons que la courbe de demande est de la forme donnée par la relation (R.6), et nous étudierons 5 valeurs contrastées pour le paramètre α , à savoir: -3, -1, 0, 1 et 3. Nous supposerons que le paramètre ϵ est donné par la formule (R.7).

Afin de se garantir contre les incertitudes de ce calcul, nous utiliserons le coefficient η pour faire varier l'élasticité de la demande, en étudiant encore 3 valeurs: 1, 0,5 et 1,25.

Ainsi, nous étudierons $3 \times 5 = 15$ formes possibles pour les courbes de demande.

4. LES RESULTATS

4.1. L'incidence des hypothèses de demande sur les résultats

Nous regardons d'abord le résultat le plus global, à savoir le bénéfice collectif global de l'application d'un péage optimal pour l'ensemble de tronçons de la zone régulée considéré, et pour l'ensemble des heures des jours de semaine de l'année, en l'exprimant en pourcentage du temps de circulation initial. Ce résultat est donné dans le tableau T.3, en fonction des hypothèses d'élasticité de la demande α et η .

Tableau T.3: Incidence des hypothèses sur la demande sur le bénéfice collectif global de l'application d'un péage optimal, exprimé en pourcentage du temps de circulation initial.

$\eta \backslash \alpha$	1	0	-1	3	-3
1	22,87%	23,52%	23,83%	21,21%	24,46%
0,5	21,44%	22,32%	23,03%	19,80%	23,71%
1,25	23,27%	23,84%	24,09%	21,69%	24,63%

On constate que ce résultat global est remarquablement stable par rapport aux hypothèses d'élasticité de la demande, et s'établit aux alentours de 23,5%. Pour cette raison, nous ne regarderons ci-après les résultats de détail que pour l'hypothèse:

$$\alpha = -1, \eta = 1.$$

4.2. Les restrictions de trafic

Nous pouvons présenter les résultats dans cette hypothèse en représentant en fonction du trafic initial: le temps de parcours kilométrique initial et le temps de parcours final (figure F.6).

La figure F.8 représente le trafic final en fonction du trafic initial. On remarque que lorsque la situation initiale est très congestionnée, le trafic final peut être supérieur au trafic initial.

Figure F.6 : Paris, zone régulée.
1987 ; graphes (t1.T1) et (t2.T1)

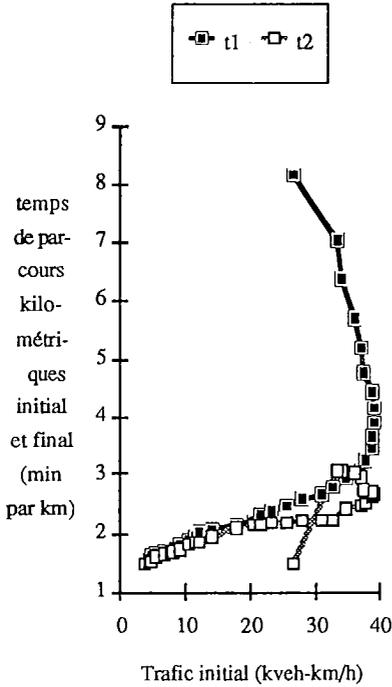


Figure F.7 : Paris, zone régulée.
1987 ; graphes (t2.T2) et (tm2.T2)

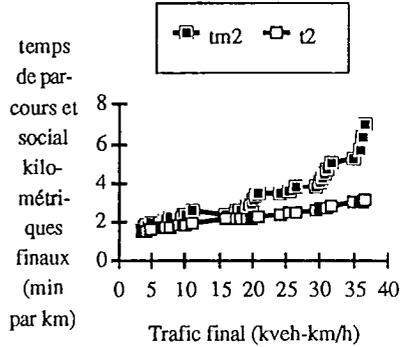
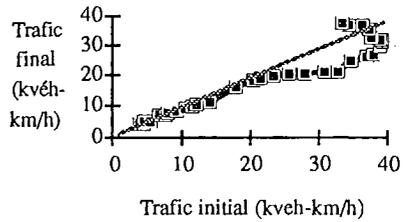


Figure F.8 : Paris, zone régulée.
1987 ; graphe (T2.T1)



4.3. Le péage optimal

Le péage optimal est la différence entre le temps social kilométrique final et le temps de parcours kilométrique final, valorisée suivant une certaine valeur du temps. C'est bien sûr une fonction décroissante de la vitesse initiale (figure F.9).

Figure F.9 : Paris, zone régulée.
1987 ; graphe (p.v1)

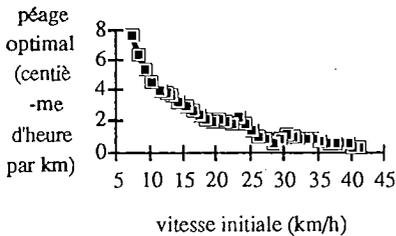
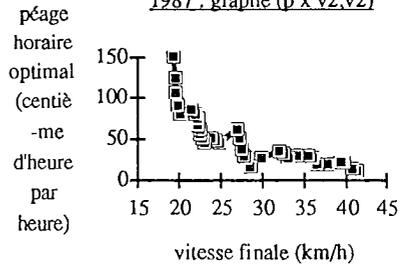


Figure F.10 : Paris, zone régulée.
1987 ; graphe (p x v2.v2)



4.4. Le temps perdu

Le temps perdu est le bénéfice que l'on peut attendre d'une tarification optimale. On peut le représenter en valeur absolue (heures perdues par heures), ou en pourcentage de temps de circulation, en fonction du nombre de véhicules initial, du trafic initial ou de la vitesse initiale (figures F.11 à F.16).

Figure F.11 : Paris, zone régulée.
1987 : graphe (B,t1xT1)

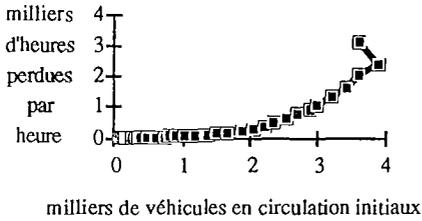


Figure F.12 : Paris, zone régulée.
1987 : graphe (B/t1/T1,t1xT1)

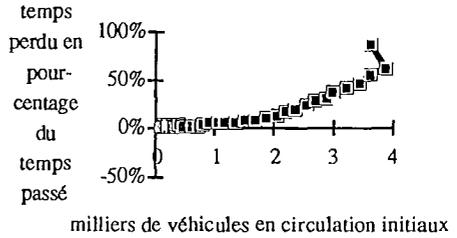


Figure F.13 : Paris, zone régulée.
1987 : graphe (B,T1)

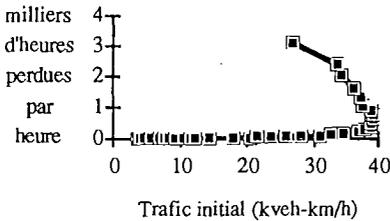


Figure F.14 : Paris, zone régulée.
1987 : graphe (B/t1/T1,T1)

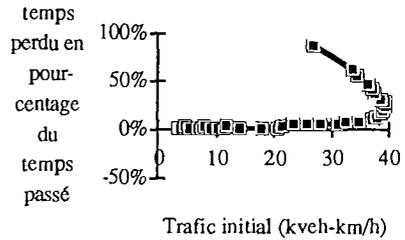


Figure F.15 : Paris, zone régulée.
1987 : graphe (B,v1)

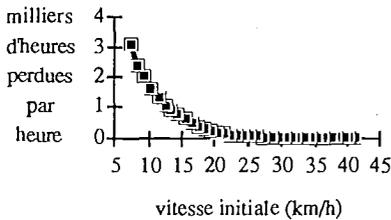
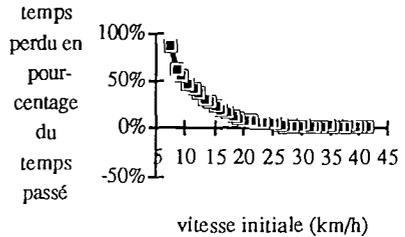


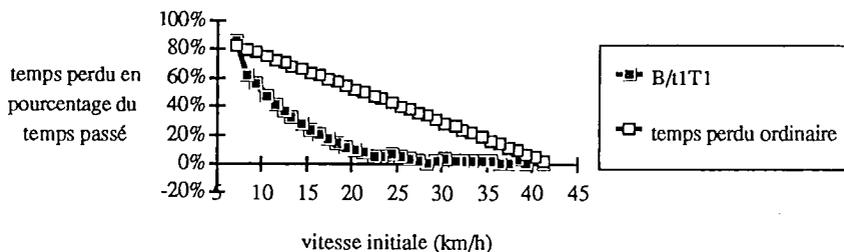
Figure F.16 : Paris, zone régulée.
1987 : graphe (B/t1/T1,v1)



Notons que notre définition du temps perdu diffère d'une conception plus ordinaire et souvent utilisée qui définit le temps perdu comme la différence entre le temps de

circulation réel et le temps de circulation en situation parfaitement fluide (voir figure F.17).

Figure F.17 : Paris, zone régulée, 1987 : graphe (B/11/T1.v1)



5. DES ORDRES DE GRANDEUR ELOQUENTS

L'intérêt de ces résultats est d'établir les coûts de congestion sur un site réel, et pour l'ensemble des jours ouvrables de l'année. Ils montrent que dans la zone considérée, le coût social de congestion représente 23,5% environ du temps passé en circulation.

Il est intéressant de voir que les péages optimaux obtenus (figure F.9) sont cohérents avec ceux issus d'autres études (Papon, 1988), et en particulier celles relatives au projet LASER. Son expertise (INRETS, 1989) nous a fait apparaître le péage dans ce projet comme une certaine tarification de la congestion, puisqu'il vise pour partie à assurer la fluidité.

Enfin, si on se risque à extrapoler le résultat obtenu à l'ensemble de Paris ou à l'ensemble de l'Ile-de-France, sur la base d'une valeur moyenne du temps des automobilistes de 100 F/h, on obtient un coût social de congestion de l'ordre de 5 GF/an pour Paris intramuros (boulevard périphérique exclu) et de 20 GF/an pour l'Ile-de-France, donc similaire à celui avancé dans l'introduction.

REFERENCES

Bonvalet, François et Robin-Prévallée, Yves - Mise au point d'un indicateur permanent des conditions de circulation en Ile-de-France: Calcul automatique de la vitesse de circulation - Ville de Paris/Direction de la Voirie - Paris - avril 1987 - 22 p.

Chemin, Daniel - Perspectives de trafic et de recettes sur une autoroute urbaine à péage: le cas de A14 - ENPC, DREIF - Paris - 1987 - 92 p.

DREIF - Les transports de voyageurs en Ile-de-France 1985 - Préfecture de l'Ile-de-France - Paris - 1985 - 72 p.

GTM Entrepose - Relation entre la vitesse moyenne et le trafic supporté par un réseau régulé - GTM Entrepose - Nanterre - décembre 1988 - 16 p. + annexes.

INRETS - LASER: rapport d'expertise - INRETS - Arcueil - 13 janvier 1989 - 90 p.

Johnson, M. Bruce - "On the Economics of Road Congestion" - *Econometrica* - Vol 32, n°1-2 - Washington - janvier 1964 - pp.137-150.

Papon, Francis - Comment appliquer une juste tarification économique de la circulation routière urbaine? - DEA - ENPC, Université de Paris XII, INRETS - Paris - juin 1988 - 83 p.

Papon, Francis - Les "Routes de Première Classe" : Une tarification différenciée de la circulation en agglomération pour en améliorer l'efficacité économique de manière socialement équitable - Thèse de doctorat, mention "urbanisme", option "transport" - Université de Paris XII, INRETS - Arcueil - Avril 1991 - 4 tomes.