Les Cahiers Scientifiques du Transport
pp. 89-102 N° 25/1991

Frédéric GANNON
Tunnel à péage et structure des déplacements intra-urbains

Tunnel à péage et structure des déplacements intra-urbains

Frédéric GANNON

Cereve-Paris X
Nanterre

INTRODUCTION

Nous nous donnons pour but dans ce papier de formaliser l'équilibre spatial intra-urbain d'une ville de type N.E.U (Nouvelle Economie Urbaine), lorsque l'on fait l'hypothèse qu'un tunnel souterrain complète la voirie de surface existante en permettant une desserte du centre-ville dans de "bonnes" conditions de trafic. On peut se demander si, étant donnés les niveaux de trafic à l'intérieur des grandes agglomérations, une amélioration de la circulation sous forme d'offre de voirie duale peut ou non conduire à une meilleure allocation qu'auparavant et le cas échéant à une autre répartition des agents dans l'espace urbain. Ce type d'interrogation est maintenant fréquemment posé par les responsables des réseaux de transport des grandes villes en France, puisqu'a été accordée récemment à la Ville de Marseille l'autorisation de mettre en place un tunnel à péage.

1 TARIFICATION OPTIMALE ET CHOIX DE MODE A COURT TERME

1.1. Hypothèses sur la ville et les ménages urbains.

-la ville est parfaitement circulaire, de rayon $\underline{k}$ donné à court terme et le centre, le CBD, regroupe la totalité des emplois (nombre également donné) de l'agglomération. Il n'y a pas ici de spécificité du CBD, qui peut également accueillir des logements.

-les ménages ont tous la même fonction d'utilité (arguments et élasticités identiques) avec en particulier une indifférence pour la localisation per se (on rappelle ici que l'équilibre de localisation est réalisé sans tenir compte d'aménités ou de désaménités localisées, exclues par hypothèse d'un espace isotrope) mais se regroupent en deux classes de revenu différentes. Leur temps de transport est valorisé en proportion du revenu, ce qui a pour conséquence que les plus "riches" ont une valeur du temps passé dans les transports supérieure à celle des "moins riches". Cette hypothèse classique sera amendée par la suite.

-nous raisonnons ici en équilibre partiel, donc le seul mode de déplacement considéré sera l'automobile; le transport en commun peut exister ou non, cela ne changera rien à notre analyse. Nous dénoterons néanmoins, puisque toute ambiguité est alors exclue, par le terme "mode" l'un des deux moyens de déplacement mis à la disposition des usagers dans la ville: le tunnel payant, repéré par l'indice 1 et la voirie de surface, indicée par 2.

-à court terme, la position de chaque ménage résidant dans la ville est connue et constante. Cette localisation résulte d'un arbitrage préalable établi sur la base de l'offre de voirie de surface d'une part , sur le niveau de revenu ainsi que sur la fonction d'utilité du ménage en question d'autre part.

1.2. Conditions de trafic

Pour simplifier, on admettra que l'offre de voirie se compose:

1.de voies principales radiales amenant le trafic au CBD depuis la périphérie et

2.de voies secondaires "capillaires" permettant l'accès depuis tout point de la ville à la radiale la plus proche.

Par trafic nous entendons seulement la part des déplacements effectués entre domicile et lieu de travail. Ce modèle est donc initialement "mono-motif et uni-modal".

La ville étudiée ici existe depuis un temps indéterminé et l'équilibre observé résulte des ajustements de localisation successifs provoqués par les variations de l'offre de voirie, par la dynamique de la population et des entreprises, etc.

Nous admettons par souci de réalisme une congestion plus ou moins forte (selon la distance au centre) de la voirie, qui se traduit en l'absence de tarification au coût social marginal (cf la littérature à ce sujet) par une perte sociale nette d'autant plus forte que le nombre d'usagers est élevé. Formellement, le coût généralisé de transport C(k) pour parcourir la distance (à vol d'oiseau) k entre domicile et lieu de travail reflète cette saturation sous une forme simple, du type Vickrey (1969), que nous donnerons plus loin.

Cet équilibre constitue notre cadre de référence, à l'intérieur duquel nous introduisons l'hypothèse d'une modification de l'offre de transport sous la forme du **tunnel à péage** dont la longueur et la localisation précise des points d'accès sont données. La question que nous nous posons alors est la suivante: quelle est la répartition modale d'équilibre résultant, à court terme, de cette modification de l'offre? Quel est l'effet du tunnel payant, à localisation des ménages inchangée, sur les niveaux spatialisés de la congestion du trafic, donc sur les coûts généralisés de transport? Nous qualifierons de "satisfaisants" les niveaux ainsi déterminés, correspondant à des optima de second rang.

1.3. Configuration du tunnel

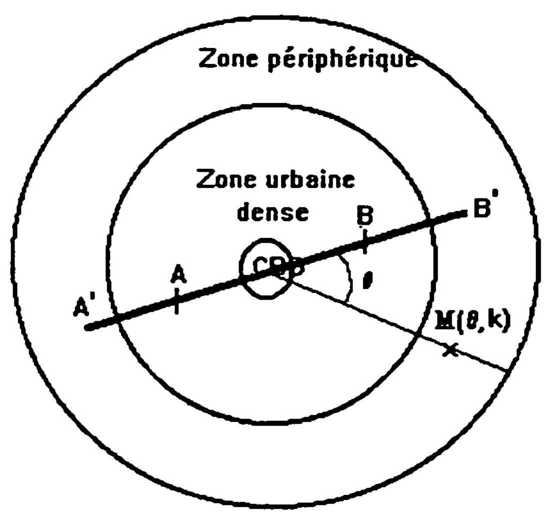
Un double objectif est assigné au tunnel par les responsables:

1. desservir le CBD dans des conditions de circulation garanties par le niveau du péage (objectif de court terme)[1]

[1] Cette question du "bon" niveau de péage soulève des problèmes difficiles, surtout si la demande de trafic est une variable aléatoire décroissant avec ce même niveau.

2. permettre un transit du "centre urbain dense" (dont les limites, données, déterminent la localisation des deux points d'entrée-sortie du tunnel) dans les mêmes conditions de trafic lorsque des emplois se créent en dehors du CBD (objectif de long terme) sous l'impulsion du tunnel ("effet-tunnel" de relocalisation des agents à moyen terme).

Il traverse le CBD de part en part mais en permet l'accès grâce à une rampe de sortie type bretelle de périphérique, de capacité telle qu'aucun encombrement ne vienne ralentir le débit amont (la contrainte est alors, à débit donné, de garantir à ses usagers sur l'intégralité du trajet en souterrain une vitesse supérieure ou égale à celle correspondant au seuil de saturation). On pourrait aussi bien considérer un tracé formé de deux demi-tunnels cul-de-sac satisfaisant aux mêmes contraintes, mais on préfère l'idée que les responsables envisagent lors de la conception du tunnel l'éventualité de transit à moyen terme, ce qui revient simplement à atttribuer à ces responsables des objectifs de planification urbaine à long terme, en particulier en matière de déplacements. Le schéma ci-dessous retrace cette configuration première:



Graphique 1. Zones de la ville et tunnel (A et B sont les deux points d'entrée-sortie)

(Nous avons donné au tunnel un angle quelconque par rapport au système virtuel d'axes orthogonaux centré sur le centre du CBD).

1.4. Demande totale et indice de congestion initiaux.

Soit N le nombre total d'usagers automobilistes de la ville, connu avant l'instauration du tunnel. A chaque distance k (à vol d'oiseau) du centre, l'émission ou demande de trafic vaut N°(k), le nombre de salariés résidant en k. Cette écriture permet une valeur absolument quelconque des densités. En terme de congestion, cela signifie que les coûts généralisés de transport pour deux points différents situés à la même distance k peuvent être différents. Si l'on impose au trafic de s'effectuer dans un seul sens (autrement dit, on habite toujours plus loin que son lieu de travail sauf quand on vit dans le CBD), alors la demande $D°(k)$ de trafic cumulée en k s'écrit:

$$D°(k) = \int_{k}^{k} N(t).dt \qquad (1)$$

Connaissant l'offre $S°(k)$ de trafic en k (capacité exprimée en débit ou en concentration de véhicules), l'indice de congestion peut se définir comme:

$$I°(k) = \frac{D°(k)}{S°(k)} \qquad (2)$$

$$\text{Soit:} \quad I°(k) = \frac{\int_{k}^{k} N(t).dt}{S°(k)}$$

avec $0 < I°(k) < \underline{I}$, $\underline{I}$ étant une valeur préspécifiée selon la définition de $S°(k)$[2]

Cet indice de congestion, dépendant de la croissance urbaine passée, est supposé connu initialement. A court terme, la nouvelle offre de transport (tunnel) diminue le niveau de congestion de surface, par un effet sur la demande cumulée de surface en k qui passe à $D_1(k) < D°(k)$, avec une offre $S°(k)$ inchangée. En conséquence, en tout point situé à k du centre, on observe $I_1(k) < I°(k)$. Il faut alors déterminer $D_1(k)$, ce qui revient à calculer, à répartition et à revenus donnés, le partage modal d'équilibre entre tunnel et voirie de surface. On doit en outre imposer que $I_2 < I_1(k)$ ($\forall k$), donc que l'indice de congestion dans le tunnel soit, à l'équilibre, inférieur à la valeur minimum que prend cet indice sur la voirie de surface, sinon il n'y aucun avantage à choisir le tunnel, en terme de temps de trajet.

1.5. Equilibre du ménage représentatif

Soit un ménage représentatif appartenant à l'une des deux catégories de revenu indicées respectivement par b (pour "bas") et h (pour "haut"). Il est doté d'une fonction d'utilité de type $U=U(Z,H,L)$ où Z représente sa consommation de bien composite, H la surface de son logement et L le nombre d'heures de "loisir" qui lui restent après sa journée de travail, trajets compris. U est croissante en chacun de ses arguments, de sorte que $U_Z > 0$, $U_H > 0$ et $U_L > 0$. Sa contrainte de budget s'écrit à l'équilibre, avant que le tunnel soit construit:

$$Y_i = H°R°(k) + Z° + C_i(k) \qquad i=b,h \quad (3)$$

[2] Voir Wingo (1961), Fāre et alii (1982), Wilson (1991), Gannon (1992)

NB: H° et R° sont indépendants du niveau de revenu; le prix d'une unité de Z est égal à 1.

R°(k) est la valeur de la rente unitaire d'équilibre en k, $C_i(k)$ est le coût généralisé de transport pour se rendre de k au CBD.

Sa contrainte temporelle s'écrit:

$$24 = W+T(k)+L(k)$$

où W représente le nombre quotidien d'heures de travail identique pour tous et fixé par exemple à 8.

Le coût généralisé de transport peut s'écrire: g(T(k),k)=C(k) avec C(k) une valeur monétaire. Cette écriture suppose que le *temps* de transport a un coût connu et dépendant du niveau de revenu. Nous l'écrirons explicitement ici comme:

$$\overset{o}{C_i}(k) = \mu k+\tau_i t(k) \quad i=b,h \qquad (4)$$

avec:

k = distance à vol d'oiseau,

μ = coût monétaire unitaire de la distance parcourue, indépendante du revenu,

τ_i = équivalent monétaire d'une unité de temps passée par l'usager de type i (b ou h) dans le trajet domicile-travail, tel que $\tau_h > \tau_b$. On supposera initialement connues ces deux valeurs,

t(k) = temps réel de trajet pour franchir la distance k entre domicile et travail, avant l'apparition du tunnel.

Si l'espace est, comme on l'a supposé, isotrope, la population totale (donc les N usagers de la voiture) se répartit de manière homogène dans la ville, ce qui nous permet de nous limiter à l'analyse d'une seule distance k quelconque du centre-ville, qu'il est ensuite aisé de généraliser. Des conditions initiales de circulation (avant l'existence du tunnel) se dégage en k un indice de congestion I°(k) égal au nombre de véhicules transitant par l'anneau k rapporté à l'offre de voirie disponible. Si n(k) désigne le nombre d'usagers résidant au-delà de cet anneau, alors l'expression de I°(k) se simplifie en: $I°(k)=\frac{n(k)}{S°(k)}$, S°(k) désignant cette offre.

1.5. Condition d'indifférence modale à court terme

On suppose maintenant que l'usager, où qu'il habite, peut effectuer une partie plus ou moins grande (relativement à sa distance totale de déplacement) de son trajet dans le tunnel souterrain payant dont les points d'accès sont réduits à deux entrées de part et d'autre de l'infrastructure comme spécifié au graphique 1. Il sera indifférent entre les deux modes (tout ou seulement une partie de son trajet effectué en surface) si son nouveau coût généralisé de transport est invariable avec le mode. Formellement, cette condition s'écrit pour un couple (i,k) quelconque et si $C_j^i(k)$ est le coût généralisé de transport de l'usager de revenu i résidant en k et empruntant le mode j (j=1,2):

$$C_1^i(k) = C_2^i(k) \qquad i=b,h \quad (5)$$

(avec 1 et 2 désignant respectivement le mode 1 et le mode 2)

On remplace les deux termes de l'égalité par leur valeur, à savoir:

$$C_1^i(k) = \mu k+\tau_i t^1(k)$$

$$C_2^i(k) = \mu k+p+\tau_i t^2(k)$$

avec p la valeur du péage forfaitaire, supposée constante à court terme et calculée au préalable par les responsables en fonction de la capacité du tunnel et de sa demande prévue.

La condition d'indifférence modale s'écrit alors:

$$\mu k+\tau_i t^1(k) = \mu k+p+\tau_i t^2(k)$$

soit: $\tau_i t^1(k) = p+\tau_i t^2(k)$

ou encore:

$$\boxed{\frac{p}{\tau_i} = t^1(k)-t^2(k) \qquad (6)}$$

Les usagers indifférents, en un k donné quelconque, entre les deux modes de déplacement, permettent, selon leur revenu, de déterminer la préférence modale des usagers de revenu différent. Ainsi, si la condition (6) est vérifiée par ceux de plus faible (fort) revenu, comme par hypothèse $\tau_h > \tau_b$, alors: $\frac{p}{\tau_h} < t^1(k)-t^2(k)$ et respectivement $\frac{p}{\tau_h} > t^1(k)-t^2(k)$. Concrètement, le premier cas implique une préférence stricte pour le tunnel des usagers de plus fort revenu vivant à k et le second une préférence stricte pour la voirie de surface des usagers de plus faible revenu vivant aussi à k du centre. On peut donc affirmer que si, en un k donné, le tunnel abaisse le coût généralisé de transport de l'usager de plus faible revenu[3] alors c'est encore plus vrai pour son voisin de revenu supérieur. Il y a donc un risque classique d'éviction de l'infrastructure payante des ménages de plus faible revenu lorsque le péage devient à long terme une fonction croissante de la demande (puisque l'on peut

[3] $C_2^b(k) < C_1^b(k)$

supposer une gestion monopolistique du tunnel). Le seul moyen de conserver l'équité est d'amener le péage à **une valeur telle qu'à l'équilibre le surplus des deux types d'usagers soit égal**, et l'on supposera ici que p est cette valeur à court terme.

A court terme et à péage constant, si l'on connaît la partition en k de la population entre les deux classes de revenu, il est possible de déterminer d'après (6) la demande potentielle totale adressée au tunnel. Cependant, ceci n'est valable que si l'on suppose $t^1(k)$ et $t^2(k)$ donnés comme paramètres de choix de mode à court terme. Car le problème est évidemment que ces temps réels de trajet **dépendent eux-mêmes de la demande effective** et que ce n'est qu'après un processus de tâtonnement de type walrasien que l'on parvient à l'équilibre. Plus précisément, $t^1(k)$ et $t^2(k)$ sont deux fonctions pouvant croître avec le nombre de véhicules empruntant simultanément le même trajet, si l'on dépasse le seuil de saturation. On peut, puisque l'on ne s'intéresse ici qu'aux déplacements domicile-travail, supposer qu'ils ont tous lieu durant une période appelée traditionnellement heure de pointe et dire que la demande de chaque mode est le débit de trafic de ce même mode. On retrouve la relation classique décroissante entre vitesse moyenne (l'inverse du temps moyen de parcours à distance donnée) et débit réel lorsqu'on franchit le seuil de saturation. Autrement dit, on a un système d'équations simultanées de court terme s'écrivant:

$$\boxed{\begin{array}{c} t^j(k)=t^j(N_j(k)) \\ N_j(k) = N_j(t^j(k)) \\ N_j(k)+N_{-j}(k) = N(k) \end{array}}$$

(avec $N_{-j}(k)$ le nombre d'usagers ne choisissant pas le mode j)

Nous supposerons ici qu'à très court terme les usagers considèrent comme donnés les temps de transport avec tunnel avec $t^j(k) < t(k)$, $\forall k$ et $\forall j$.

Si l'on envisage les temps de trajets comme des valeurs moyennes sur l'ensemble de chaque type de parcours, alors on peut introduire $V_j(N_j,N_{-j})$ les vitesses moyennes de trajet sur ces mêmes parcours:

$$t^1(k) = \frac{k}{V_1(N_1,N_2)} \quad (7)$$

$$t^2(k) = \frac{d(M(k,\theta),E)}{V_1(N_1,N_2)} + \frac{d_T}{V_2(N_1,N_2)} \quad (8)$$

où $M(k,\theta)$ = point situé à k du centre-ville tel que la droite passant par lui et ce même centre d'une part et la droite AB, c'est-à-dire l'axe du tunnel, supposé d'orientation quelconque (cf.graphique 1) forment un angle $\theta \geq 0$,

d_T = demi-longueur du tunnel, constante à court terme,

$d(M(k,\theta),E)$ = distance à vol d'oiseau entre le point M et celui des deux points d'entrée du tunnel (A ou B) le plus proche de M (à vol d'oiseau aussi).[4]

On note que $\forall\theta\neq 0$, $d(M(k,\theta),E) > d(M(k,0),E)$.

La relation d'*indifférence* modale peut alors se réécrire de façon à donner les conditions de *préférence* modale à court terme d'un usager de type i résidant en $M(k,\theta)$, toutes choses égales d'ailleurs:

$$C_2^i(k,\theta) < C_1^i(k,\theta) \text{ si et seulement si: } \left[\frac{p}{\tau_i}+\frac{d_T}{V_2(N_1,N_2)}\right]V_1(N_1,N_2) \lesseqgtr k-d(M(k,\theta),E) \quad \textbf{(1 bis)}$$

Ces règles de choix modal vont déterminer pour chaque point M la demande potentielle des deux modes à vitesses moyennes données, puisque l'on sait que tous les usagers de même revenu vont faire le même choix. Une difficulté surgit néanmoins ici: quel mode vont choisir les usagers indifférents? L'incertitude sur leur choix, qui peut varier d'un individu à l'autre et d'un jour à l'autre, entraîne celle sur les valeurs des demandes de chaque mode. Nous laissons de côté cette question ici pour des raisons de simplicité, mais en réalité, la détermination de l'équilibre exige sa prise en compte. L'équilibre partiel en terme de choix de mode et à localisation fixe (emplois et résidences) sera, cette réserve faite, atteint pour les valeurs N_1^*, N_2^* assurant l'égalité des revenus nets du coût généralisé de transport: $Y_i - C_j^i(k,\theta) = y$, (i=b,h) avec j désignant le mode de plus faible coût généralisé.

On constate qu'à l'équilibre de court terme, la valeur y est strictement supérieure à l'ancien revenu net du coût généralisé de transport, $Y_i - \overset{\circ}{C}_i(k)$ puisque le tunnel permet de réduire la composante "temps de transport" du coût généralisé. Ce surplus de revenu, à rente foncière et surface de logement constantes, ne peut exister qu'à court terme, virtuellement, du fait que tous les ménages de la ville doivent, lorsqu'ils sont en situation d'équilibre spatial, saturer leur contrainte de budget. On supposera ici que la consommation de bien composite, Z, reste constante à moyen terme donc que seule la quantité HR°(k) va augmenter de façon à absorber cet excédent temporaire. Or, nous savons qu'en situation d'équilibre spatial initial (avant le tunnel), la rente R(k)[5] est une fonction décroissante de la distance k; à surface de logement constante, ceci implique que dans un premier temps, les ménages vont se rapprocher du centre-ville, tant que les coûts généralisés de transport n'augmentent

---

[4] Tous les points $M(k,\frac{\pi}{2})$ et $M(k,\frac{-\pi}{2})$ sont évidemment équidistants de A et B, puisqu'ils sont sur la médiatrice du segment.

[5] On rappelle qu'alors θ n'a encore aucun sens, sauf évidemment si l'on suppose connue ex ante la position du tunnel, autrement dit si l'on envisage une capitalisation de l'amélioration des coûts de transport, contrairement à nos hypothèses de travail;

pas suite à la densification aux bordures du centre-ville. Dans la seconde partie de notre analyse, nous précisons les effets à moyen terme de cette relocalisation sur la structure d'équilibre des déplacements.

2. IMPACT A MOYEN TERME DU TUNNEL SUR LA LOCALISATION D'EQUILIBRE DES MENAGES

L'élément moteur de la décision de relocalisation des agents utilisant leur voiture pour se rendre à leur travail dans le CBD est, nous l'avons dit précédemment, leur gain en terme de coût de transport généralisé permis par le tunnel. Selon sa localisation d'origine et son revenu, un ménage va soit être indifférent entre les deux modes, soit préférer effectuer la fin de son trajet dans le tunnel soit enfin n'emprunter que la voirie de surface, rendue en moyenne plus fluide (toutes choses égales d'ailleurs) à population constante. Le problème consiste alors à déterminer quel sera le nouvel équilibre spatial en fonction des choix de chaque type d'usagers. Les hypothèses simplificatrices adoptées dans la section précédente sont reconduites à des fins de comparaison.

2.1.. Calcul des gains de temps de tranport.

La première étape de l'analyse de l'impact à moyen terme de l'offre de transport payante consiste à calculer pour chaque point M le gain de temps de transport qu'elle permet. Ce gain est virtuel, rappelons-le, puisque tout déséquilibre dans une ville de type N.E.U est immédiatement éliminé grâce à une relocalisation ad hoc de l'ensemble des ménages concernés. On part de la contrainte de budget de ce ménage à l'équilibre avant tunnel:

$$\forall k,\ \forall i,\ Y_i = H^\circ R^\circ(k) + Z^\circ + C_i(k)$$

Avec l'offre duale de transport, trois cas se présentent comme on vient de le voir pour ce ménage quant à son trajet domicile-travail: soit il doit choisir (sur la base de son seul coût généralisé de transport) le tunnel ou la voirie de surface, soit il est indifférent entre les deux. Etudions l'avantage, le gain net de chaque cas, noté respectivement $G_2(M)$, $G_1(M)$ et $G_0(M)$.

cas 1: choix du tunnel

$$G_2(M) = t(k) - t^2(M) = \frac{k}{V} - \frac{d(M(k,\theta),E)}{V_{12}(M)} - \frac{d_T}{V_2(N_2^*)} > 0$$

avec E=A ou B selon la valeur de θ, V la vitesse moyenne avant création du tunnel, $V_{12}(M) = V_1(N_2^*(M))$ la vitesse moyenne sur voirie de surface (le 1 de l'indice 12) de l'usager résidant en M et rejoignant le tunnel (à l'équilibre) et $V_2(N_2^*)$ la vitesse moyenne dans le tunnel à l'équilibre. On rappelle qu'à population constante, $N_1^*(M)+N_2^*(M)=N(M)$ si $N(M)$ désigne le nombre d'usagers de la voiture résidant en M avant relocalisation.

$V_{12}(M)$ dépend négativement du nombre $N_2^*(M)$[6], donc plus les usagers résidant en M sont nombreux à choisir le tunnel, plus ils mettront de temps à le rejoindre et moins leur gain sera important.

Le gain en terme de temps de déplacement est d'autant plus élevé, à k donné, que:

(a)- d(M,E) est faible (à vitesses et d_T donnés) ou encore θ petit.

On sait pour l'avoir écrit plus haut que la condition d'indifférence modale détermine pour chaque k une valeur de l'angle θ qui permet de tracer une zone de forme cônique partant du centre ville jusqu'aux limites de la ville à l'intérieur de laquelle les usagers préfèrent le mode 2 à l'autre. Plus θ est petit, plus le domicile de l'usager est proche du point d'entrée A ou B et plus l'avantage en temps de trajet qu'il tire du tunnel est important, du moins avant l'équilibre modal qui commande une égalisation des avantages par le biais de celle des coûts généralisés de transport. Le ménage va alors, sur la base des vitesses d'équilibre tenter de se rapprocher de E soit en abaissant l'angle θ à distance k constante, soit en modifiant simultanément k *et* θ. L'effet de son rapprochement du point d'accès au tunnel sera d'autant plus efficace que la vitesse moyenne d'équilibre $V_{12}(M)$ observée à court terme est élevée. Concrètement, cela signifie que plus la congestion du trafic de surface est faible, plus l'usager ayant au préalable avantage à emprunter le tunnel va être conforté dans son choix. Autrement dit, et c'est logique, plus le nombre d'usagers choisissant le mode payant est faible en un M donné, plus ce mode sera efficace.

(b)- $V_2(N_1^*,N_2^*)$ est élevée.

Par définition, $V_2(N_2^*)$ est la vitesse praticable en moyenne sur le parcours souterrain, à l'équilibre. En admettant que le système de transport n'est pas en situation de fluidité, V_2 est fonction croissante de la capacité du tunnel et décroissante du volume de la demande d'équilibre N_2^*. Or, la capacité du tunnel est logiquement limitée, tandis que la demande (ou débit) risque de provoquer une suboptimalité du niveau de congestion (qui peut difficilement être inférieur à 1, ne serait-ce que pour des raisons financières). Alors la vitesse $V_2(N_2^*)$ tend à décroître rapidement avec l'augmentation de la demande due à la polarisation des usagers autour des points d'entrée A et B du tunnel, jusqu'à ce que l'avantage comparatif du tunnel soit annulé.

[6] si l'on admet que l'on n'est pas en situation de fluidité, donc que l'on a dépassé le seuil de saturation, défini comme le débit à partir duquel tout véhicule supplémentaire ralentit l'ensemble du trafic dans lequel il s'insère.

cas 2: choix de la voirie de surface

Le ménage résidant en $M(k,\theta)$ choisissant d'effectuer intégralement son parcours sur la voirie de surface bénéficie à localisation constante d'un gain en temps de transport égal à $G_1(M)=t(k)-t^1(M)=\frac{k}{V}-\frac{k}{V_{11}(N_1^*(M))}\cdot V_{11}(N_1^*(M))$ désigne la vitesse moyenne pour l'usager résidant en M sur son parcours (entièrement effectué sur la voirie de surface) (d'où l'indice 11). $V_{11}(N_1^*)$ est différent de $V_1(N_2^*(M))$ En rappelant que $N(M)=N_1^*(M)+N_2^*(M)$, donc que $V_{11}(N_1^*(M))=V_{11}(N(M)-N_2^*(M))$, la vitesse moyenne pour un usager résidant en M et circulant sur une voie radiale est d'autant plus élevée que sont nombreux ses "voisins" choisissant l'autre mode. Ceci revient à dire, du fait que chaque classe de revenu a un comportement homogène en matière de déplacement, que son "voisinage" est plutôt composé de ménages de caractéristiques différentes des siennes, ce qui est une autre façon de formuler la conclusion du (a) du cas précédent.

Son gain est donc de $k\cdot\frac{V_1(N_1^*,N_2^*)-V}{VV_1(N_1^*,N_2^*)}$. Il n'y a égalité entre G_1 et G_2 que si $\frac{k}{V_{11}(M)}=\frac{d(M(k,\theta),E)}{V_{12}(M)}-\frac{d_T}{V_2(N_2^*)}$. Cette condition donne l'ensemble des valeurs de k à θ donné qui satisfont l'invariance des gains selon le choix de mode c'est-à-dire selon le revenu des usagers.

cas 3: Indifférence modale

En cas d'indifférence, le gain est par définition nul, soit $G_0=0$. A court terme, ce type d'usagers sera donc défavorisé par rapport aux deux autres mais sachant que ce déséquilibre est corrigé à moyen terme par la relocalisation des ménages (toutes choses égales d'ailleurs), on sait que ces ménages conserveront leur localisation.

Le processus dynamique d'ajustement des niveaux de congestion peut se résumer de la manière suivante:

A court terme, pour certains couples (k,θ), le tunnel garantit un abaissement substantiel du temps donc du coût de transport généralisé, dégageant un surplus de revenu que le ménage annulera à moyen terme en se rapprochant de l'accès du tunnel (donc en augmentant la partie souterraine de son trajet domicile-travail). La polarisation croissante de l'habitat autour de ces points d'entrée finit par remettre en cause les avantages à court terme du tunnel et par reconduire le système aux anciens niveaux de congestion. Ce problème est encore aggravé par le phénomène d'attente des usagers aux entrées du tunnel provoquée par l'arrêt de chaque véhicule aux bornes de paiement du péage, qui peut néanmoins être atténué par un système de télépéage et/ou d'abonnement.

2.2.. Relocalisation des ménages à moyen terme

Nous ne ferons ici qu'esquisser le schéma de relocalisation optimale de moyen terme des usagers selon leur choix de mode de court terme.

Le processus dynamique d'ajustement des niveaux de congestion peut se représenter shématiquement de la manière suivante:

A court terme, pour certains couples (k,θ), le tunnel garantit un abaissement substantiel du temps donc du coût de transport généralisé, dégageant un surplus de revenu que le ménage annulera à moyen terme en se rapprochant de l'accès du tunnel (donc en augmentant la partie souterraine de son trajet domicile-travail). La polarisation croissante de l'habitat autour de ces points d'entrée finit par remettre en cause les avantages à court terme du tunnel et par reconduire le système aux anciens niveaux de congestion. Ce problème est encore aggravé par le phénomène d'attente des usagers aux entrées du tunnel provoquée par l'arrêt de chaque véhicule aux bornes de paiement du péage, qui peut néanmoins être atténué par un système de télépéage et/ou d'abonnement.

Plus précisément:

On admet que $R(k)$, la valeur unitaire du logement localisé à k du centre-ville, est une donnée du problème, ce qui revient à postuler que le marché du logement et du foncier n'intégre pas l'information sur les gains de transport, non capitalisation qui permet aux (incite les) ménages de (à) se relocaliser plus près du centre afin de retrouver leur équilibre de localisation, à surface de logement constante et à fixité de leur lieu d'emploi. Cette hypothèse entraîne d'autre part que $R(k,\theta)=R(k,\theta')$, $\forall\theta\neq\theta'$, car initialement les résidences ne pouvaient être différenciées sur la base de leur position relative à un tunnel inexistant. Comment un résident-type vivant en $M(k,\theta)$ va-t-il réagir à la modification de ses coûts de transport?

Il effectue soit une partie de son parcours sur la voirie de surface pour atteindre l'un des deux points d'entrée, soit la totalité du fait de son coût généralisé de trajet. Une hypothèse importante doit être faite ici:

comme en général les directions des voies de surface diffèrent, on l'a vu, selon qu'elles conduisent à A ou B d'une part ou au CBD d'autre part (transversales dans le premier cas et radiales dans le second), il n'y a pas <u>addition</u> des deux types de trafic de surface, donc la congestion peut diminuer en tout point du réseau de surface par rapport à la situation initiale.

On peut objecter à cette hypothèse (forte) d'indépendance totale des deux trafics de surface (liaison domicile-tunnel et domicile-travail), que des phénomènes de cisaillement vont se produire qui ralentissent la circulation donc induisent une nouvelle forme de congestion plus ou moins forte. Néanmoins, nous l'adopterons telle quelle pour simplifier l'analyse.

Les agents résidant en M vont résorber le surcroît de revenu (égal à l'économie de coût de transport) $\tau_i G_i(M)$ $(i=1,2)$ en se relocalisant dans l'espace urbain. Ceux ayant choisi le mode payant vont se rapprocher des points d'entrée du tunnel en modifiant le couple (k,θ), tandis que ceux effectuant l'intégralité de leur trajet sur la voirie de surface vont se rapprocher du centre-ville en restant indifférents à l'angle θ' caractérisant leur nouveau domicile. La nouvelle localisation, $(k',\theta')_i$ sera telle que: $Y_i+G_i(M)=H°R°(k')+Z°+C_i(k')$. On obtient ainsi un nouveau schéma de localisation résidentielle optimale, caractérisé par des indices de congestion et une répartition par revenu différente de l'équilibre initial. Si l'on suppose que la surface résidentielle et de voirie libérée par les agents est aussitôt utilisée par les responsables pour accroître l'offre de transport en commun, on peut imaginer que l'effet à plus long terme du tunnel sera d'améliorer la qualité des déplacements périphériques effectués par ce mode. Au contraire, la densification de l'habitat et du trafic aux abords du centre-ville et de la zone urbaine dense interdit paradoxalement toute amélioration de ce mode de transport, par essence fortement utilisé dans ces mêmes zones.

REFERENCES

Färe, Rolf; Grosskopf, S. et Bong Joon Y.. A Theoretical and empirical Analysis of the Highway Speed-Volume Relationship. Journal of Urban Economics, vol.12, n°1. 1982. 115-121.

Gannon, Frédéric. Modèles Urbains et Politiques Urbaines Optimales. Thèse en voie d'achèvement. 1992. Paris X-Nanterre.

Vickrey, William S. Congestion Theory and Transport investment. American Economic Review, vol.59. 1969. 251-260.

Wingo, L. Transportation and Urban Land. Resources for the Future, Washington D.C. 1961.

Yinger, John. City and Suburb : Urban Models with More than one Employment Center. Journal of Urban Economics, vol.31, n°2. 1992. 181-205.