

MINISTERE DES TRAVAUX PUBLICS
ET DES TRANSPORTS

DIRECTION DES ROUTES ET DE
LA CIRCULATION ROUTIERE

LA PROGRAMMATION DES
INVESTISSEMENTS ROUTIERS
SUR UNE LIAISON

Observatoire Economique
et Statistique des Transports
DOCUMENTATION

Réf. n°

CDAT
8915 A

OCTOBRE 1964

LA PROGRAMMATION DES INVESTISSEMENTS ROUTIERS SUR UNE LIAISON

par

C. BOZON ET C. CHARMIÉL (1)

Ingénieurs des Ponts et Chaussées
Attachés à la Direction des Routes et
de la Circulation Routière

Un des facteurs essentiels du problème routier tel qu'il se pose actuellement est la croissance extrêmement brusque du trafic. Pour illustrer cette remarque, il suffit de savoir que les volumes de circulation ont doublé de 1955 à 1964 et que, de 1964 à 1985, ils tripleront, selon les prévisions actuelles. Or, les projeteurs sont souvent tentés de décider et de concevoir les aménagements en fonction des trafics recensés au moment où le problème se pose sans envisager de manière systématique ceux qu'ils seront amenés à supporter dans le futur. En effet, il est difficile de choisir a priori la date pour laquelle les aménagements doivent être calculés ; faut-il limiter l'horizon à cinq ans, dix ans, vingt ans ou plus ? La réponse à cette question ne peut être trouvée que dans une recherche commune groupant Ingénieurs et Economistes.

L'idée fondamentale de ces études est que tout aménagement effectué sur une liaison doit s'intégrer dans un plan d'ensemble, établi à partir d'une perspective de développement du trafic et fixant dans le temps et dans l'espace la nature des différents travaux à entreprendre. Au caractère dynamique de l'expansion de la circulation, il faut opposer une programmation, non pas statique, mais dynamique également. Tout aménagement doit être décidé et conçu en tenant compte, de toute évidence, des travaux qui ont déjà été exécutés, mais également en fonction de ceux qu'il faudra opérer lorsqu'il deviendra insuffisant. En d'autres termes, les investissements routiers constituent dans le temps une chaîne dont les maillons sont étroitement solidaires.

Le but de cet article est d'exposer les méthodes de calcul économique susceptibles d'être utilisées dans ce sens. D'une manière plus précise, il expose les résultats d'un modèle dont l'objectif est la recherche des solutions optimales pour l'aménagement d'itinéraires connaissant un trafic croissant dans le temps.

Soit - à titre d'exemple - une liaison constituée par une route à deux voies ayant supporté en 1960 un certain trafic ; ce trafic est susceptible de varier dans le futur suivant une perspective donnée. Le modèle a pour but de répondre aux questions suivantes :

- Faut-il envisager dans le futur la création d'une autoroute sur la liaison ?

(1) Les auteurs remercient très vivement Monsieur G. MANACH - Ingénieur des T.P.E. à la Direction des Routes qui a pris une part extrêmement importante à la mise au point du modèle exposé dans cet article.

- Si oui, quand faut-il la construire ? Cette construction est-elle le premier investissement à réaliser ? N'est-il pas meilleur de la différer et de commencer par élargir la route existante à trois ou quatre voies ?

- Si non, quel est le meilleur investissement à opérer sur la liaison ? Doit-on ou non passer directement de l'état initial au stade final ?

L'objectif de ce texte est double, méthodologique d'abord puisqu'il donne un exemple de programmation dynamique à partir des indications contenues dans l' "Instruction Provisoire sur l'exécution des calculs de rentabilité appliqués aux travaux routiers", économique ensuite puisqu'il tente de dégager à partir de cas particuliers quelques principes et résultats sur le problème des aménagements progressifs.

Dans la première section sont retracées les méthodes de calcul utilisées et sont données un certain nombre de valeurs numériques susceptibles de fournir une base à d'autres calculs du même type. La seconde section, qui peut être lue directement, vise à rassembler les résultats du modèle et à tirer les conclusions qu'ils appellent.

SECTION I

EXPOSE DE LA METHODE SUIVIE

I. Formulation théorique - -

L'Instruction Provisoire sur l'exécution des calculs de rentabilité a posé les principes permettant le choix des investissements routiers à partir de critères économiques. Le but proposé aux décisions est la recherche de la maximisation d'une fonction d'utilité collective ou - d'une manière simplifiée mais partiellement inexacte - la minimisation de l'ensemble des coûts actualisés supportés par la Collectivité dans le domaine routier, coûts d'infrastructure (investissement et entretien) et coûts de transport (fonctionnement, temps, sécurité).

Le modèle vise à appliquer ces principes sur une liaison constituée au départ par une route d'une certaine largeur et à rechercher la séquence d'aménagements à réaliser sur cette liaison pour minimiser l'ensemble des coûts actualisés. Les aménagements envisagés sont l'élargissement de la chaussée et la construction d'une autoroute parallèle de même longueur.

Pour déterminer cette séquence, il est nécessaire de se donner une perspective de trafic depuis l'instant origine jusqu'à l'infini.

Les trois étapes consistent à :

- définir les coûts des transports sur les diverses chaussées ~~différentes~~ par leur nombre de voies ou leur nature,
- calculer, en faisant intervenir le coût des travaux, les seuils de trafic justifiant les divers aménagements,
- étudier les coûts actualisés pour la Collectivité des différentes solutions et choisir la meilleure.

a) Détermination des coûts de transport

Il est possible de se donner le coût de transport kilométrique du véhicule moyen sous forme d'un polynôme en fonction de l'intensité du trafic.

Ce coût de transport comprend la dépense supportée par la Collectivité ou les usagers et correspondant aux frais de fonctionnement du véhicule (carburant, entretien, etc..), au temps de trajet (corrigé par un facteur appréciant le confort) et aux risques d'accidents. Il peut être défini en fonction du trafic horaire ou du trafic moyen journalier. On a admis qu'il s'exprime à partir du second à l'aide d'un polynôme de degré 2 dont les coefficients sont positifs. Il est donc supposé croître avec l'intensité de la circulation :

$$C_n = a_n + b_n J + d_n J^2$$

J = trafic moyen journalier sur la liaison

On pose successivement :

| | |
|-------|--------------------------|
| n = 1 | 2 voies médiocres (6 m.) |
| n = 2 | 2 bonnes voies (7 m.) |
| n = 3 | 3 voies |
| n = 4 | 4 voies |
| n = A | Autoroute libre |
| n = B | Autoroute à péage |

Ces coûts sont chiffrés à l'aide des valeurs unitaires citées dans l'Instruction et déduits de la pratique ou du comportement des usagers. Deux barèmes sont utilisés suivant que l'on raisonne sur les coûts individuels tels que les supportent les usagers ou sur les coûts collectifs qui sont dépeuplés des éléments constituant des transferts au sein de la collectivité (impôts, péage, etc..).

Aussi on est amené à définir deux sortes de coûts kilométriques :

- C_n^c coût collectif (temps, fonctionnement hors taxes, sécurité),
- C_n^i coût individuel (temps, fonctionnement, péage).

Ces seules données sont insuffisantes pour calculer les avantages apportés par l'élargissement d'une route ou la construction d'une autoroute.

Il faut, en effet, introduire le trafic induit qui se développe ex nihilo sur la liaison à la suite de la réalisation des travaux. Nous avons mesuré son volume en fonction du trafic normal de celle-ci et défini le rapport p_{nq} , pourcentage de trafic supplémentaire induit par l'aménagement d'une route de l'état "n" à l'état "q". Nous avons supposé que p_{nq} s'exprime linéairement en fonction de la différence des coûts individuels par la relation :

$$p_{nq} = g_q (C_n^i - C_q^i) + h_q$$

g_q, h_q = constantes positives dépendant de la nature de l'état "q"

(route ordinaire, Autoroute libre, Autoroute à péage).

Il est nécessaire d'étudier également les conditions suivant lesquelles le trafic de la liaison se partage entre l'autoroute et la route parallèle. On a supposé qu'un certain pourcentage de celui-ci (1) reste en tout état de cause sur la route ordinaire (trafic local) comme n'ayant pas intérêt, par suite de la distance entre les échangeurs, à emprunter l'autoroute. Le reste du trafic (1 - l) se divise entre les deux itinéraires suivant une courbe d'affectation qui fait intervenir les valeurs des coûts individuels de parcours sur chacun d'entre eux. Nous avons supposé que la fonction y_{nq} exprimant la part du trafic affecté à l'autoroute "q" doublant une route "n" s'exprime linéairement à partir de la différence des coûts individuels :

$$y_{nq} = e_q (C_n^i - C_q^i) + f_q$$

e_q, f_q = constantes positives dépendant du régime d'exploitation de l'autoroute (liberté ou péage).

A l'aide de ces fonctions, il est possible de définir les différents coûts de transport et les avantages apportés par la réalisation des travaux.

b) Détermination des seuils

Les seuils de trafic ou capacités économiques sont les volumes de circulation moyenne journalière qui justifient les aménagements. On les détermine en écrivant qu'ils sont égaux aux volumes de trafic tels que l'avantage annuel B_{nq} et le coût des travaux actualisés

K_{nq} vérifient l'équation suivante :

$$\frac{B_{nq}}{K_{nq}} = \text{taux d'actualisation}$$

En d'autres termes, les seuils de trafic sont égaux aux volumes de circulation correspondant à l'année optimale de mise en service de l'aménagement.

Ces capacités économiques sont au départ distinctes des capacités pratiques, car elles font intervenir le coût des aménagements. Elles diffèrent, en effet, suivant que l'on envisage, par exemple, de doubler une route à deux voies par une autoroute ou de l'élargir à 3 ou 4 voies (1).

i) élargissement d'une route

Soit une route aménagée de l'état "n" à l'état "q" par élargissement. Le coût collectif de transport kilométrique unitaire passe de C_n^c à C_q^c . L'avantage journalier apporté au trafic induit ($p_{nq} J$) s'exprime par la formule classique du calcul des surplus soit :

$$p_{nq} J \frac{(C_n^i + C_q^i - C_q^c)}{2}$$

L'avantage journalier apporté à la collectivité par la réalisation des travaux est alors le suivant :

$$J (C_n^c - C_q^c) + p_{nq} J \frac{(C_n^i + C_q^i - C_q^c)}{2}$$

Posons :

$$V_{nq} = C_q^c - p_{nq} \frac{(C_n^i + C_q^i - C_q^c)}{2}$$

V_{nq} est défini comme le coût de transport unitaire sur la route élargie, amputé de l'avantage économique apporté par le trafic supplémentaire. On peut, en effet, considérer cet avantage comme une réduction de coût. D'après les définitions précédentes V_{nq} est au même titre que C_n^q un polynôme en J mais de degré plus élevé.

(1) - Rappelons que la capacité pratique d'une route (exprimée en veh/j.) est défini comme le trafic annuel journalier moyen tel que les usagers ne subissent pas de gêne excessive sauf pendant les trente heures les plus chargées de l'année.

L'avantage journalier total s'exprime alors aisément sous la forme $J (C_n^c - V_{nq})$.

Le seuil de trafic correspondant (S_{nq}) est donné par la résolution en J de l'équation :

$$\alpha K_{nq} = 365 J (C_n^c - V_{nq}) \quad \alpha = \text{taux d'actualisation}$$

$$K_{nq} = \text{coûts des travaux}$$

ii) Construction d'une autoroute parallèle

Soit une route "n" doublée par une autoroute "q". Avant les travaux le coût collectif de transport unitaire était C_n^c . Calculons sa valeur après la construction de l'autoroute.

Le trafic journalier supporté par l'autoroute est égal à $J (1-l) y_{nq}$; celui restant sur la route n est $(1 - \cancel{y_{nq}} + l y_{nq}) J$. En conséquence, le coût collectif de transport kilométrique journalier sur la liaison s'exprime sous la forme :

$$J (1-l) y_{nq} C_q^c + J (1 - y_{nq} + l y_{nq}) \bar{C}_n^c$$

$$\bar{C}_n^c = \text{Coût unitaire sur la route n pour le trafic}$$

$$(1 - y_{nq} + l y_{nq}) J$$

L'avantage apporté au trafic induit se calcule de la même manière que précédemment ; il est égal à $p_{nq} J \frac{(C_n^i + C_q^i - C_q^c)}{2} (1 - 2)$

Posons :

$$W_{nq} = (1-l) y_{nq} C_q^c + (1 - y_{nq} + l y_{nq}) \bar{C}_n^c - p_{nq} \frac{(C_n^i + C_q^i - C_q^c)}{2} (1 - 2)$$

W_{nq} est alors défini comme le coût collectif de transport unitaire sur la liaison (constituée par une route "n" et une autoroute "q"), amputé de l'avantage économique apporté par le trafic supplémentaire. C'est également un polynôme en J .

L'avantage journalier total par la Collectivité est égal à $J (C_n^c - W_{nq})$. Le seuil de trafic correspondant (S_{nq}) est donné par la résolution en J de la même équation que précédemment, à savoir :

$$\alpha K_{nq} = 365 J (C_n^c - W_{nq})$$

K_{nq} = coût kilométrique de construction et d'exploitation actualisée d'une autoroute q.

Les équations précédentes permettent de calculer les diverses capacités économiques dont la connaissance est indispensable à la programmation. Elles ne suffisent pas à fonder une politique cohérente si le trafic s'accroît. En effet, la connaissance des seuils S_{2A} , S_{23} et S_{3A} par exemple, ne permet pas de savoir s'il est plus avantageux de doubler une route de 7 m. par une autoroute ou de l'élargir à 9 m. et la doubler ensuite.

La réponse précise à cette question ne peut être obtenue qu'à l'aide de bilans actualisés complets seuls susceptibles d'intégrer l'aspect dynamique de la croissance de la circulation routière.

c) Le calcul des coûts actualisés

Donnons-nous la perspective de trafic sous forme de coefficients multiplicateurs m_j du trafic J_0 de l'année origine ; le trafic de l'année j est égal à $m_j J_0$. A l'aide de cette perspective, il est aisé de calculer le coût total actualisé D relatif aux diverses solutions qui se présentent pour aménager la liaison.

Le problème est, en effet, d'étudier l'ensemble des solutions possibles pour adapter les diverses routes à la croissance du trafic et de choisir celle qui s'avère la moins onéreuse par la Collectivité. A titre d'exemple, pour une route à deux voies telle que son trafic demande en fin de période une autoroute libre, on étudiera les solutions suivantes :

- Aucun aménagement (solution de référence)
- Création de l'autoroute l'année t telle que $J_{t+1} > S_{2A}$
- Elargissement à 3 voies l'année n telle que $J_{n+1} > S_{23}$
- " " 4 voies " n' " $J_{n'+1} > S_{34}$
- Création de l'autoroute " n'' " $J_{n''+1} > S_{4A}$
- Elargissement à 4 voies l'année q telle que $J_{q+1} > S_{24}$
- Création de l'autoroute " q' " $J_{q'+1} > S_{4A}$
- Elargissement à 3 voies l'année r telle que $J_{r+1} > S_{23}$
- Création de l'autoroute " r' " $J_{r'+1} > S_{3A}$

On effectuera la même étude, le cas échéant, si le terme doit être une autoroute à péage.

- Le calcul du coût total actualisé relatif à la première solution est simple puisqu'il ne comporte que des coûts de transport. Par définition, il est égal à :

$$D = 365 \sum_0^{\infty} \frac{m_j J_0 C_2^0}{(1+r)^j}$$

ou en développant C_2^c en fonction de $J = \sum_0^t m_j J_0$

$$\frac{D}{365} = a_2^c J_0 \sum_0^t \frac{m_j}{(1+\alpha)^j} + b_2^c J_0^2 \sum_0^t \frac{m_j^2}{(1+\alpha)^j} + d_2^c J_0^3 \sum_0^t \frac{m_j^3}{(1+\alpha)^j}$$

Posons :

$$\sum_0^t \frac{m_j^u}{(1+\alpha)^j} = M_u(\infty) - M_u(t)$$

Les coefficients M ne dépendent que de la perspective de trafic ; ils simplifient grandement le calcul des coûts actualisés. On déduit en effet de leur définition :

$$\frac{D}{365} = a_2^c J_0 M_1(\infty) + b_2^c J_0^2 M_2(\infty) + d_2^c M_3(\infty)$$

- Dans le second cas, le coût total actualisé est constitué par la somme de deux termes D' et D'' .

Le premier (D') vise la réalisation des travaux et est égal à

$$\frac{K_{3A}}{(1+\alpha)^t}$$

Le second (D'') a trait aux coûts de transports

+ sur la route 2 de l'année 0 à l'année t

+ sur l'ensemble constitué par une route

2 et une autoroute libre de l'année $t + 1$ à l'année ∞

Il s'écrit :

$$\frac{D''}{365} = \sum_0^t \frac{J C_2^c}{(1+\alpha)^j} + \sum_{t+1}^{\infty} J \frac{W_{2A}}{(1+\alpha)^j}$$

Si on ordonne en J les polynômes C_2^c et W_{2A} , il est possible de calculer ses difficultés D'' à l'aide des coefficients M comme dans le cas précédent.

- Les autres cas peuvent être traités sans difficulté de la même manière. On notera cependant que l'avantage apporté pour le trafic induit devra toujours être compté par référence à la route initiale comportant deux voies.

La comparaison des divers coûts actualisés totaux au moyen de la solution de référence permet le calcul du bilan actualisé pour la collectivité (1).

La solution présentant le bénéfice actualisé le plus élevé ou le coût le plus faible sera réputée optimale.

Le but de l'exposé de cette formulation théorique est de montrer qu'au prix d'hypothèses relativement simples, le calcul de bilans actualisés est relativement aisé même si on admet, par suite de la croissance attendue de la circulation la variation des coûts de transport dans le temps et en conséquence des pourcentages variables d'induction et d'affectation de trafic.

Nous noterons enfin que la formulation pourrait être aisément généralisée pour des états de la liaison très différents. Elle pourrait être facilement adaptée en vue de l'étude de la construction progressive d'une autoroute par exemple.

(1)° coûts individuels au lieu des coûts collectifs
Si l'on somme les coûts individuels au lieu des coûts collectifs, il est possible de déduire les avantages apportés aux usagers puis, par différence avec les avantages collectifs, le bénéfice de l'Etat (réduction des accidents, impôts, péages).

II.- Calculs effectifs -

Avant d'exposer les résultats auxquels nous sommes parvenus, il paraît nécessaire de donner un aperçu sur les valeurs numériques choisies pour les différentes fonctions qui interviennent dans le modèle et que l'on a définies plus haut sous forme littérale. En effet, leur recherche exige un certain nombre d'hypothèses qu'il faut connaître pour juger la validité du modèle, tandis qu'elles constituent en elles-mêmes des résultats partiels, souvent issus de calculs assez lourds et susceptibles d'être utilisés dans d'autres études.

Nous évoquerons successivement les routes-types choisies et les aménagements permettant de passer de l'une à l'autre, puis le calcul des coûts de transport des véhicules sur ces routes et enfin, celui des fonctions d'affectation et d'induction de trafic.

a) Caractéristiques des routes et autoroutes types et coût des travaux d'aménagements correspondants -

La route étudiée est caractérisée par la largeur de sa chaussée et la distance moyenne de visibilité (paramètre d), calculée suivant les indications de l'Instruction Générale (Annexe A.) et à partir des définitions données par la Circulaire N° 1238 du 22.10.63. En fait, cette distance est la moyenne, sur la section, de la distance maximum à laquelle un oeil placé sur l'axe de la chaussée et à un mètre au-dessus peut apercevoir un obstacle de 1,30 mètre de hauteur.

Nous avons étudié une série de 4 routes types, définies de la sorte à laquelle nous avons ajouté l'autoroute libre et l'autoroute à péage :

| Type | Nombre de Voies | Largeur | Distance moyenne de visibilité |
|------|-------------------------------------------------|---------|--------------------------------|
| 1 | 2 | 6 m. | 200 m. |
| 2 | 2 | 7 m. | 300 m. |
| 3 | 3 | 9 m. | 400 m. |
| 4 | 4 | 14 m. | 500 m. |
| A | Autoroutes libres à deux voies dans chaque sens | | |
| B | " à péage " " " " " | | |

On remarquera que, dans cette énumération, ne figure pas la route de trois voies de 10,5 m. de large. Il a paru inutile d'alourdir le modèle par la considération de routes-types trop nombreuses et, en l'occurrence, préférable de choisir comme exemple de routes à trois voies, la route de 9 m. qui peut être facilement obtenue sans travaux considérables à partir d'une route de 7 m.

La route de type 1 doit être considérée comme une médiocre route à deux voies, à caractéristiques faibles et à tracé ancien, nécessitant le ralentissement des véhicules qui se croisent et rendant difficile les dépassements. La route de type 2 est, au contraire, une route moderne, présentant une visibilité suffisante et autorisant d'assez nombreux dépassements. La route de type 3 est une route à trois voies de caractéristiques moyennes, tandis que le type 4 présente toutes les qualités possibles d'une voie non autoroutière.

Nous avons admis que sur les routes types, le pourcentage d'agglomérations traversées est de 20 %, la vitesse en agglomération variant avec la nature de la route et le débit. Ce chiffre a été choisi d'après l'étude d'un certain nombre d'itinéraires. Il est assez élevé et laisse supposer que les routes considérées traversent des régions assez peuplées.

Les travaux, permettant de passer d'un type de route à un autre, ont été chiffrés sur une longueur d'1 km. Ils comportent l'élargissement du profil en travers, ^{et} dans le but d'accroître la distance de visibilité, la rectification du tracé en plan. Ils n'entraînent aucun changement dans la longueur de la section de route étudiée.

La modification du profil en travers est opérée sur 800 m. pour deux routes-types de numéros voisins et la rectification sur 200 m. La première demande :

- éventuellement l'acquisition de terrains
- la constitution d'une chaussée de part et d'autre de la chaussée existante d'une largeur égale à la moitié de l'élargissement.
- la réalisation d'accotements dérasés,
- l'élargissement des ouvrages d'art et des ouvrages sous-chaussée,
- le revêtement de l'ensemble de la chaussée d'un tapis d'enrobés de 0,06 m. d'épaisseur.

La rectification du tracé en plan implique la construction d'une route entièrement neuve.

Les prix unitaires utilisés pour le calcul des détails estimatifs de ces travaux résultent d'une étude des marchés de travaux publics d'un montant supérieur à 500.000 F. , passés au cours des années 1962-63. Les résultats ont été recoupés par des sondages parmi les travaux analogues réalisés au titre du 3^o programme F.S.I.R. (1962-65).

Les coûts kilométriques des travaux d'aménagements ainsi définis sont les suivants :

COUT DES TRAVAUX (par km.)

| Nature des travaux | % de tracé nouveau | Coût (F) |
|----------------------------------------------------|--------------------|-----------|
| 1 → 2 (Elargissement et rectification de 6 à 7 m.) | 20 % | 295.000 |
| 1 → 3 (" " à 9 m.) | 40 % | 582.000 |
| 1 → 4 (" " à 14 m.) | 60 % | 1.080.000 |
| 2 → 3 (Elargissement de 7 à 9 m.) | 20 % | 400.500 |
| 2 → 4 (" " à 14 m.) | 40 % | 995.000 |
| 3 → 4 (Elargissement de 9 à 14 m.) | 20 % | 760.000 |

Ils supposent les coûts kilométriques suivants pour la construction de routes neuves :

| | |
|--------------------|--------------|
| Route de 7 m. | 650.000 F/km |
| " " 9 m. | 810.000 " |
| " " 14 m. | 1.275.000 " |

On remarquera qu'il est évidemment plus onéreux de procéder à des aménagements par étapes qu'à des aménagements directs. A titre d'exemple, le coût du passage de la route 1 à la route 3 est de 695.000 ou de 582.500 suivant que l'on utilise ou non l'intermédiaire de la route 2. Ceci semble en bon accord avec la pratique ; dans le cas présent, la différence est due à l'exécution répétée de certains travaux (enrobés, stabilisation des accidents, etc...) et à la réalisation d'ouvrages rendus inutiles par un passage direct (cf. l'élargissement d'une section devant être abandonnée lors de l'étape ultérieure).

Le coût moyen du kilomètre d'autoroute de liaison, à deux voies dans chaque sens, libre de péage, a été fixé à 3.500.000 F. celui de l'autoroute à péage a été supposé égal à 3.650.000 F. par inclusion d'une majoration de 150.000 F. pour la construction des postes de péage.

A ces coûts de construction, on a ajouté des charges d'entretien et de renouvellement actualisés, évaluées à 200.000 F/km. et des charges d'exploitation seulement pour l'autoroute à péage, remontant à 150.000 F./km.

Le coût total de l'autoroute ressort en définitive à :

| | |
|-----------------------|----------------|
| Autoroute libre (A) | 3.700.000 F/km |
| Autoroute à péage (B) | 4.000.000 F/km |

b) Détermination des coûts de circulation -

Pour la commodité des calculs, il a été substitué aux véhicules légers (catégorie o à f du recensement de la Circulation en 1960) et aux véhicules lourds (catégories g à j), un véhicule moyen dont les caractéristiques sont 9/10 èmes celles d'un véhicule léger et pour 1/10 ème celle d'un véhicule lourd. Les éléments constitutifs des coûts de circulation, définis en valeur individuelle, et en valeur collective, doivent être calculés séparément pour un véhicule léger et pour un véhicule lourd, puis pondérés pour obtenir les coûts de circulation du véhicule moyen.

Les éléments unitaires constitutifs des coûts de circulation qui ont été retenus sont les suivants :

- temps de parcours moyen et congestion
- consommation de carburant et usure du véhicule
- sécurité, bonus, péage

Les valeurs numériques unitaires ont été empruntées à l'Instruction Provisoire déjà citée. Ainsi, la valeur du temps a été prise de 8 F. l'heure pour les véhicules légers et de 15 F. pour les véhicules lourds. Le prix de l'essence ordinaire est de 0,35 F. et de 0,98 F. le litre respectivement en valeur collective et individuelle. De même, celui du gas-oil, y compris l'huile, est de 0,397 F. et de 0,757 F. le litre. Le coût de l'accident corporel est fixé 30.000 F.

La détermination effective des coûts a été opérée comme suit :

1) temps de parcours moyen et congestion-

On montre, en annexe, au prix de certaines hypothèses, que le coût de circulation doit contenir deux éléments qui font intervenir le temps .

Le premier terme - dit terme principal - se calcule d'après la vitesse moyenne des véhicules. Dans le cas présent, il a été déterminé d'après les équations suivantes donnant la vitesse moyenne des véhicules légers (km/h.) en fonction du trafic moyen journalier :

$$\begin{aligned} \text{Route 1} & - V = 60 & - 1,01 \cdot 10^{-3} J & - 68,9 \cdot 10^{-9} J^2 \\ \text{" 2} & - V = 73 & - 0,77 \cdot 10^{-3} J & - 68,9 \cdot 10^{-9} J^2 \\ \text{" 3} & - V = 81 & - 0,73 \cdot 10^{-3} J & - 26,7 \cdot 10^{-9} J^2 \\ \text{" 4} & - V = 86,5 & - 0,35 \cdot 10^{-3} J & \end{aligned}$$

$$\text{Autoroute } V = 90 \text{ km/h.}$$

et d'après la relation ci-dessous donnant la vitesse des véhicules lourds en fonction de celle des véhicules légers (km/h) :

$$V_{PL} = V_{VL} - 1,42 \cdot 10^{-3} V_{VL}^2 - 23,4 \cdot 10^{-6} V_{VL}^3$$

Le deuxième terme - dit terme secondaire - se déduit du resserrement de l'éventail des vitesses possibles sur la route considérée. En effet, la congestion de certains itinéraires, qui oblige tous les usagers à circuler à la même vitesse introduit un coût supplémentaire pouvant se calculer à l'aide d'un coefficient figurant leur degré de congestion (cf. Annexe. Définition et calcul du coût de la congestion).

ii) Carburant et fonctionnement -

Les consommations de carburant ont été calculées d'après les formules données par l'Instruction Générale. Toutefois, pour tenir compte des conditions de circulation plus favorables sur autoroute, on a admis une réduction de 10 % par rapport à la consommation ainsi calculée. A l'opposé, pour intégrer les ralentissements et arrêts dans les traverses d'agglomérations, on a majoré de 20 % la consommation.

Les frais correspondant à l'usure et au fonctionnement du véhicule ont été comptés à 0,040 F/km pour le véhicule particulier et à 0,149 F/km pour le véhicule lourd y compris les pneumatiques.

iii) Sécurité, Bonus, Peage -

Le taux d'accident supposé sur les routes -types est de 124 accidents pour 100 millions de veh.km et de 45 seulement sur autoroutes. Le coût des accidents corporels correspond alors à une dépense de 0,0282 F/veh.km, sur les routes types et de 0,0135 sur autoroute (1).

Le supplément de confort apporté aux usagers lorsqu'ils circulent sur autoroute a été pris égal à 0,03 F/km pour les véhicules légers et les véhicules lourds. Il a été soustrait des coûts correspondants, individuels et collectifs.

Le taux de péage a été supposé de 0,05 F./km pour le véhicule moyen.

A l'aide de ces différentes valeurs numériques, il est aisé de déterminer le coût de circulation kilométrique du véhicule moyen - en valeur collective et individuelle - sur chacune des routes choisies. Les expressions analytiques correspondantes sont les suivantes :

(1) On notera, en particulier, que l'élargissement des chaussées n'a pas été supposé accroître la sécurité. Les variations des taux d'accident, suivant la largeur des routes, ne sont pas, en effet, suffisamment significatives : ainsi la route à 3 voies, si elle n'est pas saturée, n'apparaît pas plus dangereuse que la route à 4 voies.

- valeur individuelle (en F.).

$$\begin{aligned} \text{Route 1} & - C_1^i = 0,2757 + 4 \cdot 10^{-6} J + 2,50 \cdot 10^{-10} J^2 \\ \text{" 2} & - C_2^i = 0,2503 + 1,50 \cdot 10^{-6} J + 1,67 \cdot 10^{-10} J^2 \\ \text{" 3} & - C_3^i = 0,2468 + 0,376 \cdot 10^{-6} J + 1,09 \cdot 10^{-10} J^2 \\ \text{" 4} & - C_4^i = 0,2440 + 0,195 \cdot 10^{-6} J \end{aligned}$$

$$\text{Autoroute A } C_A^i = 0,2085$$

$$\text{" B } C_B^i = 0,2585$$

- valeur collective (en F.).

$$\begin{aligned} \text{Route 1} & - C_1^c = 0,2640 + 3 \cdot 10^{-6} J + 4 \cdot 10^{-10} J^2 \\ \text{" 2} & - C_2^c = 0,2400 + 10^{-6} J + 2 \cdot 10^{-10} J^2 \\ \text{" 3} & - C_3^c = 0,2270 + 1,05 \cdot 10^{-6} J + 0,95 \cdot 10^{-10} J^2 \\ \text{" 4} & - C_4^c = 0,2190 + 0,440 \cdot 10^{-6} J \end{aligned}$$

$$\text{Autoroute A } C_A^c = 0,1721$$

$$\text{" B } C_B^c = 0,1721$$

Les graphiques 1 et 2 illustrent ces équations .

Ces coûts visent des parcours effectués entièrement hors agglomération, bien que l'on ait supposé précédemment que 20 % de ces parcours avait lieu en traverse. Pour introduire cette hypothèse, on a admis que la traversée des agglomérations se fait à des vitesses différentes de celles données plus haut et ajouté aux coûts définis ci-dessus des suppléments de coûts, comprenant les 4 termes principaux (temps - consommation - usure - sécurité) et variant avec la vitesse suivant l'intensité du trafic :

$$\text{Soit } S_1 = 0,0079 + 0,0021 J \quad (\text{F/veh-km})$$

$$S_0 = 0,0089 + 0,0018 J \quad (\text{ " " })$$

Ces suppléments ont été calculés en supposant que les vitesses en agglomération sur une route à 4 voies varient linéairement de 50 à 30 km/h. quand le trafic passe de 0 à 20.000 veh./j.

e) affectation et induction de trafic -

Le trafic sur les routes-types est supposé comprendre un pourcentage $1 = 25\%$ de trafic local non susceptible de transiter sur l'autoroute parallèle. Ce chiffre peut sembler assez élevé ; il est en relation avec la proportion importante du trajet effectuée en agglomération. D'après le résultat des enquêtes de circulation réalisées sur les N. 7 (Vienne-Valence) et 83/422 (Strasbourg-Bâle), ce chiffre suppose un écartement de l'ordre de 20 km entre les échangeurs de l'autoroute, ce qui apparaît parfaitement raisonnable.

L'affectation du trafic entre deux itinéraires repose sur l'étude des coûts individuels de parcours, tels qu'ils résultent des données précédentes. Dans le modèle, l'aménagement n'apporte aucune réduction de longueur des trajets. L'affectation se calcule donc sur les coûts unitaires. On a utilisé la méthode exposée par C. ABRAHAM dans la Revue Générale des Routes (1). et exploité la courbe qui y est donnée pour l'affectation de trafic en fonction du rapport des coûts de circulation.

Cependant, la nécessité d'exprimer cette affectation par une fonction linéaire de la différence des coûts a conduit à la remplacer par deux droites. La première intéresse les cas où les coûts individuels sur les deux itinéraires sont voisins et en particulier, le cas de l'autoroute à péage. Elle s'écrit :

$$y_{nB} = 0,077 \left(\bar{c}_n^i - C_B^i \right) + 0,500$$

La seconde vise le cas où les coûts individuels sont très différents et en particulier celui de l'autoroute libre, moins coûteuse pour l'utilisateur que la route parallèle (2).

$$y_{nA} = 0,015 \left(\bar{c}_n^i - C_A^i \right) + 0,803$$

(1) "La répartition du Trafic entre Itinéraires concurrents". Revue Générale des Routes N° 357 - Octobre 1961.

(2) L'expression \bar{c}_n^i , intéressant les formules d'affectation, représente le coût de transport sur la route parallèle, lorsqu'elle supporte le trafic qui lui est affecté.

Au contraire, dans les formules d'induction de trafic, intervient l'expression C_n^i qui figure le coût de transport lorsque la route parallèle supporte tout le trafic de la liaison.

L'application de ces deux formules, aux différents cas possibles, a conduit à tracer les courbes figurant sur le graphique 3 et donnant, en fonction du trafic total de la liaison, le pourcentage y de ce trafic - déduction faite du trafic local - transitant sur l'autoroute. On remarquera que l'affectation est très sensible au volume du trafic dans le cas de l'autoroute à péage ; en effet, de faibles variations du coût individuel sur la route parallèle suffisent à déplacer l'équilibre entre les deux itinéraires qui présentent approximativement le même coût. Le résultat est inverse dans le cas de l'autoroute libre et le volume de trafic influe très peu sur l'affectation.

On notera ainsi l'influence du péage qui agit différemment suivant le type de la route parallèle ; il constitue un facteur d'évasion très considérable si l'autoroute double une route à 4 voies et beaucoup plus modeste si elle longe une chaussée de 6 m.

Le volume du trafic induit qui se développe sur la liaison à la suite de la construction d'une autoroute, a été calculé en application de la courbe établie par C. ABRAHAM et donnée par points dans le même article. De même que pour l'affectation de trafic, il a été nécessaire de transformer cette courbe, établie primitivement, en fonction du rapport des coûts individuels avant et après aménagements, afin de l'exprimer sous forme linéaire de leur différence. Ainsi, a-t-on calculé, comme précédemment, deux formules dont les plages de validité sont différentes.

Dans le cas de la création d'une autoroute à péage, l'expression donnant le pourcentage du trafic induit rapporté au trafic de la liaison est la suivante :

$$P_{nB} = 0,036 (C_n^i - C_B^i) + 0,198$$

dans le cas d'une autoroute libre :

$$P_{nA} = 0,013 (C_n^i - C_A^i) + 0,290$$

et dans le cas d'un aménagement sur place :

$$P_{nq} = 0,036 (C_n^i - C_q^i)$$

On verra plus bas que ces formules impliquent pour le trafic induit un volume parfois considérable. De l'ordre de 20 à 30 %, lors de la création d'une autoroute à péage, il atteint 40 % à la suite de la construction d'une autoroute libre. Il est beaucoup moindre après l'aménagement des routes-types et ne dépasse qu'exceptionnellement 10 %. D'une manière générale, il est très sensible à l'état antérieur de la liaison et varie largement suivant que l'autoroute double une route à 2 - 3 ou 4 voies.

La connaissance de ces différentes valeurs numériques a permis d'effectuer les calculs décrits lors de la formulation théorique et en particulier d'évaluer, en fonction du volume de trafic de la liaison, l'avantage global procuré à la collectivité lors des différents aménagements possibles.

SECTION II

RESULTATS ET CONCLUSIONS

I. - Les résultats du modèle -

Les résultats du modèle seront présentés en distinguant d'une part l'enseignement qu'il apporte dans le domaine des capacités économiques, c'est-à-dire des seuils de trafic justifiant les divers aménagements possibles, et d'autre part, les conclusions qu'il permet de tirer de l'étude des bilans actualisés en vue de la détermination de la séquence optimale d'investissements à opérer sur une liaison.

a) les seuils de trafic -

Lors de la formulation théorique, nous avons écrit l'expression permettant de calculer l'avantage annuel apporté à la collectivité par l'aménagement d'une route type de l'état "n" et l'état "q", soit :

$$B_{nq} = 365 J (C_n^o - V_{nq})$$

: J. Trafic moyen journalier
: C_n^o Coût collectif de transport (par veh./km) sur la route "n"
: V_{nq} Coût collectif de transport (par veh./km) de la route "q" corrigé par l'avantage apporté au trafic induit.

Cet avantage justifie la mise en service, l'année à laquelle il est calculé, d'un aménagement de coût $\frac{1}{\dots} B_{nq}$ (taux d'actualisation).

De même, la construction d'une autoroute "q" doublant une route "n" apporte à la collectivité un avantage annuel s'exprimant par :

$$B_{nq} = 365 J (C_n^o - W_{nq})$$

: W_{nq} Coût collectif de transport (par véh./km) sur la liaison corrigé par l'avantage apporté au trafic induit sur l'autoroute.

et rentabilisant la mise en service d'une autoroute de coût actualisé

$B_{nq} \cdot \frac{1}{\dots}$

Les graphiques 4 à 7 donnent la valeur des investissements justifiés par la circulation, en fonction du trafic journalier moyen, ceci pour les deux taux de rentabilité immédiate de 7 et 12 %.

Leur utilisation dépasse largement le cadre du modèle puisqu'ils permettent de déterminer, par simple lecture, les seuils de trafic rentabilisant les investissements en fonction de leur coût. Ils intéressent particulièrement l'Ingénieur qui en déduit la date à laquelle les travaux qu'il préconise, doivent être exécutés. On remarquera que les seuils de trafic varient sensiblement avec le coût des travaux puisque, par exemple, une autoroute à péage doublant une route 2 est - pour le taux de rentabilité immédiate de 12 % - justifiée par 9.800 veh./j. si elle coûte 3 millions km, et par 12.700 véh./j., si elle en vaut 5.

Si au contraire, on se donne le coût des travaux K_{nq} à partir de l'évaluation qui en a été faite précédemment, il est possible de déterminer la relation entre le taux de rentabilité immédiate supposé maintenant variable et le volume du trafic rentabilisant l'investissement à ce taux.

Les graphiques 8 et 9 expriment ces résultats et figurent le trafic journalier moyen justifiant l'aménagement en fonction du taux de rentabilité immédiate défini par $\frac{B_{nq}}{K_{nq}}$. Ils sont d'un intérêt tout particulier pour l'Economiste, puisqu'ils lui permettent, par simple lecture, de déterminer le taux de rentabilité immédiate des investissements qui sont effectués au même instant, ou inversement, de calculer les capacités économiques des différentes routes les unes par rapport aux autres, pour le taux d'actualisation de 7 % retenu par le Commissariat du Plan.

En particulier, ces derniers graphiques nous renseignent sur les seuils de trafic issus du modèle pour les deux taux de rentabilité immédiate choisis. Le taux de 7 %, égal au taux d'actualisation, constitue une hypothèse de suffisance des crédits ; le taux de 12 % reflète une situation de pénurie. Ces seuils sont indiqués dans le tableau ci-dessous où figurent également les pourcentages de trafic induit par l'investissement et - éventuellement - le coefficient d'affectation à l'autoroute.

| Nature des Travaux | : Taux de rentabilité immédiate : égal à 7 % - crédits suf- : fisants - | | : Taux de rentabilité immédiate égal à 12 % : - Crédits insuffisants - | |
|-------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| | : seuil de :affectation :trafic : trafic :de trafic (y):induit (p) : (veh/j) : (%) : (%) | : seuil de :affectation :trafic : trafic :de trafic (y) : : (veh/j.) : (%) : | : seuil de :affectation :trafic : trafic :de trafic (y) : : (veh/j.) : (%) : | : seuil de :affectation :trafic : trafic :de trafic (y) : : (veh/j.) : (%) : |
| 1 → 2 (Elargissement de 6 à 7 m) | : 1.800 | : 11,2 | : 2.800 | : 12,2 |
| 1 → 3 (" " à 9 m) | : 2.300 | : 14,0 | : 3.600 | : 16,2 |
| 1 → 4 (" " 14 m) | : 3.200 | : 17,2 | : 4.700 | : 20,4 |
| 1 → 1 + A (Construction d'une auto- route libre doublant une rou- te 1) | : 5.300 | : 93,1 | : 7.500 | : 47,1 |
| 1 → 1 + B (Construction d'une auto- route à péages) | : 5.800 | : 80,7 | : 8.000 | : 45,5 |
| 2 → 3 (Elargissement de 7 à 9 m) | : 4.800 | : 4,7 | : 6.800 | : 6,0 |
| 2 → 4 (" " 14 m) | : 5.800 | : 7,3 | : 8.000 | : 16,3 |
| 2 → 2 + A (Construction d'une autorou- te libre doublant une rou- te 2) | : 7.000 | : 89,1 | : 9.800 | : 42,7 |
| 2 → 2 + B (Construction d'une autorou- te à péages) | : 8.500 | : 64,7 | : 11.400 | : 35,4 |
| 3 → 4 (Elargissement de 9 à 14 m) | : 7.800 | : 4,8 | : 10.200 | : 6,0 |
| 3 → 3 + A (Construction d'une autorou- te libre doublant une rou- te 3) | : 7.900 | : 88,3 | : 11.200 | : 40,5 |
| 3 → 3 + B (Construction d'une autorou- te à péages) | : 9.800 | : 58,6 | : 13.300 | : 30,2 |
| 4 → 4 + A (Construction d'une autorou- te libre doublant une rou- te 4) | : 9.800 | : 87,9 | : 13.300 | : 33,1 |
| 4 → 4 + B (Construction d'une autorou- te à péages) | : 12.800 | : 56,1 | : 17.500 | : 25,3 |

Ces résultats appellent un certain nombre d'observations. On notera d'abord que deux d'entre eux, S_{23} fixé à 4.800 veh./j. et S_{34} fixé à 7.800 veh./j. (dans l'hypothèse²³ de suffisance des crédits), coïncident avec les capacités techniques respectives des routes à 2 voies (7 m.) et à 3 voies, déterminées depuis fort longtemps aux U.S.A. (1). Les calculs économiques permettent donc de préciser les capacités antérieurement connues, en particulier de mettre en lumière leur caractère relatif, et surtout d'enrichir considérablement les critères techniques par la détermination de tous les seuils possibles. Ainsi, la route à 2 voies (7 m.) par exemple, possède-t-elle plusieurs capacités économiques suivant que l'on envisage son élargissement à 3 ou 4 voies, ou son doublement par une autoroute libre ou à péage. Si les crédits sont suffisants, les chiffres oscillent entre 4.800 et 8.500 veh./j. Dans le second cas, la capacité technique est évidemment dépassée, ce qui n'a rien de critiquable en soi puisque cette capacité - on le sait - ne constitue pas un maximum, mais une limite au delà de laquelle les usagers supportent une certaine gêne.

Les seuils de trafic justifiant la construction d'une autoroute sont très variables, même au sein d'une même hypothèse de crédits. Dans le cas d'une autoroute libre, ils varient entre 5.300 et 9.800 veh./j. (crédits suffisants) suivant que l'on double une route de type 1 ou de type 4. La date optimale de mise en service est donc très largement fonction de la nature de la liaison.

Les seuils autoroutiers dépendent également du régime d'exploitation de l'autoroute. Celle-ci se révèle nécessaire le long d'une route à 4 voies pour 9.800 veh./j. si elle doit être libre, et pour 12.800 veh./j. (crédits suffisants) si l'on y prévoit un péage. La perception de droits recule sensiblement l'année optimale de mise en service de l'ouvrage ; la construction d'une autoroute à péage est toujours moins urgente que celle d'une autoroute libre.

On remarquera enfin que les seuils varient très sensiblement suivant la situation financière : la pénurie conduit à repousser les aménagements de plusieurs années. Nous verrons plus bas qu'au même titre que le péage, elle conduit souvent à en modifier la nature.

La diversité de ces seuils, dont la plupart se chevauchent, montre qu'ils sont impuissants en régime dynamique à fonder une politique et qu'il faut chercher dans l'étude de bilans actualisés une doctrine en la matière.

(1) La coïncidence exacte résulte en fait d'un ajustement très faible portant sur le coût des aménagements et ne dépassant pas quelques %.

b) La détermination des dépenses optimales d'investissement -

Le calcul de bilans actualisés suppose d'abord une perspective de trafic exprimant sa croissance de l'année origine à l'année l'horizon. Nous avons admis les coefficients multiplicateurs suivants :

| | | | |
|-------------|------|-------------|------|
| Trafic 1960 | 1,00 | Trafic 1980 | 3,40 |
| " 1965 | 1,59 | " 1985 | 4,00 |
| " 1970 | 2,19 | " 1990 et | |
| " 1975 | 2,80 | au-delà | 4,50 |

Cette perspective fixe un horizon relativement rapproché puisque la croissance de la circulation devrait en fait se poursuivre au delà de 1990, mais il a semblé difficile de s'aventurer plus loin. Aussi, cette perspective apparaît-elle prudente bien que la prise en compte du trafic induit puisse, dans certains cas, conduire à des coefficients multiplicateurs de l'ordre de 7 pour l'année horizon.

Connaissant le trafic supporté en 1960 et la nature de la route, il est facile d'imaginer les diverses séquences possibles pour son aménagement, en fonction des seuils de trafics tels qu'ils ont été déterminés. Le choix de la meilleure solution s'obtient, ainsi qu'il a été exposé, en calculant pour chacune d'elles la somme actualisée des coûts des travaux et des coûts de circulation de l'année 1961 à une année très éloignée, puis en déterminant le bénéfice actualisé par comparaison avec la solution de référence. ne comportant, par hypothèse, aucun investissement.

Les calculs ont été opérés dans un assez grand nombre de cas, caractérisés d'une part au moyen du type de la route assurant la liaison en 1960 et d'autre part, au moyen du volume de trafic supporté à cette date.

Il a paru nécessaire d'effectuer ces calculs dans deux alternatives conduisant à quatre options :

1) la première vise le dilemme suivant : "une éventuelle autoroute serait-elle à péage sur la liaison ? . Elle introduit deux cas qu'il faut séparer au départ puisque la perception de peages est uniquement une décision politique. Les seuils de passage sont différents dans l'un et l'autre cas de même que les coûts.

ii) La seconde consiste en une hypothèse sur le volume des crédits octroyés à la Route ou plus exactement quant à l'attitude prise à son égard par les responsables de la politique économique. Nous avons étudié deux cas pour lesquels le taux de rentabilité immédiate des investissements routiers, fixé d'abord à 7 % puis à 12 %, reste invariable dans le temps.

Dans le premier cas, les taux de rentabilité immédiate et d'actualisation sont égaux, ce qui revient à supposer que la route connaît des crédits suffisants, c'est-à-dire que l'Etat apprécie de la même manière les coûts de transports supportés par les usagers et le coût des travaux éventuels.

On imagine dans le second cas, caractérisé par l'écart entre les deux taux, que l'Etat apprécie différemment les coûts de transports et le coût des travaux et que, dans ses choix, il majore consciamment les seconds dans la proportion de $12/7 = 1,71$. Ceci signifie qu'il totalise les coûts de circulation à leur valeur réelle et les coûts d'investissements à une valeur fictive supérieure de 71 % à la valeur réelle. Ce raisonnement est celui que l'on peut dégager en période d'insuffisance de crédits; il conduit en définitive à n'investir 1 F. que si l'avantage attendu est de 1,71.

Il serait fastidieux de développer intégralement les résultats auxquels nous sommes parvenus. Nous nous bornerons à donner un exemple et à reproduire des graphiques qui, issus de ces calculs, permettent de déterminer dans tous les cas possibles, la séquence optimale.

Dans le cas d'une route de type 2 (7 m.) ayant supporté 2.000 veh./j. en 1960, les différentes solutions se présentent de la manière suivante :

Classement des programmes possibles
d'après les bénéfices actualisés décroissants (Millions de F.)
(Route 2 - Trafic 1960 = 2.800 veh.j/.)

A - L'autoroute serait libre sur la liaison

Credits suffisants (7 %)

Crédits insuffisants (12 %)

| | | | |
|-------|------|-----------|------|
| 1) | 1974 | 2 → 2 + A | 1,31 |
| ii) | 1967 | 2 → 3 | |
| | 1977 | 3 → 3 + A | 1,25 |
| iii) | 1970 | 2 → 4 | |
| | 1982 | 4 → 4 + A | 1,11 |
| iiii) | 1967 | 2 → 3 | |
| | 1976 | 3 → 4 | |
| | 1982 | 4 → 4 + A | 1,05 |

| | | | |
|-------|------|-----------|------|
| i) | 1977 | 2 → 4 | 0,67 |
| ii) | 1982 | 2 → 2 + A | 0,43 |
| iii) | 1973 | 2 → 3 | |
| | 1984 | 3 → 4 | 0,42 |
| iiii) | 1973 | 2 → 3 | |
| | 1985 | 3 → 3 + A | 0,39 |

B - L'Autoroute serait à péage sur la liaison -

| | | | |
|-------|------|-----------|------|
| i) | 1970 | 2 → 4 | 0,81 |
| ii) | 1978 | 2 → 2 + B | 0,77 |
| iii) | 1967 | 2 → 3 | |
| | 1983 | 3 → 3 + B | 0,76 |
| iiii) | 1967 | 2 → 3 | |
| | 1976 | 3 → 4 | 0,75 |

| | | | |
|------|------|-----------|------|
| i) | 1977 | 2 → 4 | 0,50 |
| ii) | 1973 | 2 → 3 | |
| | 1984 | 3 → 4 | 0,42 |
| iii) | 1986 | 2 → 2 + B | 0,10 |

Ce tableau appelle quelques observations : les unes ont trait à la nature et à l'ordre relatif des différents programmes et d'autres visent le volume des bénéfices actualisés.

Les options modifient d'abord la nature même des programmes en compétition ; plusieurs seuils, $S_4 A$ et $S_3 B$, en l'occurrence, seront atteints en 1990 dans certains cas et non dans d'autres. Ceci implique, des stades terminaux différents de la liaison d'une option à l'autre et réagit sur la contexture des séquences. L'ordre de classement est également changé. Le péage a, pour conséquence, d'éloigner la solution autoroutière sans influencer sur les séquences ne comportant pas la construction d'une autoroute : ainsi, pour un taux de rentabilité immédiate de 7 %, la solution 2 \rightarrow 2 + A, figure-t-elle en première place et la solution 2 \rightarrow 2 + B à la seconde, derrière la mise à quatre voies (1). L'insuffisance des crédits affecte toutes les séquences et rétrograde celles qui comportent de gros investissements, particulièrement des autoroutes : dans le cas B, la solution 2 + B perd un rang.

Il est intéressant d'étudier plus en détail l'influence du péage et de l'insuffisance des crédits sur les programmes. Le premier implique une diminution très importante du bénéfice actualisé des séquences comportant une autoroute, allant dans le cas présent de 35 à 75 %, tandis que la seconde joue un rôle analogue et ampute parfois un pourcentage supérieur du bénéfice actualisé. La conséquence est que les solutions optimales dans les deux cas extrêmes (A 7 % et B - 12 %), différentes par leur nature puisque l'une suppose la création d'une autoroute en 1974 et l'autre un aménagement à 4 voies en 1977, présentent des bénéfices actualisés très éloignés (1,31 et 0,50 millions)

(1) Nous avons recherché si la suppression du péage à la fin de la durée de la concession - supposée en l'occurrence très courte (15 ans) - n'est pas susceptible de replacer la solution 2 + B en première place. En fait, il n'en est rien, car le retard pris en différant la construction de l'autoroute est trop important. Cette observation est tout à fait générale et a été vérifiée dans tous les cas.

En résumé, la perception de péages et le choix d'un taux de rentabilité immédiate élevé, impliquent, au prix d'un allègement sensible des dépenses de l'Etat, une perte assez considérable pour la collectivité, entièrement supportée par les usagers.

Les graphiques 10 à 13 explicitent, pour les quatre opérations, les séquences optimales. Leur lecture est simple puisqu'il suffit de tracer une horizontale correspondant au volume de trafic supporté en 1960, d'étudier ses intersections avec les courbes relatives à la route type considérée et lire en abscisse la date optimale des différents aménagements. On peut regretter que ces graphiques soient au nombre de quatre et que par la force des choses, ils donnent des indications contradictoires. Il importe cependant de remarquer que le choix entre l'autoroute libre et l'autoroute à péage est généralement prévisible par les Ingénieurs sur les sections en cause d'après l'orientation actuelle, prévoyant le péage sur toutes les autoroutes de liaison. Le choix entre les deux hypothèses visant le taux de rentabilité immédiate est évidemment plus délicat. Nous verrons plus bas, que la situation actuelle est, sans discussion possible caractérisée par l'insuffisance des crédits et que, vu l'ampleur des besoins à naître dans le futur, elle risque de se prolonger encore longtemps dans l'avenir.

II - Les conclusions du modèle -.

Les résultats précédents impliquent des conclusions à la fois qualitatives et quantitatives. Il est d'abord possible de dégager l'enseignement du modèle en étudiant la nature des séquences d'investissement jugées optimales et en précisant, au sein de celles-ci, le rôle de chaque type de route. Il est ensuite permis d'étudier les valeurs numériques auxquelles il conduit et d'en déduire des indications sur le coût de développement du réseau routier dans les différentes hypothèses.

a) L'orientation générale des résultats -

Le tableau ci-dessous reprend les résultats les plus caractéristiques, dans les options extrêmes seulement et permet de dégager leur orientation générale.

| Type de la route | Trafic 1960 | Solutions optimales | |
|------------------|-------------|-----------------------------------|----------------------------|
| | | Pas de péage - Crédits suffisants | Péage-Crédits insuffisants |
| 1 | 1.300 | 1 → 2 → 3 | 1 → 2 |
| 1 | 1.800 | 1 → 3 → 4 | 1 → 3 |
| 2 | 2.800 | 2 → 2 + A | 2 → 4 |
| 2 | 3.800 | 2 → 2 + A → 3 + A | 2 → 4 |
| 3 | 7.800 | 3 → 3 + A → 4 + A | 3 → 3 + B → 4 + B |

La première conclusion est relativement surprenante : lorsqu'une autoroute est prévue à long terme sur une liaison, elle est presque toujours le premier investissement à opérer. Le modèle déconseille l'élargissement des routes à fort trafic, effectué dans le but de retarder la construction de l'autoroute ; au contraire, il propose cette construction en première étape et conseille ensuite l'élargissement de la route parallèle que le trafic remanent exige en règle quasi générale. Ce schéma conduit évidemment à la saturation de cette route dans l'attente de l'autoroute, mais il implique une utilisation plus rationnelle de l'infrastructure, car il réduit la sous-utilisation de la route parallèle lors des premières années de service de l'autoroute ; lorsqu'il s'agit d'une route à 3 ou 4 voies. Cette sous-utilisation est en effet à la source d'importantes pertes économiques.

D'une manière plus générale, le modèle - quelles que soient les options - repousse les aménagements trop progressifs, sauf pour les routes de faible trafic (1). Le nombre des états intermédiaires ne dépasse pas l'unité et le plus souvent est nul. Il faut, dans la plupart des cas, dimensionner dès le départ l'aménagement pour un trafic voisin du trafic de l'année horizon. C'est évidemment une conclusion qui surprend l'Economiste habitué à imaginer des transformations marginales mais qui - au contraire - satisfait l'Ingénieur souvent enclin à voir grand.

Cette conclusion paraît à première vue inquiétante pour le Financier, puisqu'elle conduit à effectuer en première étape de très grands travaux. Il ne faut cependant pas oublier que le respect de l'année optimale de mise en service amène à repousser dans le temps les travaux onéreux. Si l'élargissement d'une route de deux voies à trois voies demande à être opéré en 1968, par exemple, le doublement direct de la même route à deux voies par une autoroute n'a pas à intervenir avant 1976. En d'autres termes, les aménagements progressifs demandent en premier lieu des investissements relativement légers, mais proches dans le temps et permettent de retarder ainsi les solutions définitives, tandis que les solutions directes exigent en première et unique étape, des investissements considérablement plus lourds, mais à une date plus lointaine.

On conçoit donc que l'adoption d'une politique d'aménagements directs ne conduise pas dans les premières années à des investissements insupportables. La caractéristique essentielle d'une telle politique est de concentrer sur les équipements définitifs et singulièrement sur les autoroutes une bonne partie des crédits disponibles. Une politique d'aménagements progressifs, exigeant des investissements un peu moins lourds, en début de période, conduit à intervenir sur de nombreuses sections ; selon le modèle, elle introduit des pertes économiques d'autant plus sensibles que les aménagements intermédiaires ont une faible durée de vie, c'est-à-dire que la route est plus circulée. Cette observation se conjugue avec une remarque

(1) On pourrait se demander si cette conclusion n'est pas due à une sous-estimation de l'influence de la congestion, lorsque la capacité technique est dépassée. Il semble bien que non, car une sous-estimation de la congestion conduirait à éloigner l'année optimale de la mise en service des équipements, ce qui au contraire, serait plutôt favorable aux aménagements progressifs.

antérieurement faite à propos de l'influence du péage et des restrictions de crédits. Les décisions que l'on prend en période de pénurie budgétaire (imposition de péage, aménagements localisés en vue d'attendre l'auto-route), conduisent en définitive à des pertes que la Collectivité enregistrera à long terme.

Il est fécond d'étudier, d'après les résultats précédents, la mission des divers types de routes. D'une manière générale, le modèle emploie celle-ci :

- soit comme stade terminal de l'aménagement :

Les routes de type 1 - 2 - 3 - 4 - ont chacune un domaine qui leur est propre, variable selon les options. En l'absence de péage, et pour un taux de rentabilité immédiate égal à 7 %, les limites de ces domaines sont les suivantes (exprimées en veh./j. Trafic 1960) :

| | | |
|------------------------|----------------------------------------|---|
| de 0 à 400 veh/j. | le stade terminal est la route de type | 1 |
| de 400 à 1060 " " | " " " " " " | 2 |
| de 1060 à 1730 " " | " " " " " " | 3 |
| de 1750 à 1960 " " | " " " " " " | 4 |
| de 1960 et au-delà " " | " " " " est l'autoroute libre | |

- soit comme état intermédiaire de la séquence :

Ce rôle est beaucoup plus limité et n'intéresse que les routes de faible trafic.

Ainsi, la route de type 2 (7 m.) constitue-t-elle un stade final pour les routes dont le trafic 1960 était compris entre :

| | |
|---------------------|------------------------|
| 400 et 1060 veh./j. | (crédits suffisants) |
| 620 et 1510 " " | (crédits insuffisants) |

Elle est recommandée comme intermédiaire entre la route 1 et les routes 3 ou 4, lorsque le trafic 1960 est faible ou moyen. Le modèle affirme par ailleurs l'importance de l'aménagement des routes à deux voies à un gabarit convenable (7 m.), comme le montre la largeur des plages définies ci-dessus. Pour un investissement relativement faible, on accroît grandement les possibilités de l'infrastructure.

La route de type 3 a pour mission :

- d'être une situation finale pour les routes ayant supporté en 1960 (1) :

de 1060 à 1730 veh/j. (crédits suffisants)

de 1510 à 2150 " " (crédits insuffisants)

et un intermédiaire souhaitable entre la route de type 1 - voire de type 2 - et l'autoroute pour les routes de trafic un peu supérieur.

- de doubler les autoroutes libres sur les liaisons supportant un trafic moyennement élevé. Bien que l'élargissement à trois voies doive en général être opéré après la construction de l'autoroute, la solution inverse arrive le plus souvent en seconde position. On remarquera que la route à 3 voies entre rarement dans une solution optimum quand la liaison est à péage ou les crédits insuffisants.

(14 m.) : Cette vocation apparaît moins large que celle de la route de type 4

- qui constitue un terme final pour des fourchettes de trafic 1960 très variables selon les options, à savoir :

de 1730 à 1960 veh/j. (crédits suffisants et pas de péage)

de 1730 à 2500 " " (" " et péage)

de 2150 à 2940 " " (crédits insuffisants et pas de péage)

de 2150 à 3900 " " (" " et péage)

Ceci montre que le domaine de la route à 4 voies est essentiellement fonction de l'option choisie. Ce domaine est assez restreint si les circonstances sont favorables et s'étend considérablement au dépens de l'autoroute si l'on impose le péage ou si les crédits sont insuffisants. La route à 4 voies est donc principalement une solution de pénurie.

(1) Le domaine de la route de type 3 apparaît assez restreint dans la mesure où celle-ci a une largeur de 9 m. Celui de la route de 10 m 50 serait probablement un peu plus étendu au dépens de celui de la route à quatre voies.

- qui ne fournit jamais un intermédiaire optimal entre une route de type 2 ou 3 et une autoroute, mais qui doit être très généralement préférée à la route à trois voies pour doubler les autoroutes à péage, laissant échapper 25 à 40 % du trafic affecté. Dans ce sens, la route à 4 voies est un intermédiaire possible - mais non optimal - pour attendre l'autoroute à péage de même que la route à 3 voies l'est dans l'attente de l'autoroute libre.

Ces divers résultats éclairent les débats particulièrement nombreux et passionnés autour des routes à trois et quatre voies. L'une et l'autre sont nécessaires puisqu'elles sont appelées toutes deux comme stade final d'aménagement pour des liaisons supportant certaines tranches de trafic. Néanmoins, le rôle de la route à 4 voies dépend étroitement de l'option choisie pour l'exploitation des autoroutes et le niveau de satisfaction des besoins. Elle peut jouer un rôle considérable en période de pénurie, si on la substitue à l'autoroute pour certaines classes de trafic, mais cela au prix de pertes économiques importantes, ou, au contraire, se voir assigner un rôle assez modeste si l'on préfère s'en tenir à l'option optimale. Ceci illustre l'importance des décisions d'ordre politique prises dans le domaine routier.

b) Le coût du développement du réseau -

La connaissance des séquences optimales pour l'aménagement des divers types de routes et le calcul de leur coût actualisé permet d'étudier, dans les diverses options, le coût de développement moyen par veh-km puis, suivant quelques hypothèses, de chiffrer les sommes qui seraient à investir sur l'ensemble du réseau pour suivre l'accroissement de la circulation.

Nous définirons le coût de développement comme le rapport du coût actualisé total d'aménagement de la liaison au volume actualisé du trafic attendu, soit :

$$c = \frac{K_{nq}}{J_j} \times \frac{1}{365}$$

avec

$$J_j = J_0 \frac{m_j}{(1 + \dots)^j}$$

- : —————
- : J_j symbole d'actuali-
- : sation.
- :
- :
- : J_0 trafic 60 sur la
- : liaison
- :
- : m_j coefficient multi-
- : plicateur
- :
- :
- :
- :

De coût c est un coût de développement moyen à long terme par véhicule-km. Il correspond (1) à la dépense que la Collectivité doit effectuer à long terme pour permettre, de manière optimale, la circulation du trafic attendu.

Le graphique 14 exprime la variation de ce coût (entre 0,005 et 0,05 F/veh-km) en fonction du trafic supporté en 1900 et pour les quatre options définies antérieurement. Il appelle trois observations essentielles :

- le coût de développement est, dans chaque cas, beaucoup plus élevé sur une route très fréquentée que sur une liaison ne connaissant que quelques centaines de véhicules par jour. Ceci paraît établir le rendement décroissant de l'infrastructure routière ; la conclusion doit cependant être tempérée, car elle ne vise pas le rendement absolu des différentes routes, mais le rendement des investissements effectués sur une liaison connaissant une certaine situation de départ. L'explication est que le patrimoine existant à l'instant origine est, en proportion, considérablement plus riche lorsque la route est peu fréquentée que dans le cas contraire.
- Les courbes marquent une discontinuité très nette chaque fois qu'une autoroute s'intègre dans la séquence optimale. En effet, en ces points les coûts de circulation supportés par les usagers diminuent brusquement, tandis que les charges d'investissements augmentent (2).
- les différentes options introduisent un éventail assez large des coûts de développement et se classent de la manière suivante par "cherté" décroissante :

| | | |
|----------------------|---|--------------|
| Crédits suffisants | - | Pas de péage |
| " " | - | Péage |
| Crédits insuffisants | - | Pas de péage |
| " " | - | Péage |

(1) Le coût marginal de développement à long terme s'écrit :

$$C_M = \frac{K n q}{J_0 (\sum m_j - 1)} \times \frac{1}{365}$$

(2) On devrait, en fait, enregistrer une discontinuité chaque fois que change la nature de la séquence optimale, cette discontinuité n'apparaît vraiment que dans le cas de l'autoroute.

L'influence de la situation financière était aisément prévisible ; celle du régime d'exploitation de l'autoroute l'était moins. Les charges supplémentaires dues au péage (frais de construction des postes, dépenses d'exploitation, accroissement des caractéristiques techniques de la route parallèle) sont moins importantes en définitive que les économies que celui-ci apporte en reculant la date optimale de mise en service de l'autoroute.

Le calcul des coûts de circulation moyens sur la liaison conduirait à un classement exactement inverse, avec des écarts probablement plus creusés. l'addition des deux coûts permettrait de montrer que la première solution constitue l'optimum absolu.

A partir des coûts de développement ainsi calculés, il est tentant de prévoir le volume des investissements à opérer pour aménager le réseau national à l'horizon 1990. Nous succomberons, pour notre part, à cette tentation en gardant cependant à l'esprit les nombreuses réserves impliquées par un tel calcul. Nous quittons en effet le domaine théorique dans lequel nous étions libres des hypothèses pour aborder concrètement le problème actuellement posé ; il serait présomptueux de penser que le modèle, en définitive assez simple, reflète de manière suffisante les innombrables cas particuliers à résoudre pour aménager le réseau. Aussi, les conclusions tirées de cette étude auront-elles une valeur toute relative.

La première démarche consiste à limiter l'étude au cas des routes nationales de rase campagne en excluant les routes de zone urbaine et à classer l'ensemble du réseau suivant les différents types utilisés par le modèle. Ceci a été effectué à l'aide des résultats du recensement de 1960, exprimés par un tableau où figurent les longueurs de routes classées selon leur largeur-6, 7, 9 m. (et plus) - et selon le trafic moyen journalier supporté.

La connaissance des courbes de coûts de développement moyen permet alors dans les deux hypothèses de suffisance et d'insuffisance de crédits, pour les deux régimes d'exploitation de l'autoroute, de déterminer la dépense actualisée requise. Pour ce faire, il suffit de croiser le tableau donnant les longueurs de routes nationales en fonction des largeurs et des classes de trafic, avec un autre tableau établi d'après le graphique 14, figurant dans les mêmes conditions les valeurs des 4 séries de coût de développement.

Le montant total (actualisé au taux de 7 % à l'année 1960) des investissements à réaliser en rase campagne sur le réseau routier national de 1960 à 1990 et le volume correspondant des budgets annuels supposés constants tout au long de la période, apparaissent les suivants (Milliards de F.) (1) :

(1) - La somme actualisée de ces budgets est égale au volume également actualisé des investissements à effectuer.

| | montant total actualisé (1960-1990) | Budget annuel moyen (rase campagne) |
|------------------------------------|-------------------------------------------|----------------------------------------|
| Crédits suffisants. Pas de péage | 37,3 | 3,0 |
| " " Péage | 28,1 | 2,3 |
| Crédits insuffisants. Pas de péage | 18,6 | 1,4 |
| " " Péage | 11,4 | 0,9 |

Ce montant est d'ampleur très différente suivant l'option choisie et correspond à plusieurs niveaux de satisfaction des usagers ou plus exactement à une différente répartition des coûts totaux entre l'investissement et le transport. On retiendra surtout l'influence du taux de rentabilité immédiate choisi, qui passant de 7 à 12 %, divise par 2 ou 2,5 le volume des travaux à exécuter.

Les investissements opérés en rase campagne constituent actuellement la moitié environ des autorisations de programme du Fonds Spécial d'Investissement Routier (Tranche Nationale) soit 0,5 milliards de F. en 1964 et 0,6 MMF. en 1965. Sachant que l'option actuelle comporte la perception de péages sur les autoroutes de liaison, on peut avancer que le taux moyen de rentabilité immédiate des investissements routiers est actuellement compris entre 13 et 14 %. Ceci illustre d'une manière assez frappante la pénurie de crédits que ressentent tous les Ingénieurs et fait pressentir l'ampleur de l'effort nécessaire pour abaisser suffisamment ce taux de rentabilité et retrouver une situation plus proche de l'optimum économique.

Il est intéressant de rechercher la ventilation entre les besoins du réseau et ceux des autoroutes ; pour cela, nous calculerons d'abord la longueur totale d'autoroutes à construire de 1960 à 1990 dans les quatre options, elle s'obtient en totalisant les longueurs des routes ayant supporté en 1960 un trafic supérieur au seuil retenu, à savoir :

| | | | |
|------|---------|------------------------|-----------------|
| 1960 | veh./j. | { crédits suffisants | et pas de péage |
| 2750 | " " | | |
| 2900 | " " | { crédits insuffisants | et pas de péage |
| 3900 | " " | | |

Les résultats sont dans l'ordre des options 13.000, 8.500, 7.000 et 4.000 km. Rappelons que le Plan Directeur du Réseau Autoroutier, approuvé en 1960, prévoyait un programme de réalisation, à l'horizon de 1975, de 3.600 km d'autoroutes de liaison et de dégagement ; le modèle conduit donc, quelle que soit l'hypothèse retenue à une longueur d'autoroute de liaison plus importante que celle inscrite au Plan Directeur, ce qui au départ était impliqué par l'éloignement de l'horizon choisi (1990). On observera le très large éventail ainsi ouvert puisque, suivant les options, la longueur du réseau autoroutier en 1990 varie de 1 à 3. Le substitut de l'autoroute est évidemment la route à quatre voies dont le destin, nous l'avons déjà vu, est très largement lié aux choix politiques.

Le calcul montre par ailleurs que quelle que soit l'option, la très grande majorité des routes actuellement d'une largeur de 6 m. ou supérieure à 9 m. devront être doublées par une autoroute. Au contraire, les pourcentages apparaissent très variables pour les routes de 7 m. (50 à 150 %) et très faibles pour les routes de 6 m. (5 à 1 %).

La connaissance des longueurs d'autoroutes à construire permet d'effectuer dans chaque option la ventilation des dépenses d'investissements déterminés ci-dessus. La proportion à affecter à la construction d'autoroutes se situe de 50 à 65 %. Elle est plus élevée lorsque les autoroutes sont prévues libres de péages et, ce qui est moins évident, lorsque les crédits sont insuffisants.

Tous ces résultats ne sauraient évidemment être retenus sans discussion et il n'est pas mauvais de rappeler à ce sujet qu'ils dépendent de toutes les hypothèses introduites dans le modèle, aussi bien la valeur du temps, le pourcentage des agglomérations supposées sur les liaisons que le coût des travaux ; ils constituent en fait un ensemble cohérent qui tire précisément de cette cohérence l'essentiel de sa valeur.

Au terme de cette longue étude, il paraît nécessaire d'embrasser du regard le chemin parcouru. A partir des données de base que constituent d'une part les courbes de vitesse des véhicules légers, d'autre part le coût des aménagements, nous avons retrouvé, précisé et enrichi la notion de capacité des routes en lui conférant une valeur économique.

Nous avons ensuite déduit de l'étude des bilans actualisés la nature des travaux à opérer sur diverses routes-types, classées suivant leur largeur et le trafic supporté en 1960. Ceci a permis d'obtenir un aperçu de l'ampleur des investissements à effectuer sur la totalité du réseau de rase campagne, d'ici l'année horizon.

L'ensemble de la construction demanderait à être réétudiée en faisant varier les principales données sur lesquelles elle est fondée. Ainsi, faudrait-il généraliser la notion de capacité économique en multipliant le nombre des routes types et en approfondissant l'étude de la route à 4 voies. De même, il serait nécessaire de recalculer les bilans actualisés à partir de perspectives de trafic différentes et surtout en envisageant d'autres séquences d'aménagements (construction progressive d'une autoroute, aménagement progressif d'une route à 4 voies par sections discontinues, etc...). Nous donnons une valeur au calcul des investissements nécessaires sur le réseau, il conviendrait de distinguer les routes - non seulement d'après la largeur et le trafic supporté - mais aussi d'après la nature générale du tracé et les caractéristiques de la région traversée (relief, nature du sol).

L'ensemble de ces études appelle l'emploi de machines électroniques et la mise au point d'un programme, actuellement en cours d'élaboration, permettant l'obtention des différents résultats dans tous les cas possibles. Ce programme devrait autoriser la recherche systématique des investissements à opérer sur les liaisons d'après leurs caractéristiques propres et ainsi résoudre, dans chaque cas particulier, un des problèmes les plus importants qui se posent, dès à présent, à l'Ingénieur Routier.

Cependant, il n'est pas nécessaire d'attendre les résultats de cette programmation systématique pour avancer les idées générales qui peuvent diriger la recherche dans ce domaine. Au risque de nous répéter et en guise d'ultime conclusion, énumérons les principes qui nous semblent fondamentaux :

- On ne saurait effectuer de grands investissements sur une liaison sans étudier le volume du trafic qu'elle est susceptible de supporter à une date très éloignée prise comme horizon. La définition d'une perspective à long terme apparaît essentielle malgré l'incertitude rencontrée lorsqu'on s'éloigne du moment présent ; cette difficulté est la marque des investissements qui modifient les structures du pays et qui, par leur durée de vie, façonnent son image avec plusieurs décennies d'avance.

- Pour atteindre l'état final décidé pour la liaison, les étapes doivent être peu nombreuses, strictement interdépendantes, et relativement discontinués ; l'élargissement mètre par mètre des chaussées est rarement une bonne affaire. Cette conclusion ne vise cependant que les cas envisagés dans le modèle et pourrait être tempérée - et quelque peu différente - pour d'autres séquences d'aménagements progressifs.

- Enfin, il apparaît nécessaire que la Collectivité définisse clairement le niveau de satisfaction qu'elle est décidée à assurer dans l'avenir aux usagers de la route. Est-elle disposée à évaluer à leur prix les coûts de transports ou au contraire, préfère-t-elle délibérément les sous-estimer ? Faut-il imaginer, dans le futur, le prolongement des difficultés actuelles et la limitation du volume des investissements ou, à l'opposé, envisager une période de transition conduisant à un état économiquement optimum ? Malheureusement, la question n'est pas posée à l'Ingénieur dont le choix est fait depuis longtemps, elle ne l'est pas non plus à l'Economiste qui a adhéré aux convictions du premier, ou au Financier qui distribue ce qu'on lui donne, mais au Politique dont on attend la définition sans ambiguïté de l'orientation à poursuivre.

ANNEXE

DEFINITION ET CALCUL DU COUT DE LA CONGESTION

Le but de cette étude est de rechercher une méthode permettant d'apprécier les pertes économiques dues à la congestion des routes. Un premier aspect de ce phénomène vise la diminution de la vitesse moyenne des véhicules quand ceux-ci sont trop nombreux sur l'itinéraire.

Un second aspect consiste en un resserrement de l'éventail des vitesses permises par la route. Lorsque le trafic est trop important, les dépassements sont impossibles (route à deux voies) ou difficiles (routes à 3 ou 4 voies) et tous les véhicules sont obligés de circuler à la même vitesse.

On conçoit que cette contrainte fasse naître des pertes économiques qui s'ajoutent à celles entraînées par la réduction de la vitesse moyenne. Ces pertes sont liées, à l'évaluation que les différents usagers font de la valeur de leur temps et aux conséquences qu'ils en tirent pour "désirer" une vitesse déterminée.

I - Définition des vitesses désirées -

La première démarche consiste à rechercher les vitesses désirées par les usagers en l'absence de toute contrainte née de l'imperfection de l'infrastructure. Nous supposons que ces vitesses minimisent le coût de transport constitué essentiellement par la dépense de temps et de carburant (1).

Soit $C = C(t)$ la fonction exprimant la consommation de carburant en fonction du temps de parcours kilométrique.

..//..

(1) Cette hypothèse est évidemment assez hasardeuse. Cependant elle permet d'expliquer et de retrouver convenablement les vitesses réelles et leur dispersion ; on peut donc fonder sur elle le calcul des pertes économiques. D'autres calculs déduits d'hypothèses différentes, mais conduisant à des vitesses analogues, aboutiraient très probablement à des pertes économiques très voisines.

La dépense totale à minimiser est la fonction de coût individuel :

$$F_i(t, T) = t T + C(t)$$

T = valeur de l'unité de temps pour l'utilisateur considéré

Prix de l'essence : 1 F/l

Le temps de parcours correspondant à la vitesse optimum pour l'utilisateur est déterminé en fonction de la valeur du temps par $C'(t) = -T$ ou par une équation de la forme $t=h(T)$.

Nous pouvons donc définir la vitesse désirée par chaque usager en fonction du prix qu'il attache à son temps. La variation de celui-ci (ainsi que le manque d'unité du parc qui n'est pas pris en considération ici) expliquent l'hétérogénéité des vitesses de parcours optima que nous supposons "désirées" par les usagers.

Nous ferons l'hypothèse que la valeur du temps tel qu'elle est appréciée par les intéressés est en moyenne de 8 F./h. par véhicule léger et que la valeur réelle varie de 0 à 16 F. avec une densité de probabilité constante. En effet, il n'est pas interdit de substituer à la courbe représentative des évaluations (probablement voisine d'une courbe de Gauss) un diagramme rectangulaire présentant le même écart type. La valeur a été choisie à partir d'une évaluation de l'éventail des revenus des usagers et en assimilant le prix qu'ils attachent au temps à leur salaire horaire.

Connaissant la valeur du temps et son écart-type, il est possible de déterminer l'éventail des vitesses souhaitées. Les valeurs extrêmes 0 et 16 F. définissent les temps de parcours limites t_a et t_b entre lesquels s'inscrivent les temps de parcours désirés par l'ensemble des usagers.

Les moments des deux premiers ordres des temps de parcours sont aisément calculables et permettent d'effectuer les calculs voulus sur les vitesses désirées sans étudier plus précisément la forme de la fonction.

II - Calcul théorique des pertes -

Les caractéristiques de l'infrastructure jointes à la congestion de la route n'autorisent pas les usagers à circuler à la vitesse désirée.

.../...

Soit t^1 le temps de parcours réel de l'usager dont le temps de parcours désiré est t . Nous supposons que

$$t^1 = t_m^1 + e (t - t_m)$$

t_m^1 = temps de parcours moyen réel sur la section considérée

e = coefficient exprimant la réduction de l'éventail des vitesses ou coefficient de congestion ($e < 1$).

Les deux nombres t_m^1 et e définissent les conditions de circulation sur l'itinéraire. Lorsque la congestion est complète ($e = 0$), tous les véhicules circulent à la même vitesse. Au contraire, il n'y a pas congestion si $e = 1$; dans la mesure où le temps de parcours moyen effectif (t_m) est égal au temps de parcours moyen désiré ($t_m = t_m^1$) aucune perte économique n'est enregistrée.

Pour évaluer la perte économique en valeur collective, il convient de définir une fonction de coût collectif qui ne comprend pas la taxe sur les carburants : $F_c (t, T) = t \cdot T + 0,35 C (t)$. Lorsque le véhicule considéré parcourt un kilomètre pendant le temps t^1 au lieu de temps t , la perte économique est :

- en valeur individuelle :

$$p_i (t, T, t^1) = F_i (t^1, T) - F_i (t, T)$$

- en valeur collective :

$$p_c (t, T, t^1) = F_c (t^1, T) - F_c (t, T)$$

On montre aisément que la perte moyenne par véhicule s'exprime en valeur individuelle et collective par :

$$P_i = p_i (t_m) + \frac{v}{2} p_i'' (t_m) \quad (v = \text{variance des temps de parcours désirés})$$

$$P_c = p_c (t_m) + \frac{v}{2} p_c'' (t_m)$$

Le coût de la congestion comprend donc essentiellement deux termes :

- le premier est le terme habituellement calculé. Il est dû à la variation de la vitesse moyenne entre l'état optimal et l'état réel. Le temps y est évalué à la valeur moyenne pour tous les usagers.
- le second est en terme correctif qui résulte de deux phénomènes :
 - la dispersion des valeurs du temps et des vitesses réels.
 - la gêne imposée aux usagers en les obligeant à circuler à des vitesses voisines.

.../...

Le calcul du premier terme de la congestion demande que l'on connaisse le temps de parcours réel en fonction du débit horaire ou journalier et du coefficient de visibilité de l'itinéraire.

Le calcul du second terme demande que l'on connaisse de plus, et en fonction des mêmes grandeurs, la valeur du taux de congestion θ qui exprime la possibilité offerte aux usagers de rouler à des vitesses différentes.

III - Calculs effectifs -

Les calculs ont été menés en prenant la fonction suivante pour la consommation de carburant.

$$C = 409 - 56,9668 t + 3,1657 t^2 - 0,0586 t^3$$

(c en cm^3 par km, t en 10^{-3} heures)

Ils ont conduit aux résultats suivants :

- les usagers désirent circuler à une vitesse moyenne de 85,7 km/h, les vitesses limites étant 55,5 et 118,3 Km/h.

- l'écart-type des temps de parcours désirés est égale à 18,7 % de la moyenne

Ces résultats ne sont pas en désaccord avec l'expérience bien que la vitesse moyenne soit un peu faible. Des mesures ont été faites de la dispersion des vitesses réelles des véhicules et les résultats sont voisins du chiffre cité. Ainsi, les formules données par l'Association Internationale Permanente des Congrès de la Route indiquent que l'écart-type des vitesses sur bonne route est égal à 16 % de la moyenne en l'absence de congestion. Le chiffre de 18,74 % semble apte à représenter les conditions de circulation sur une route idéale.

Le calcul des deux termes de la perte économique par rapport à cette situation optimale est assez aisé. Il conduit aux résultats suivants en fonction du temps de parcours moyen et du coefficient de congestion.

- terme principal

$$P_i (t_m^1) = 244,9443 - 49,9385 t_m^1 + 3,1657 (t_m^1)^2 - 0,0586 (t_m^1)^3$$

$$P_c (t_m^1) = 32,4311 - 12,9101 t_m^1 + 1,1080 (t_m^1)^2 - 0,0205 (t_m^1)^3$$

.../...

- terme correctif

$$\Delta P_i = \frac{v}{2} p''_i = (-0,8403 t_m^1 + 15,132) e^2 - 10,6560 e + 0,8403 t_m^1 - 4,4761$$

$$\Delta P_c = \frac{v}{2} p''_c = (-0,2942 t_m^1 + 5,2961) e^2 - 10,6560 e + 0,8403 t_m^1 - 1,0128$$

Les courbes représentatives des termes principaux et correctifs en valeur collective et individuelle figurant ci-contre.

Leur utilisation suppose que l'on connaisse les deux paramètres figurant les conditions d'écoulement sur la route.

Les courbes donnant la vitesse moyenne en fonction du nombre de véhicules horaires ou journaliers ont été étudiées par ailleurs.

On peut retenir à titre provisoire les relations suivantes donnant pour les différents types de routes, le coefficient de congestion e en fonction du trafic journalier moyen annuel (J) :

- type 1 (2 voies - 6 m) e = 0,4 - 0,023 x 10⁻³ J
- " 2 (2 voies - 7 m) e = 0,6 - 0,030 x 10⁻³ J
- " 3 (3 voies - 9 m) e = 0,8 - 0,017 x 10⁻³ J
- " 4 (4 voies - 14m) e = 1 - 0,010 x 10⁻³ J
- " A et B (Autoroute) e = 1 - 0,003 x 10⁻³ J

IV - Exemples

a) Elargissement

Etudions d'abord le cas de l'élargissement et de la rectification d'une route supportant 4.800 véh./j. pour l'amener du type 2 (7 m) ou au type 3 (9 m).

La perte économique sur la route 2 est la suivante pour véh- Km (valeur collective).

$$0,0168 + 0,0068$$

(terme principal) (terme correctif)

.../...

Sur la route de type 3 elle vaut :

$$0,0070 + 0,0030$$

Le bénéfice économique (par véh.-Km) attaché aux travaux se calcule par différence :

$$0,0098 + 0,0038 = 0,0136 \text{ F}$$

(terme principal) (terme correctif)

Les gains issus de l'accroissement de la dispersion des vitesses (terme correctif) sont supérieurs au tiers de ceux déduits de l'accroissement de la vitesse moyenne (terme principal) .

b) création d'une autoroute

Soit une route de type 3 (9 m), supportant 10.000 véh./j, doublée par une autoroute (libre ou à péage)

La perte économique sur la route 3 est en valeur collective égale à (par véh.-Km) :

$$0,0127 + 0,0045$$

Sur l'autoroute elle est négative et constitue un gain par rapport à la situation optimale dont la vitesse moyenne est trop faible mais qui intervient seulement comme une situation de référence :

$$0,0021 - 0,0002$$

Le bénéfice apporté par l'autoroute est alors

$$0,0148 + 0,0047 = 0,0195$$

Ici encore le gain lié à l'ouverture de l'éventail des vitesses vaut le tiers de celui issu de l'accroissement des vitesses moyennes.

V - Conclusions

a) Etant supposé que l'utilisateur prend en compte sa dépense de temps et de carburant et qu'il se comporte rationnellement, on peut lui attribuer une vitesse optimale dite "désirée".

b) Celle-ci varie avec chaque usager suivant l'appréciation qu'il fait de la valeur de son temps. Elle est en moyenne de 85,7 km/h pour l'ensemble des usagers (valeur du temps 8 F. l'heure). L'écart-type des temps de parcours désirés rapporté à la moyenne est de 18,7 % environ.

c) L'imperfection de l'infrastructure implique une vitesse réelle inférieure à la vitesse désirée, et une réduction de l'éventail des vitesses possibles. Elle donne naissance par ces processus à deux termes distincts de la perte économique.

- le terme principal qui vise la diminution de la vitesse réelle et qui est habituellement calculé.

- le terme correctif qui a trait à la difficulté de dépasser et qui n'est généralement pas pris en considération.

d) L'étude de la variation de la perte économique entre deux états que l'on veut comparer permet d'évaluer le bénéfice que l'on trouve à passer du premier au second.

e) Le terme correctif est en général de l'ordre du tiers du terme principal. Aussi les calculs qui négligent l'influence de la dispersion des vitesses laissent-ils échapper le quart du gain réel.