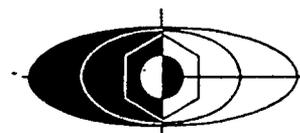


ETUDE SUR LES PENETRANTES URBAINES



AVRIL 1967



BCEOM

15 square Max Hymans, Paris 15^e

ETUDE SUR LES PENETRANTES URBAINES

S A E I

Avril 1967

B C E O M
15 square Max Hymans
Paris 15ème

Etude Méthodologique des Pénétrantes Urbaines

0. Introduction à l'étude.
 - 0.1. Introduction
 - 0.2. Plan du rapport.

1. Définition générale de l'étude.

2. Analyse des paramètres.
 - 2.1. Le cadre géographique
 - 2.1.1. Schématisation du réseau.
 - 2.1.2. Les centres générateurs.
 - 2.2. La demande de transport.
 - 2.2.1. Estimation de la demande journalière.
 - 2.2.2. Estimation des demandes horaires.
 - 2.2.2.1. Demande entre centroïdes : Paris - Extérieur.
 - 2.2.2.2. Trafics locaux.
 - 2.3. Les coûts d'exploitation et d'investissement.
 - 2.3.1. Les fonctions temps de parcours - débit.
 - 2.3.2. Fonctions coûts - débit.
 - 2.3.3. Les investissements.

3. Recherche du programme optimal.
 - 3.1. Approche économique.
 - 3.1.1. Fonction d'objectif.
 - 3.1.2. Les valeurs résiduelles.
 - 3.1.3. Les différentes méthodes de résolution envisageables pour traiter un tel problème.

- 3.2. Méthode de résolution.
 - 3.2.1. Le processus de calcul.
 - 3.2.1.1. Le cheminement.
 - 3.2.1.2. Le programme initial d'investissements.
 - 3.2.1.3. Les limites de la méthode.
 - 3.2.2. La structure des sous-programmes.
 - 3.2.3.1. Organisation générale.
 - 3.2.3.2. Affectation complète.
 - 3.2.3.3. Déplacement d'investissement - Réaffectation partielle.

- 4. Résultats d'exploitation.
 - 4.1. Résultats généraux.
 - 4.1.1. Temps d'exploitation.
 - 4.1.2. Importance de la séquence initiale
 - 4.2. Résultats de la séquence routière.
 - 4.3. Résultats de la séquence autoroutière.
 - 4.4. Obtention d'une séquence optimale.
 - 4.5. Vérification de la séquence optimale.
 - 4.6. Vérification sur le taux d'actualisation.
 - 4.7. Vérification sur la valeur du temps des usagers.
 - 4.8. Paramétrages sur la demande.
 - 4.9. Conclusions.

-
- Annexe I Fonction temps de parcours - débit.
 - Annexe II Temps d'attente aux feux.
 - Annexe III Coordination des feux sur un axe.
 - Annexe IV Estimation des coûts collectifs.
 - Annexe V Investissements successifs à réaliser sur un tronçon routier.
 - Annexe VI Coûts admis pour le calcul des investissements.
 - Annexe VII Modèle de Carter et Stowers.
 - Annexe VIII Estimation des valeurs résiduelles par la méthode des coûts de dernière année.
 - Annexe IX Valeur résiduelle d'un investissement à partir de sa valeur d'amortissement.
 - Annexe X Réaffectation partielle.

ETUDE METHODOLOGIQUE DES PENETRANTES URBAINES

RAPPORT GENERAL

0. Introduction à l'étude

0.1. Introduction

L'accélération du développement urbain met à la charge de la collectivité des dépenses de plus en plus lourdes, qu'il s'agisse d'accompagner le développement ou de l'orienter par des équipements structurants exerçant de nombreux effets d'entraînement. Aussi l'économiste doit-il, comme l'architecte et l'ingénieur, apporter ses réflexions aux responsables de la synthèse et des grands choix en matière d'aménagement urbain.

On peut ainsi fixer plusieurs objectifs au travail de l'économiste :

- Le plus ambitieux vise à comparer deux horizons correspondant à deux schémas directeurs d'une même agglomération ou région urbaine. Le nombre de paramètres à prendre en compte, la difficulté de quantifier certains d'entre eux, l'incertitude sur l'évolution des goûts et des possibilités techniques interdisent pour l'instant l'application d'un critère unique de classement des partis d'urbanisme.

- Sans envisager la définition d'un tel optimum général, on peut chercher du moins des sous-optima ne remettant pas en cause l'objectif final qu'est le schéma directeur. Cette recherche peut prendre en compte, ou non, l'effet d'entraînement de certains équipements et notamment des infrastructures de transports. C'est ainsi que sont menées des études sur l'effet de la qualité de service sur l'attrait de nouvelles zones offertes à l'urbanisation.
- L'étude des "pénétrantes urbaines" répond à un objectif encore plus limité. Dans l'impossibilité de mesurer l'effet d'entraînement des infrastructures sur le développement, on suppose établi, non seulement le schéma directeur à l'horizon 1990, mais une "programmation du développement" définissant le rythme d'implantation des résidences, des emplois et des centres de loisirs et d'achats au cours des périodes quinquennales 1970-75, 75-80, 80-85, et 85-90.

Le modèle cherche alors la meilleure programmation des infrastructures de transports (dans une première phase, seuls les déplacements en automobile ont été envisagés) satisfaisant la demande de transport issue de ces perspectives d'urbanisation, et compatible avec des contraintes (minimum de qualité de service) qui doivent en tout état de cause être respectées pour que le rythme de développement prévu dans chaque zone soit réaliste.

Cette méthode, qui consiste à satisfaire au mieux des besoins fixés par ailleurs, peut être comparée à celle qui est utilisée pour les études de rentabilité des investissements routiers en rase campagne.

Deux facteurs importants accroissent cependant la complexité du problème : on doit traiter l'ensemble d'un réseau et non pas seulement un axe de transport ; plusieurs demandes de transport, liées à des motifs différents, se juxtaposent et entraînent des fluctuations très marquées. Ces difficultés conduisent à chercher une méthode de résolution faisant appel aux possibilités de l'ordinateur.

Le calcul automatique permet en outre de réaliser divers paramétrages qui éclairent davantage les résultats du modèle : on peut ainsi tester la sensibilité au degré de rareté du capital mesuré par un coefficient d'actualisation, à l'incertitude sur les coûts d'investissement, au rythme d'urbanisation des différentes zones, etc ...

Le modèle dans sa conception actuelle envisage l'ensemble des liaisons radiales entre le centre et les zones d'extension périphérique d'une agglomération. Son utilisation nécessite un large effort d'imagination de la part des ingénieurs, qui doivent envisager de nombreuses variantes techniques, les unes à caractère très discontinu (création de nouveaux tronçons d'autoroute par exemple), les autres plus progressives (aménagement de carrefours, suppression du stationnement, construction d'une voie supplémentaire, etc...). Le modèle fournit ainsi au planificateur un instrument de choix entre les nombreuses possibilités qui s'offrent à lui, en respectant à la fois les cohérences nécessaires et les contraintes financières.

Ce modèle, dont l'intérêt est essentiellement d'ordre méthodologique, a été établi dans le cadre du secteur Nord-Ouest de la région parisienne. Le réseau est donc constitué par les liaisons routières entre Paris et les villes nouvelles du val d'Oise prévues par le Schéma Directeur de la Région Parisienne.

Ses premiers résultats doivent être jugés comme un test de la méthode, et non dans leurs conséquences sur ce problème particulier. En effet, l'incertitude sur certains coûts d'investissements qui n'ont pas été l'objet d'études techniques très approfondies (et pour lesquels ont été définis d'une façon souvent hasardeuse des coûts-types) limite largement la portée de ces résultats. On ne saurait trop insister, pour l'utilisation future de ce modèle, sur la nécessité d'une collaboration étroite entre l'ingénieur et l'économiste car sans chiffre exact, il ne saurait y avoir d'étude économique utile, quelle que soit la qualité des méthodes utilisées.

0.2. Plan du Rapport

Le présent chapitre "Introduction à l'Etude" a pour objectif de guider le lecteur dans la compréhension générale de l'Etude.

Le chapitre 1 "Définition Générale de l'Etude" précise les principales simplifications admises dans l'élaboration du modèle économique.

Le chapitre 2 "Analyse des paramètres" analyse l'ensemble des données de base nécessaires pour résoudre le problème posé : schématisation du réseau, finesse du découpage géographique, estimation de la demande et caractéristiques de l'offre (fonctions temps de parcours - débit ; fonctions coût - débit et montant des investissements).

La méthode d'approche économique et les bases de la programmation sur ordinateur sont exposées au chapitre 3 "Recherche du Programme Optimal".

Enfin, les premiers résultats de l'exploitation du programme sont indiqués au chapitre 4 " Premiers résultats d'exploitation " et des conclusions provisoires sont tirées dans ce chapitre.

1. Définition Générale de l'Etude

Parmi un ensemble d'investissements possibles (dont certains sont complémentaires, d'autres incompatibles, les autres indépendants), lesquels doivent être réalisés et à quel moment pour satisfaire la demande de transport issue des prévisions des urbanistes ?

La réponse à cette question suppose une certaine schématisation du problème. Les principales simplifications faites sont les suivantes :

- a) La demande de transport ne dépend pas de l'ensemble des facilités offertes aux usagers. Autrement dit, puisque l'on suppose connues à toute époque, d'après les prévisions des urbanistes, les implantations industrielle et commerciale et la localisation des résidences, la demande de transport entre les zones origine et les zones destination est considérée comme donnée. En pratique, le modèle des échanges est fondé sur la donnée d'une infrastructure moyenne et l'on admet que des variations de la qualité de service ne perturberont pas de façon importante les échanges de zone à zone.

- b) La répartition entre modes de transport (dans la mesure où elle doit être envisagée, ce qui n'est pas le cas de toutes les agglomérations) est également indépendante de l'état des différentes infrastructures. Pratiquement cette répartition est calculée pour un niveau moyen des équipements utilisés pour les déplacements individuels et pour les transports en commun. La part des transports en commun est ainsi considérée comme une donnée exogène, indépendante des seules variations envisagées dans l'infrastructure routière.

Ces deux hypothèses permettent d'énoncer très simplement l'objectif poursuivi : satisfaire au mieux la demande de déplacements automobiles, bien définie pour les différentes périodes considérées. On cherche donc à rendre minimum la dépense actualisée qui comprend les coûts d'investissements et les coûts des usagers calculés en valeurs collectives. On tient compte également de la gêne apportée aux riverains, en ajoutant aux coûts des usagers, les coûts de gêne pour les riverains.

- c) L'étendue de la période d'analyse ne peut être infinie car d'une part les prévisions sur l'urbanisation et la demande de transport deviennent très incertaines au-delà d'un certain horizon et d'autre part, la définition des opérations envisageables se heurte à l'incertitude apportée par l'évolution technique des modes de transport.

Compte tenu par ailleurs de la longue durée de vie des investissements routiers, une durée de vingt ans (1970 - 1990) a été retenue, sous réserve de comptabiliser par des valeurs résiduelles l'effet économique obtenu au-delà de l'horizon.

2. Analyse des Paramètres

L'approche d'un problème aussi complexe que celui du réseau de pénétration dans les villes exige qu'on simplifie au maximum les facteurs influents jusqu'au point où une simplification supplémentaire ferait perdre beaucoup à la précision recherchée ou réduirait tout simplement à néant le réalisme des phénomènes que l'on désire traiter.

Par ailleurs, il est nécessaire de rechercher une certaine homogénéité dans la précision des différents éléments ou paramètres entrant dans le modèle en rapport avec la précision finale.

Les résultats de cette recherche font l'objet du présent chapitre.

2.1. Le cadre géographique

2.1.1. Schématisation du réseau

L'étude des liaisons routières entre Paris et les villes nouvelles du Val d'Oise montre qu'on ne peut se contenter d'analyser des investissements linéaires sur un axe déterminé, mais qu'il faut traiter le cas plus général d'un réseau composé de plusieurs axes de pénétration. Le problème se complique encore du fait que par suite de l'étendue de Paris intra-muros, on ne peut être indifférent au point d'arrivée sur le boulevard périphérique en fonction de l'emplacement de la destination dans Paris.

Les contraintes de capacité sont d'autre part suffisamment fortes pour qu'on n'oublie aucune des possibilités de traversée de la Seine.

Ainsi, même en négligeant certaines rues ou routes vraiment secondaires, il faut prendre en compte la presque totalité des grandes voies d'accès à Paris, Nationales ou Départementales situées dans le quadrant Nord-Ouest. On peut cependant parfois réunir des sections de rues parallèles, proches et jouant des rôles analogues, sous forme d'un seul tronçon fictif équivalent.

Etant donné le problème spécifique de pénétration, ou de dégagement si l'on préfère le nommer ainsi, il est possible sans trop nuire au réalisme du modèle d'éliminer du réseau étudié certains axes transversaux importants servant essentiellement aux grands échanges entre zones périphériques.

Les axes nouveaux sont ceux et seulement ceux prévus au Schéma Directeur de la Région Parisienne.

En définitive, le réseau apparait constitué de radiales décomposées en 38 branches, hors de Paris, et 35 branches dans Paris intra-muros ; ces branches correspondent soit à des tronçons existants, soit à des tronçons nouveaux. Il faut encore ajouter 3 tronçons fictifs nécessaires au programme sur ordinateur. On se reportera au schéma n° 1 pour la description détaillée du réseau.

Ainsi, par suite de l'influence des zones voisines sur la congestion du réseau, on est amené à déborder largement, surtout à l'Ouest, sur les itinéraires strictement nécessaires à l'écoulement du trafic vers les villes nouvelles du Val d'Oise.

On peut penser que le même problème, envisagé dans le cas d'une agglomération autre que celle de Paris, serait d'une dimension nettement plus réduite.

2.1.2. Centres générateurs

Afin de simplifier la matrice des échanges entre Paris et la périphérie, on cherche le nombre minimum de zones et par conséquent de centroïdes qui permettent une affectation réaliste du trafic sur le réseau. C'est ainsi que la bande urbanisée déjà très longue constituée par les villes nouvelles de Cergy - Pontoise, Herblay et Beauchamp est découpée en trois zones. Il faut en outre tenir compte d'autres zones qui engendrent un trafic intéressant le même réseau : Saint Germain, Maisons-Laffitte, La Garenne-Colombes et Asnières.

D'autre part, comme l'intérêt de certains itinéraires dépend fortement du point de destination dans Paris intramuros, ce secteur est découpé en 5 zones, conformément aux précédentes études de l'I.A.U.R.P.

En définitive, 7 zones, donc 7 centroïdes sont choisies en dehors de Paris et 5 dans Paris même. On se reportera au schéma n° 2 pour une définition plus précise du découpage utilisé. Ce découpage est à la limite de la précision nécessaire dans la Région Parisienne. En revanche, ce nombre de zones serait très suffisant pour traiter un problème analogue dans une ville de province.

2.2. La demande de transport

Eu égard à la prévision des autres paramètres, on peut considérer qu'une précision dans le temps du $\frac{1}{2}$ plan quinquennal pour les 5 premières années et du plan quinquennal pour les autres est suffisante pour la définition des dates optimales de réalisation des investissements. La période d'analyse 1970 - 1990 est donc décomposée en 5 sous-périodes, soit 1970 - 1972 $\frac{1}{2}$, 1972 $\frac{1}{2}$ - 1975, 1975 - 1980, 1980 - 1985, 1985 - 1990.

La demande est estimée pour chaque sens de circulation Paris vers banlieue et banlieue vers Paris à 3 moments caractéristiques d'un jour de semaine (se reporter au § 2.2.2.).

Toujours dans le but de rendre homogène la précision de toutes les données, on admet que l'avantage des usagers durant une de ces périodes peut être calculé à partir de la demande de trafic déterminée pour le milieu de la période, les investissements étant réalisés au début de chaque période. Le problème revient alors à définir cette demande pour les 5 époques 1971 $\frac{1}{4}$, 1973 $\frac{3}{4}$, 1977 $\frac{1}{2}$, 1982 $\frac{1}{2}$, 1987 $\frac{1}{2}$.

La demande de trafic projetée par les urbanistes est décomposée en deux éléments :

- a) une demande entre centroïde à l'extérieur de Paris et centroïde à l'intérieur de Paris (on tient compte des trafics longue distance en les attachant aux centroïdes les plus éloignés) ;
- b) une demande de trafic local sur chaque tronçon (trafic captif).

2.2.1. Estimation de la demande journalière

Les études effectuées par l'Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Parisienne sur les migrations alternantes ont permis d'établir pour une année de référence (1962) et de projeter pour divers horizons (1975, 1985, 2000) le nombre de migrants journaliers entre zones de la Région Parisienne et leur répartition par mode de transport.

La connaissance de cette répartition, évaluée séparément pour chaque couple de zones entre Paris et la Banlieue et plus grossièrement à l'aide de pourcentages globaux pour les déplacements dans la banlieue, jointe à celle du taux d'occupation des véhicules pour le motif domicile-travail (environ 1,4) et du pourcentage de travailleurs faisant la journée continue, permet d'obtenir le nombre de déplacements de zone à zone durant un jour de semaine moyen pour les deux motifs :

1. Aller du domicile au lieu de travail-affaires.
2. Retour du lieu de travail-affaires au domicile.

Faute de données plus complètes dont il est inutile de souligner l'intérêt, les déplacements pour tous les autres motifs sont supposés être en proportion constante avec les déplacements pour les motifs 1. et 2., cette proportion étant déterminée à l'aide des résultats de l'enquête de circulation Paris-Nord (1) réalisée sur une zone assez semblable au secteur étudié.

On obtient ainsi les demandes journalières entre zones (en nombre de véhicules) décomposées suivant 3 motifs de déplacement, pour un jour de semaine moyen en 1962, 1975, 1985, et 2000. Les

(1) Ponts et Chaussées de la Seine, "Etude de Circulation Paris-Nord", S.E.T.E.C., 1959.

demandes pour 1971 $1/4$, 1973 $3/4$, 1977 $1/2$, 1982 $1/2$, 1987 $1/2$, sont alors interpolées linéairement de façon à représenter une demande moyenne pour les 5 périodes 1970 - 1972 $1/2$, 1972 $1/2$ - 1975, 1975 - 1980, 1980 - 1985, 1985 - 1990.

2.2.2. Estimation des demandes horaires

2.2.2.1. Demande entre centroïdes Paris - Extérieur

Pour chacun des trois motifs de déplacement précités, l'enquête de circulation Paris - Nord fournit une courbe de répartition du total journalier entre les différentes heures de la journée.

Faisant l'hypothèse que cette répartition reste inchangée jusqu'en 1990, l'on peut calculer la demande entre zones origine et destination pour chaque motif, ainsi que le total tous motifs, pour toute heure de la journée.

Pour affecter ces trafics de zone à zone aux tronçons du réseau, il serait trop lourd de distinguer 24 périodes horaires ; aussi a-t-on choisi de rattacher chaque heure de la journée à une "tranche horaire" au cours de laquelle un même type de déplacement est prépondérant. Dans l'exploitation actuelle trois tranches horaires sont utilisées :

- 1. Heures de "pointe du matin" (6 h - 10 h)
correspondant à la pointe des déplacements du domicile au lieu de travail.

- 2. Heures "creuses" de la journée (10 h - 12 h, 13 h - 17 h, 21 h - 22 h) auxquelles on a adjoint les heures de nuit (22 h - 6 h) où les déplacements autres motifs dominant.
- 3. Heures de "pointe du soir" (12 h - 13 h et 17 h - 21 h) correspondant à la pointe des déplacements de retour du lieu de travail au domicile.

A l'intérieur de chaque tranche, la répartition géographique des demandes varie peu ; seule leur importance varie avec l'heure. On calcule donc le trafic moyen fictif équivalent (dit trafic de l'heure caractéristique) d'après la courbe des débits classés de chaque tranche horaire suivant la méthode rappelée dans "l'Instruction Provisoire de la Direction des Routes sur les Calculs de Rentabilité appliqués aux Investissements Routiers. Lorsque le coût individuel des usagers est une fonction linéaire du débit, on a :

$$Q^* = \frac{\sum Q_i^2}{\sum Q_i}$$

où les Q_i sont les trafics horaires, et Q^* est le trafic moyen fictif équivalent.

La méthode décrite ci-dessus (§ 2.2.1. et 2.2.2.1.) peut être employée pour l'évaluation du trafic journalier moyen, puis des trafics horaires d'un Samedi (ou veille de fête) et d'un Dimanche (ou fête). On a donc réservé dans le programme-machine la possibilité d'augmenter jusqu'à cinq le nombre de tranches horaires caractéristiques.

Dans l'exploitation actuelle cependant, les fins de semaines sont rattachées aux trois tranches horaires déjà mentionnées : par exemple, les heures de pointe de retour vers Paris sont rattachées à la pointe du matin d'un jour de semaine.

2.2.2.2. Trafics locaux

Le trafic local sur chaque tronçon et pour chaque tranche horaire est estimé pour chacune des cinq périodes par extrapolation,

- à partir du trafic local sur le tronçon en 1962,
- en utilisant un coefficient multiplicateur (indice de croissance de la circulation locale) égal au rapport du trafic interne à la zone où se trouve le tronçon pour la période considérée (cf. § 2.2.1.) au même trafic en 1962.

Remarquons que les tronçons qui n'existaient pas en 1962 (Autoroutes par exemple) ont un trafic local nul, ce qui n'est exact qu'avec un découpage très fin.

Quant aux trafics locaux de l'année de référence (1962), ils sont calculés, conformément à la définition qui en a été donnée, en retranchant des trafics effectivement mesurés par comptages sur les tronçons les trafics entre Paris et la banlieue.

2.3. Les coûts d'exploitation et d'investissement

On examine sur chaque tronçon quelles peuvent être les différentes améliorations nécessaires raisonnablement envisageables. On estime le coût de ces améliorations et les fonctions temps de parcours - débit, et coût collectif - débit correspondant à chaque nouvel état du tronçon. Les améliorations successives sont définies dans un ordre logique, suivant une méthode exposée au § 2.3.3.

2.3.1. Les fonctions temps de parcours - débit

Il est intéressant de séparer la variable temps de parcours de la variable coût généralisé (incluant le temps) parce que l'affectation des usagers entre plusieurs itinéraires vient essentiellement reposer sur la comparaison des temps de parcours.

Malgré de nombreuses études, notamment lors de l'élaboration des plans de transports des villes américaines sur les fonctions temps - débit, en zone urbaine, celles-ci semblent encore très imparfaitement connues et nécessiteraient sans doute des recherches systématiques.

En revanche, sur les routes de rase campagne ou sur les autoroutes, les courbes du Highway Capacity Manual (1) fournissent des indications précises, qui permettent de représenter les variations temps - débit, pour des trafics inférieurs à la saturation, par des fonctions linéaires.

On s'est efforcé ici d'utiliser au mieux l'ensemble des résultats connus en analysant assez finement les facteurs en cause de façon à pouvoir estimer l'effet spécifique de telle opération particulière.

Le temps de parcours sur un tronçon, fonction des caractéristiques du tronçon et du débit dans le sens observé, est considéré comme la somme :

- a) du temps de parcours de la section courante,
- b) du temps passé à franchir les intersections,
- c) et d'un terme complémentaire, appelé "terme de congestion".

(1) New Highway Capacity Manual, p. 65

Le terme de congestion est par définition un délai moyen supplémentaire dû à la formation de files d'attente aux heures de pointes.

Il tient compte du fait qu'un tronçon est un système où le débit d'entrée peut dépasser momentanément la capacité du tronçon avec stockage des véhicules à l'intérieur du système.

L'un des intérêts de prendre en compte un dépassement de la capacité est de représenter assez bien une situation réelle lorsque les véhicules se stockent sur la voirie en formant des files d'attente de plus en plus longues. Un autre intérêt est d'avoir une variation moins brutale de la rentabilité des investissements lorsque l'on atteint la capacité. Ainsi, certains investissements sur des tronçons où la demande dépasse la capacité peuvent très bien être moins rentables que d'autres investissements sur des routes où la demande n'a pas encore atteint la capacité. Le terme de congestion permet également de classer en rentabilité des investissements sur des routes où les demandes ont dépassé les capacités ce qui n'est pas possible autrement.

Il va sans dire que par suite de l'augmentation rapide du terme de congestion lorsque le débit de pointe dépasse la capacité, les dépassements seront en principe toujours assez faibles, par exemple inférieurs à 10 % et pendant des durées limitées, par exemple inférieures à une heure.

On trouvera dans l'annexe n° 1 "Fonction temps de parcours-débit" des résultats plus détaillés sur l'étude des fonctions temps de parcours-débit et en particulier sur le terme de congestion. On notera cependant ici que ces fonctions dépendent des caractéristiques suivantes :

- a) pour la section courante de la classe de la voie (autoroute, voie express, autres routes), de la densité d'urbanisation (urbaine dense, suburbaine peu dense, rurale), de la réglementation du stationnement (autorisé bilatéral, unilatéral, interdit), de la vitesse de base et du débouché linéaire disponible par sens (ou $\frac{1}{2}$ largeur de chaussée). Lorsqu'un tronçon n'est pas homogène, il est décomposé au préalable en sous-tronçons suffisamment homogènes.
- b) Pour chaque intersection, par le débouché linéaire disponible par sens des approches, les réglementations du stationnement sur les approches, le pourcentage de temps de feu vert, la coordination des feux (voir annexes n° 2 "Temps d'attente aux feux" et n° 3 "Coordination des feux sur un axe").
- c) Pour le terme de congestion, par la capacité et la forme des pointes du trafic.

Les changements dans la réglementation du stationnement sur les approches ou en section courante sur les débouchés linéaires disponibles en section courante et sur les approches ont ainsi un effet direct sur les fonctions temps de parcours - débit ce qui permet d'analyser séparément les rentabilités de ces opérations.

En définitive, les fonctions temps de parcours - débit sont de la forme :

$$E(T) = A + B \bar{Q} + K \left(1 - \frac{C_p}{Q_{\max}}\right)^2 = T(\bar{Q})$$

pour $\bar{Q} > C_p/2$

et

$$E(T) = A + B \times C_p / 2$$

pour $\bar{Q} \leq C_p / 2$

où $E(T)$ est l'espérance du temps de parcours T ,

\bar{Q} le débit moyen durant la période de pointe,

A, B , des coefficients dépendant des caractéristiques du tronçon,

C_p est la capacité,

Q_{\max} le débit maximum de pointe,

K un coefficient égal à zéro si $Q_{\max} \leq C_p$, et constant différent de zéro ne dépendant que de la forme de la pointe lorsque $Q_{\max} > C_p$.

Suivant les hypothèses faites, les rapports entre Q^* et \bar{Q} , et Q^* et Q_{\max} sont constants.

2.3.2. Fonctions coûts - débit

Ces fonctions définissent le coût collectif par véhicule en fonction du débit par sens sur un tronçon. Associées aux fonctions temps de parcours, elles permettent de comparer la diminution des coûts de déplacements au montant des investissements pour améliorer les infrastructures.

Le coût collectif généralisé par véhicule sur un tronçon est, par définition :

$$C(\bar{Q}) + T(\bar{Q})(V + \epsilon)$$

où $C(\bar{Q})$ est la fonction coût - débit recherchée,
 $T(\bar{Q})$ la fonction temps de parcours - débit,
 V la valeur du temps,
et ϵ représente certains coûts complémentaires éventuels
proportionnels au temps de parcours.

La valeur du temps du véhicule moyen est elle-même une fonction dépendant :

- a) des heures de la journée, en rapport avec une répartition type entre motifs des déplacements à chacune des heures,
- b) de la longueur du parcours, mesurée par le temps de parcours total T_{OD} entre le centroïde origine et le centroïde destination.

On écrira donc :

$$V_i = V_i(T_{OD})$$

où i représente l'indice d'une heure caractéristique.

La fonction $C(\bar{Q})$ prend en compte tous les coûts collectifs autres que les dépenses de temps, c'est à dire :

- a) la consommation de carburant,
- b) la consommation d'huile,
- c) l'usure des pneus,
- d) l'entretien et les réparations courantes,
- e) l'amortissement du véhicule,
- f) le confort,
- g) les coûts d'accident,
- h) les effets externes.

Dans l'estimation de ces coûts (calculés hors taxes), on s'est reporté aux indications de l'Instruction Provisoire sur les calculs de Rentabilité des Investissements Routiers (1).

Parmi les effets externes, on notera surtout le bruit et la pollution atmosphérique, la gêne aux riverains consécutive à la suppression du stationnement ou la construction de grands axes rapides brisant l'unité des activités de voisinage.

Les nuisances de bruit et pollution atmosphérique sont difficiles à apprécier. L'estimation actuelle se fonde sur une dépense moyenne de 80 F. par an et par véhicule correspondant à l'amortissement d'un équipement spécial minimum pour réduire le bruit et la pollution atmosphérique dans des proportions considérées outre-atlantique comme suffisantes pour l'instant.

L'effet de coupure d'une voie à circulation dense et rapide dans les zones urbanisées est encore plus difficile à évaluer et devrait faire l'objet d'une analyse particulière. Il n'en est pas tenu compte ici.

Enfin, on considère que dans les rues où la demande de places de stationnement est très forte, la suppression du stationnement cause une gêne très importante que l'on estime par le coût de remplacement, sous forme de création de parcs de stationnement proches.

(1) Ministère des Travaux Publics, Direction des Routes, "Instruction Provisoire sur les calculs de Rentabilité des Investissements Routiers", 1964.

En définitive, on a pu en fonction de la localisation d'un tronçon ou d'un sous-tronçon définir des coûts unitaires par Km et par feu ne dépendant que de la catégorie de voie (R.N. et R.D. ordinaires, voie express, autoroute).

Le coût collectif C (Q) par tronçon dans un état déterminé se présente, de façon simplifiée mais suffisante pour la précision recherchée dans les calculs économiques, sous la forme d'une fonction linéaire du débit moyen.

On pourrait améliorer la précision de cette représentation, à condition de pouvoir obtenir des renseignements statistiques suffisants en utilisant une fonction du second degré.

On trouvera dans l'annexe n° 4 "Estimation des Coûts Collectifs" les justifications des valeurs numériques utilisées dans les calculs.

2.3.3. Les investissements

Le terme d'investissement est pris ici dans une acception très étendue. Il s'agit d'une opération effectuée à une époque déterminée ou sur une relativement courte période (de 1 à 2 ans), permettant une diminution consécutive des coûts des usagers et autres coûts collectifs.

Le coût de l'opération comprend les termes suivants :

- 1 - le coût de réalisation des travaux,
- 2 - le coût d'expropriation par la collectivité qui se prive d'un autre usage du sol,
- 3 - la gêne supplémentaire apportée aux usagers et aux riverains pendant la durée des travaux.

Selon une méthode classique, lorsque les travaux durent plusieurs années, les dépenses 1 et 3 sont actualisées à l'année de mise en service de l'ouvrage.

La valeur d'achat d'un terrain n'est représentative du coût collectif que si elle est égale à la somme actualisée des rentes futures dans le cas du meilleur usage possible autre que celui de support à l'infrastructure routière.

Cette question est assez délicate, mais il semble que l'on puisse se ramener, dans la plupart des cas, à la valeur d'achat des terrains voisins avant que l'opération d'expropriation soit connue. Partant d'une valeur initiale, on pourrait également admettre que par suite des tensions sur le marché des espaces disponibles la valeur du terrain va augmenter avec un taux constant d'accroissement, par exemple de 3 % l'an (en francs constants).

La gêne apportée aux usagers pendant les travaux est dans la plupart des cas difficile à apprécier et l'étude présente ne les prend que très imparfaitement en compte. Il y aurait lieu de demander aux ingénieurs, lors de l'établissement des futurs projets, de procéder à une évaluation précise de ce terme qui peut être très important.

La méthode d'optimisation qui sera exposée dans le chapitre suivant, permet de concevoir au départ un grand nombre d'opérations, dont quelques unes seulement seront choisies. Cette possibilité de faire preuve d'imagination est l'un des principaux points d'intérêt de ce modèle pour le planificateur. Le programme des calculs fera lui-même son choix en ne retenant que certaines opérations.

Les opérations relatives à chaque tronçon sont effectuées dans un ordre déterminé, grâce à une recherche préliminaire de sous-optimum. Cette hypothèse, d'ailleurs très raisonnable, facilite considérablement la recherche de la meilleure séquence d'investissements.

Cependant, une difficulté subsiste : deux opérations réalisées simultanément peuvent coûter moins cher que lorsqu'elles sont disjointes. Par exemple, le coût d'une autoroute à 2×3 voies n'est pas égal au coût d'une autoroute à 2×2 voies augmenté du coût de construction des deux voies supplémentaires.

Ainsi des calculs d'optimisation partielle sont nécessaires pour dégrossir le problème. On en trouvera plusieurs exemples dans l'annexe n° 5 "Investissements successifs à réaliser sur un tronçon routier"

Pratiquement, l'ordre logique des opérations à concevoir sur un tronçon routier peut être fondé sur les principes suivants :

- a) lorsque la congestion à l'heure de pointe n'est pas totale, ordonner les opérations suivant l'ordre décroissant du taux de rentabilité immédiate à trafic constant car ces opérations ne devraient pas bouleverser profondément le trafic affecté sur le tronçon ni sur les itinéraires concurrents ;
- b) lorsque la congestion devient totale, ranger les opérations en fonction de l'ordre décroissant des rapports du gain en capacité au coût de l'investissement car les capacités nouvelles offertes, seront comblées au fur et à mesure, par suite de l'accroissement continu de la demande.

Ces deux règles sont justifiées par le fait que la demande est croissante dans le temps.

En tissu urbain, l'ordre le plus logique semble être pour les routes ordinaires :

- la coordination des feux aux intersections situées à moins de 500 mètres,
- la suppression du stationnement sur les approches avec reconstitution des places de stationnement dans des garages ou parkings nouveaux construits à proximité,
- l'élargissement des carrefours et de leurs approches et la suppression totale du stationnement (impliquant la construction de nouveaux parcs de stationnement à proximité),
- la construction de passages supérieurs aux carrefours,
- l'élargissement général de la route.

La dernière opération ne semble pas rentable dans la plupart des cas à cause des coûts d'expropriation très élevés en tissu urbain dense. Elle pourrait trouver sa justification dans le cas de la rénovation complète d'un quartier, hypothèse qui n'est pas envisagée ici.

L'aménagement progressif des autoroutes pose un problème délicat. Du fait que les coûts des échangeurs parisiens sont très élevés, on peut envisager de les construire en deux stades, l'un partiel, l'autre définitif. En revanche, il ne semble pas que l'on ait en général intérêt à différer la construction de deux voies autoroutières d'appoint à cause de l'élévation des coûts lorsque certaines voies sont déjà utilisées.

En définitive, l'ordre proposé est le suivant, sous réserve d'études techniques complémentaires, qui font largement défaut aujourd'hui :

- construction d'une autoroute à $2 \times n$ voies, avec emprise pour 2 voies supplémentaires et construction partielle des échangeurs,
- construction totale des échangeurs,
- construction de deux voies supplémentaires (éventuellement).

On trouvera en annexe n° 6 "Coûts admis pour le calcul des investissements" et à titre d'exemple, la liste des opérations envisagées sur le réseau de pénétrantes entre Paris et les villes nouvelles du Val d'Oise.

En conclusion, il convient d'insister sur la nécessité pour la planification de disposer de nombreuses variantes techniques, de conception plus ou moins large, assorties d'estimations de dépenses assez précises. Sans cette possibilité de choix, tout modèle est inutile, et le travail de programmation apparaît bien imparfait. On ne saurait trop insister sur ce point, alors que les résultats obtenus dans le cas de la banlieue Nord-Ouest apparaissent très difficiles à interpréter, faute d'une estimation précise des diverses variantes envisagées.

3. Recherche du programme optimal

3.1. Approche économique

3.1.1. Fonction d'objectif

Le phénomène du développement urbain est un sujet très difficile à analyser et encore plus difficile à prévoir. Par exemple, on connaît encore assez mal les effets sur l'urbanisation de variations de l'accessibilité, ainsi que l'influence de la qualité de service sur le choix et le nombre des déplacements.

Il a semblé plus sage, dans une première approche, de bloquer la demande comme une fonction du temps seulement, qu'il faudrait satisfaire au mieux par récupération des investissements d'infrastructure sous forme de diminution des coûts collectifs permanents des usagers et des riverains.

D'un autre côté, la prévision même globale de la demande de transport, ainsi que celle des caractéristiques futures des moyens utilisés (infrastructure et véhicules), ne peuvent raisonnablement s'apprécier que pour une période relativement courte. On a estimé ici qu'une vingtaine d'années étaient un maximum dans une région parisienne qui allait voir des bouleversements assez importants. On est alors amené à minimiser un bilan actualisé : coût d'infrastructure + coût des usagers + coût des riverains sur cette période de 20 ans, sous réserve de prendre en compte par des valeurs résiduelles les services rendus par les nouveaux investissements au-delà de l'horizon.

D'après ce qui précède, la fonction d'objectif est un bilan collectif à minimiser, incluant des valeurs de différentes sortes :

- a) des coûts classiques, comme les dépenses d'infrastructure, d'entretien et d'administration, ainsi que les dépenses directes des usagers, comme l'amortissement du véhicule, l'achat d'essence, d'huile, l'entretien et les réparations du véhicule, l'usure des pneus, les coûts matériels d'accidents,
- b) la valeur d'usage des terrains,
- c) les valeurs de confort des usagers et de gêne pour les riverains par suite du bruit et de la pollution atmosphérique,
- d) les valeurs affectives, comme coût du décès par accident et les valeurs sociales ou communautaires, comme l'effet de détérioration de l'environnement.

Le bilan ne comprend que des valeurs collectives (coûts hors taxes). On ne tient pas compte de la valeur que la collectivité pourrait attribuer aux transferts monétaires entre individus et collectivités.

3.1.2. Les valeurs résiduelles

L'évaluation des valeurs résiduelles à la fin de la période d'étude pose toujours un problème difficile. Il l'est d'autant plus que les investissements en infrastructure de transport ici considérés ont une longue durée de vie, et que par conséquent, les valeurs prises en compte pèsent lourdement dans le bilan.

En théorie, la valeur résiduelle est égale à la somme des avantages futurs procurés par l'équipement au-delà de 1990. En avenir certain, on pourrait calculer ces valeurs : cette démarche reviendrait à étendre la période d'étude jusqu'à l'infini. On est donc conduit nécessairement à estimer, sur la base de quelques hypothèses simplificatrices, ces valeurs résiduelles.

On peut imaginer deux sortes d'hypothèses :

- 1°/ La première consiste à considérer que l'ensemble des opérations considérées doit être en tout état de cause réalisé et que le problème n'est que de choisir une date de réalisation. On suppose alors que toutes les opérations seront effectivement réalisées au plus tard à la date horizon ; il en résulte ainsi que le problème de la valeur résiduelle tombe puisque au-delà de l'horizon, l'état du système est fixé, et qu'il n'y a plus de comparaison à faire. On ne comptera alors comme coût d'investissement que le coût de l'avancement de cet investissement de la date horizon à la date où il est effectivement réalisé.
- 2°/ On se donne une loi d'évolution des avantages apportés par chaque équipement au-delà de 1990. Dans l'hypothèse où les avantages sont constants, la valeur résiduelle est $\frac{A_n}{i}$, A_n étant l'avantage à l'année horizon 1990, et i le taux d'actualisation. Plus généralement, pour tenir compte des facteurs d'incertitude sur l'évolution du trafic et l'obsolescence des équipements, on peut prendre $K \cdot \frac{A_n}{i}$.

En définitive, dans l'état actuel du modèle, le premier mode d'estimation a été choisi. On envisage d'en tester l'effet en refaisant certains calculs selon l'autre estimation.

3.1.3. Les différentes méthodes de résolution envisageables pour traiter un tel problème

De nombreux modèles ont été élaborés sur le thème considéré. Les plus simples considèrent que les investissements peuvent varier selon une loi continue. Dans cette hypothèse, on trouve des méthodes de résolution simples. Les plus intéressants sont sans doute ceux de Carter et Stowers, et celui de Ridley.

a) Le modèle de Carter et Stowers

Parmi les études antérieures, on trouvera principalement le modèle de Carter et Stowers, où la fonction coût unitaire des usagers en fonction du débit est représentée par deux paliers et où le coût de l'accroissement unitaire de capacité sur un tronçon est constant.

L'optimisation revient à la minimisation d'une fonction d'objectif linéaire sous contrainte linéaire c'est à dire à une programmation linéaire. On trouvera une description plus détaillée de cette méthode en annexe n° 7 "Modèle de Carter et Stowers". On peut reprocher à ce modèle, d'une part une représentation assez grossière de la fonction coût - débit, mais surtout le fait d'admettre que le coût d'accroissement unitaire de capacité puisse être constant. En fait, d'une part la capacité ne peut augmenter de façon continue sur un tronçon, mais au moins du débit d'une voie ; d'autre part, le coût pour ajouter une voie peut varier dans des proportions considérables si l'on supprime, par exemple, le stationnement dans un premier stade, puis si l'on élargit la rue par voie d'expropriation dans un deuxième stade. Une autre faiblesse est l'optimisation à une date déterminée et non pas d'après un bilan établi sur une longue période ce qui exige une affectation forfaitaire annuelle des charges d'investissements. On pourrait, il est vrai, généraliser le modèle de Carter et Stowers en multipliant la dimension du problème par le nombre de plans quinquennaux divisant une période d'analyse de 20 ans par exemple.

b) Le modèle de Ridley

Un autre modèle, le modèle de Ridley, considère une fonction temps de parcours qui décroît linéairement en fonction de l'investissement. Les recherches préliminaires qui ont été effectuées à l'occasion de cette étude, ont montré que l'effet des investissements sur les temps de parcours étaient très variables suivant le type d'investissement et l'état de congestion des tronçons, de sorte que ce modèle ne semble pas approprié.

Ces modèles sont sans aucun doute bâtis sur des hypothèses trop simplificatives pour permettre de résoudre le problème concret posé ici. Cependant, une réflexion reposant sur l'hypothèse de continuité des investissements n'est pas sans intérêt pour orienter l'analyse des opérations.

On trouvera, en annexe n° 8, "Estimation des valeurs résiduelles par la méthode des coûts de dernière année", une approche entièrement continue où les fonctions coût des usagers sont des fonctions continues du débit et du niveau d'investissement, la demande est une fonction continue du temps et l'affectation du trafic vérifie un modèle continu d'affectation. Ainsi, le débit sur un tronçon devient une fonction continue de l'état du réseau représenté par le niveau d'investissement sur chaque tronçon et du temps. Un cas particulier est celui où les usagers s'affectent sur le réseau de façon à minimiser à tout instant le bilan usagers. On peut alors montrer que la rentabilité immédiate à trafic constant de l'investissement marginal sur un tronçon, doit être à l'optimum constamment égal au taux d'actualisation.

En définitive, ces diverses approches permettent davantage de situer le problème que de le résoudre. Le souci de réalisme conduit à envisager les différentes combinaisons possibles d'investissements. On s'écarte ainsi des méthodes analytiques de résolution, au profit d'un problème combinatoire d'une dimension très élevée. On indiquera ci-dessous un processus de résolution permettant de ne pas envisager toutes les séquences possibles.

Il convient d'insister enfin sur la dépendance des différentes opérations envisagées. Autrement dit, l'intérêt du modèle tient au fait qu'un investissement ne peut être considéré isolément. Par conséquent, sa rentabilité (ou sa date optimale de réalisation) est contingente à l'aménagement de l'ensemble du réseau.

3.2. Méthode de résolution

3.2.1. Le processus de calcul

Sous son aspect le plus général, le problème se présente ainsi : essayer toutes les combinaisons possibles d'investissements et de dates de réalisation de ces investissements, de façon à choisir la combinaison qui conduit au bilan minimum. Il est évident que sous cette forme, le problème est d'une dimension telle que nos meilleurs moyens de calcul ne permettent pas d'en venir à bout. On est donc conduit à chercher un cheminement, permettant d'écarter de nombreuses variantes pour se rapprocher de l'optimum cherché.

3.2.1.1. Le cheminement

La méthode qui a fait l'objet d'une programmation sur ordinateur peut se décomposer ainsi :

- a) choisir un programme initial d'investissements, c'est à dire fixer à partir de l'état initial les différentes améliorations possibles réalisées aux différentes époques de la période d'analyse ;
- b) partant de ce programme initial, déplacer chaque date de réalisation d'investissement d'un plan en avant ou d'un plan en arrière, et calculer quelle est la variation consécutive du bilan actualisé ;
- c) choisir parmi ces déplacements celui qui diminue le plus le bilan actualisé et effectuer ce déplacement (1) ;
- d) ayant effectué le déplacement, les caractéristiques d'affectation des usagers sur le réseau sont modifiées et il faut recommencer à étudier l'effet de différents déplacements d'investissements sur la période perturbée par le déplacement précédent ;
- e) on peut alors choisir à nouveau le déplacement qui a l'effet le plus important sur la minimisation du bilan et ainsi de suite.

Les limites de la méthode sont évidentes. D'une part, on ne peut déplacer un investissement que d'un plan quinquennal à la fois ; d'autre part on essaye l'effet d'un seul déplacement d'investissement à la fois et non d'une combinaison de déplacements d'investissements.

(1) On peut utiliser d'autres critères de choix, par exemple choisir l'investissement qui a le plus haut taux de rentabilité immédiate. L'effet du critère sur la séquence finale est testé dans la phase exploitation.

On constate ainsi que les premières orientations influent fortement sur les modifications ultérieures : autrement dit, la méthode risque de conduire à un sous-optimum, et de laisser échapper des situations meilleures situées dans une "direction différente". Ce fait résulte de ce que certains investissements sont concurrents. L'avance d'un investissement a pour effet de dérentabiliser certains investissements concurrents et au contraire, le recul d'un investissement rentabilise les investissements concurrents.

On est donc conduit à envisager plusieurs séquences initiales de façon à décrire l'ensemble du possible, sans oublier de solutions particulièrement intéressantes.

3.2.1.2. Le programme initial d'investissements

Encore faut-il bien choisir les séquences initiales. Il faut pour cela une méthode de dégrossissage conduisant à des séquences initiales réalistes. Le problème des pénétrations urbaines se présente généralement dans un contexte où les axes sont saturés à certaines heures de pointe et il est donc important de trouver les capacités supplémentaires.

Dans le cas des axes de pénétrations entre Paris et les villes nouvelles du Val d'Oise, nous avons été amenés à dessiner des cordons successifs circulaires autour de Paris et à étudier quelles étaient les capacités minimales qu'il fallait fournir sur le réseau pour écouler les trafics de l'heure de pointe la plus critique. On peut alors classer sur ces cordons les investissements possibles en fonction de la rentabilité par augmentation de capacité équivalente, c'est à dire, suivant le rapport $\frac{\Delta C_p}{\Delta I}$ où ΔC_p est l'augmentation de ca-

pacité en véhicules-heure,
et ΔI le montant de l'investissement pour obtenir cette augmentation.

En définitive, on analyse à chaque époque la situation sur chaque cordon et on choisit les investissements les plus rentables de façon à satisfaire la demande de l'heure de pointe. On obtient ainsi le programme initial d'investissements.

3.2.1.3. Les limites de la méthode

A partir de chaque séquence initiale, le programme conduit à des modifications successives donnant des variations de bilan décroissantes. On arrête les calculs lorsqu'on atteint une amplitude de ces variations jugée suffisante, compte tenu de la précision des données.

En définitive, la méthode proposée permet diverses orientations dans l'étude d'un réseau de transport :

- Comparaison de programmes d'investissement,
- Amélioration d'une séquence initiale imaginée a priori,
- Obtention - par une méthode dérivée exposée au § 4.4. - d'un programme d'investissement "quasi-optimal".

Partant de plusieurs programmes initiaux, on réduit le risque de laisser échapper l'optimum général. Dans tous les cas, le rôle de l'économiste reste prépondérant, pour imaginer des programmes possibles, que le modèle des pénétrantes urbaines permet d'améliorer et de comparer.

3.2.2. La structure des sous-programmes

3.2.2.1. Organisation générale

La structure du problème ainsi que les contraintes de capacité de la mémoire centrale du ordinateur électronique utilisé (IBM 1130) ont conduit au découpage du programme en sous-programmes.

L'organigramme ci-joint schématise le processus des calculs et les connections entre ces divers sous-programmes.

On y reconnaît successivement :

1. L'entrée des données (paramètres des fonctions de coût, séquence initiale, trafics).
2. L'état du réseau étant connu, les trafics sont affectés sur celui-ci séparément pour chacune des 3 heures caractéristiques de chaque période.
3. Les bilans des coûts des usagers et des coûts d'investissements sont calculés pour chaque période et actualisés à l'année de départ (1970).
4. Pour tout déplacement d'investissement possible sur chaque tronçon, on évalue la variation du bilan des coûts qu'entraînerait un tel déplacement.

Ce calcul peut être fait :

- soit en supposant que l'affectation du trafic n'est pas modifiée par le déplacement d'investissement (méthode simplifiée utilisée pour "dégrossir" le problème),
- soit en supposant une réaffectation partielle ou complète des trafics due à la modification du tronçon (méthode complète appliquée en tout état de cause dans le cas où le déplacement d'investissement est en fait la création ou la suppression d'un tronçon).

Chacune de ces méthodes sera précisée dans les paragraphes suivants.

5. Choix - soit automatique (par la machine) sur l'ensemble des périodes du déplacement unique entraînant la plus grande diminution du bilan des coûts,
- soit au gré de l'opérateur de déplacements sur plusieurs tronçons simultanément au cours d'une même période.
6. Réalisation du ou des déplacements d'investissements choisis, appelant avec la nouvelle séquence d'investissement, l'affectation des trafics au réseau, le calcul du bilan, etc ...

3.2.3.2. Affectation complète

Le but de la méthode d'affectation complète décrite ci-dessous est d'obtenir un chargement équilibré du réseau, représentant de façon réaliste la répartition des trafics entre itinéraires.

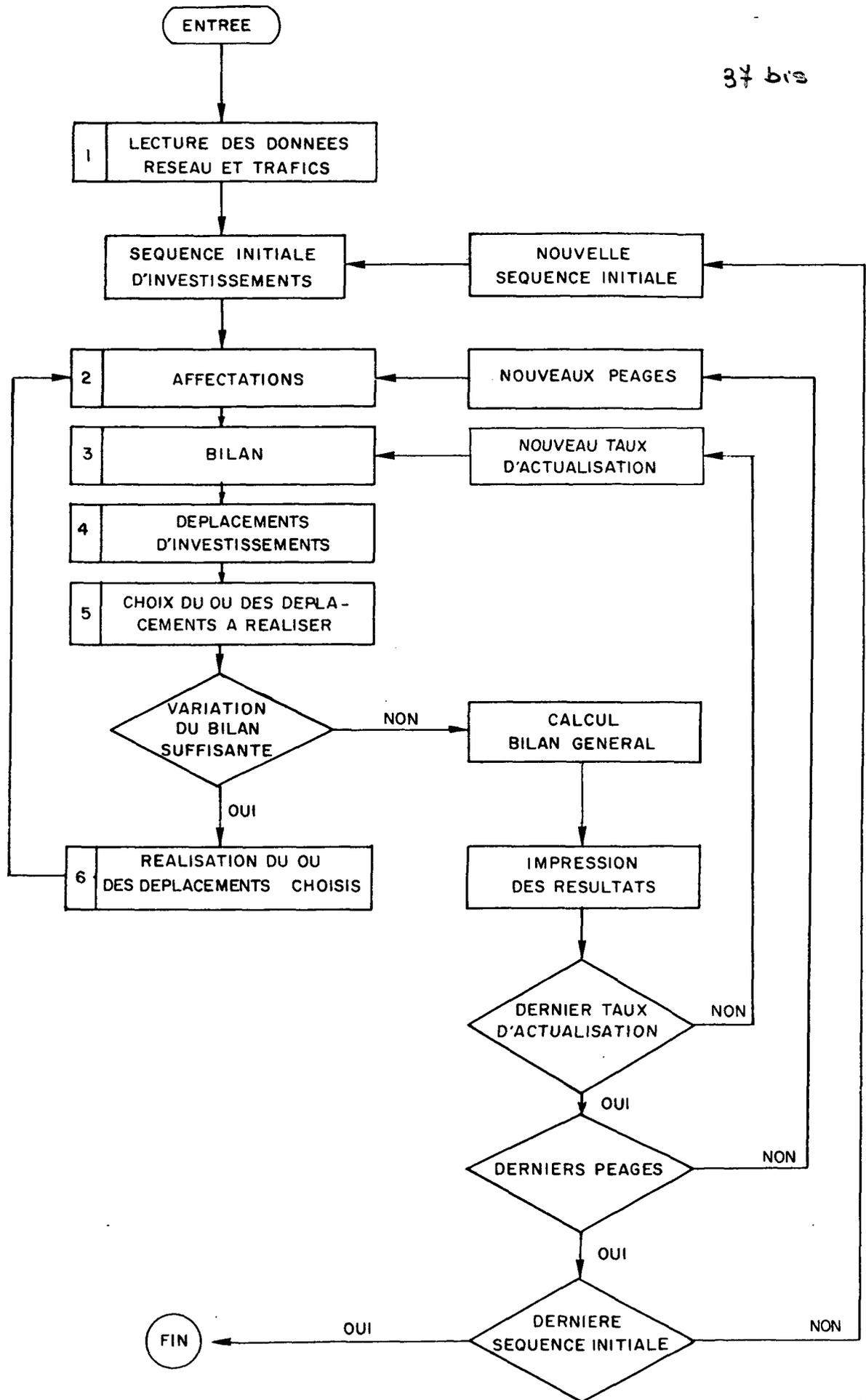
Les coûts ressentis par les usagers comprenant le temps de parcours et éventuellement les péages sur autoroutes sont fonction du trafic sur chaque tronçon ainsi qu'il a été précisé plus haut (§ 2.3.).

Une fois la totalité du trafic affecté au réseau, les coûts de l'utilisateur sur les différents itinéraires effectivement utilisés d'une zone origine à une zone destination ne doivent pas être sensiblement différents.

L'affectation est réalisée de façon progressive par la méthode suivante :

1^{ère} itération : Le temps de parcours de chaque tronçon est d'abord calculé avec un trafic égal au trafic local du tronçon.

L'itinéraire le plus court est alors déterminé pour chaque couple origine - destination, et une fraction fixée (50 % par exem-



ple) des trafics origine - destination QOD est affectée sur les tronçons composant ces itinéraires.

2ème itération : Les temps de parcours sont calculés à nouveau en fonction du trafic total affecté à ce stade sur chaque tronçon.

Une nouvelle fraction des trafics QOD est affectée aux (nouveaux) itinéraires les plus courts.

Dernière itération : La fraction restante des trafics QOD est affectée aux itinéraires les plus courts.

On peut choisir suivant la précision désirée, aussi bien le nombre d'itérations que les pourcentages affectés lors de chacune d'elles.

3.2.3.3. Déplacement d'investissement - Réaffectation partielle

Le déplacement d'un investissement sur un tronçon d'une période à la précédente ou à la suivante se traduit par la variation du niveau d'investissement sur ce tronçon de + 1 ou - 1, suivant qu'il s'agit d'une avance ou d'un recul.

Ceci entraîne une variation des coûts des usagers donc une affectation différente sur le réseau et par suite une variation des coûts collectifs. Pour évaluer cette dernière variation, il serait trop lourd de refaire une affectation complète suivant la méthode décrite ci-dessus (§ 3.2.3.2.) Aussi s'est-on tourné systématiquement vers des méthodes d'évaluation approchée, tout au moins dans une première phase et lorsque le déplacement d'investissement envisagé ne constitue pas une suppression ou une création pure et simple d'un tronçon.

Les méthodes employées sont les suivantes :

- a) Aucune réaffectation : Si l'on suppose que l'affectation des trafics au réseau reste inchangée, seuls les coûts des usagers sur le tronçon modifié varient.

- b) Réaffectation partielle : Dans cette méthode, on détermine pour tous les couples origine - destination le meilleur itinéraire possible comprenant le tronçon modifié.

On suppose ensuite que la part des trafics origine - destination prélevée sur les itinéraires initialement chargés, et affectée à ce nouvel itinéraire est fonction du rapport des temps de parcours calculés sur les anciens et le nouvel itinéraire.

On trouvera en annexe n° 10 "Réaffectation partielle" des précisions sur cette méthode et les valeurs numériques utilisées en pratique, ainsi que sur le calcul de la variation du bilan des coûts entraînée par une réaffectation.

4. Résultats d'exploitation

4.1. Résultats Généraux

4.1.1. Temps d'exploitation

Lors de la mise au point du programme sur ordinateur, les différents éléments du programme ont été testés à tour de rôle, en particulier le modèle d'affectation complète et celui d'affectation partielle.

Les essais lors de l'exploitation sur IBM 1130 ont montré qu'avec un réseau comportant 152 tronçons, 33 noeuds et 70 couples origine destination :

- a) pour une période, l'affectation complète du trafic dans les deux sens et pour les 3 heures caractéristiques prend environ 3 minutes (avec 4 itérations). Le calcul consécutif du bilan de la période est effectué en 30 secondes.
- b) Le calcul de la variation du bilan entraînée par un déplacement d'investissement demande environ :
 - 5 secondes sans réaffectation des trafics,
 - 30 secondes avec réaffectation partielle des trafics,
 - 2,5 minutes avec réaffectation complète.
- c) La réalisation d'un déplacement d'investissement suivi d'une affectation complète, du calcul du bilan et de tous les essais de déplacement d'investissement sur la période correspondante prend de 5 à 20 minutes.

En définitive, à condition de partir d'une séquence d'investissement déjà assez bien dégrossie, on peut espérer obtenir une solution convenable en une douzaine d'heures, ce qui correspond à environ une quarantaine de déplacements d'investissements.

4.1.2. Importance de la séquence initiale

On a ensuite cherché à déterminer quelle pouvait être l'influence du choix de la séquence initiale sur la programmation proposée par l'ordinateur. Pour cela, on a d'abord considéré une première séquence initiale où les améliorations du réseau étaient recherchées exclusivement sur les routes nationales (4.2.) puis une seconde séquence initiale où ces améliorations étaient recherchées principalement sous forme de construction d'autoroutes de pénétration (4.3.).

Ayant ainsi obtenu deux séquences finales dont les bilans étaient certes très inférieurs aux bilans initiaux mais qu'il était encore possible d'améliorer, une méthode de cheminement différente a été essayée, inspirée de la programmation dynamique (4.4.).

Ces essais se sont avérés très intéressants puisqu'ils ont permis d'aboutir à une séquence "quasi-optimale" sur laquelle aucun déplacement élémentaire d'investissement ne donne plus de diminution du bilan.

On a ensuite vérifié, en partant d'une séquence initiale aussi différente que possible de cette séquence quasi-optimale, que la même méthode aboutissait bien à retrouver cette dernière séquence (4.5.).

4.1.3. Paramétrages

Prenant toujours comme séquence de départ la séquence optimale ainsi déterminée, on a ensuite essayé les paramétrages suivants :

- Augmentation du taux d'actualisation (4.6.)
- Hypothèse faible concernant la valeur du temps (4.7.)
- Hypothèse forte concernant le pourcentage de déplacements en voitures particulières (4.8.)

Il faut noter que les bilans obtenus dans chacune de ces hypothèses ne sont pas directement comparables compte tenu des valeurs différentes des paramètres qui interviennent dans leur calcul, seuls les montants donnés dans les tableaux d'investissement peuvent être comparés, n'étant pas actualisés.

4.2. Résultats de la séquence routière

Les calculs n'ont été effectués qu'avec un seul taux d'actualisation : 7 %. La solution initiale ne prévoyait que des investissements sur routes nationales et départementales. Les investissements principaux étaient l'élargissement à quatre voies de la N 184, entre la Croix de Noailles et l'échangeur avec A 14, et l'élargissement de carrefours sur la N 184 dès 1970, la construction de la déviation de Conflans en 1975, l'élargissement du CD 106 et du CD 13 entre le Pont d'Argenteuil et le carrefour avec la N 308 en 1975, l'élargissement de la N 192 entre la Patte d'Oie d'Herblay et Bezons en 1980. L'autoroute A 14 est supposée réalisée en 1970.

Le programme n'a ensuite introduit que de nouveaux investissements sur routes nationales et départementales. C'est ainsi que sont intervenues les améliorations supplémentaires suivantes :

- Elargissement général de la N 192 entre Bezons et La Défense dès 1973,
- Elargissement général de la N 308 entre Maisons Laffitte et Bezons dès 1975,
- Avance à 1970 de l'élargissement de la D 106 et D 113 entre le Pont d'Argenteuil et la Garenne Colombes,
- Avance à 1973 de la construction de la déviation de Conflans sur la N 184,
- Avance à 1975 de l'élargissement à 4 voies de la N 192 entre la Patte d'Oie d'Herblay et Bezons,
- N 14 A, mise en gabarit à 4 voies dès 1975.

Le bilan actualisé en 1970 de la séquence initiale est de 60 milliards de Francs, dont 135 millions de Francs pour la part des investissements, compte tenu de la récupération des valeurs résiduelles en 1990. La séquence finale, obtenue au bout de 6 heures de calcul, correspond à un bilan actualisé de 45 milliards de Francs dont 206 millions de Francs pour la part des investissements.

Alors qu'au début du calcul, chaque déplacement d'investissement faisait diminuer le bilan d'environ 2 milliards de Francs, au bout de 26 déplacements, la diminution du bilan dûe à un déplacement n'était plus que de 10 millions de Francs. On trouvera ci-après la répartition du montant des investissements entre les différentes périodes.

Année de réalisation	Montant des investissements (F)
1970	10 899 627
1972 $\frac{1}{2}$	7 910 640
1975	18 169 135
1980	1 486
1985	798 012
	<hr/>
TOTAL :	37 778 900

4.3. Résultats de la séquence autoroutière

Cette séquence est traitée avec le même taux d'actualisation que précédemment : 7 %. La solution initiale prévoit : principalement des investissements sur les autoroutes, complétés par des investissements routiers de façon à éviter que le trafic purement local ne dépasse la capacité des tronçons aux heures de pointe.

Les principaux investissements sont les suivants :

- Sur A 15, le tronçon entre Pontoise et la Patte d'Oie d'Herblay est réalisé en 1970 et le restant entre la Patte d'Oie d'Herblay et la Porte Pouchet est réalisé en 1980 sous forme de voie express ;
- Sur A 20, l'ensemble entre la Patte d'Oie d'Herblay et la Porte d'Asnières est réalisé en 1980, sous forme de voie express ;

- Sur la N 308, les tronçons entre Maisons Laffitte et Bezons et entre la Porte Champerret et la Garenne Colombes sont élargis en 1985 ;
- Sur la N 192, le stationnement est supprimé entre la Garenne Colombes et La Défense ;
- L'autoroute A 14 est toujours supposée réalisée avant 1970.

Le programme a traité la séquence initiale en procédant à des déplacements d'investissement à la fois sur routes ordinaires et sur autoroutes.

Les modifications suivantes sont intervenues :

- A 15 : recul à 1980 de la construction du tronçon joignant la Patte d'Oie d'Herblay à Pontoise. Construction en voie express à 2 x 3 voies dès 1970 puis au stade autoroute en 1985, du tronçon entre La Patte d'Oie d'Herblay et Sannois.
Enfin, avance à 1970 de la construction à 2 x 4 voies du tronçon allant de la Porte Ponchet à Sannois.
- A 20 : recul à 1990 de la construction entre la Garenne Colombes et la Patte d'Oie d'Herblay, mais avance à 1970 de la construction à 2 x 3 voies du tronçon entre la Porte d'Asnières et la Garenne Colombes.
- RN 192: élargissement à 4 voies dès 1970 du tronçon entre Bezons et la Patte d'Oie d'Herblay, construction en 1970 de passages souterrains sur le tronçon entre la Garenne Colombes et Bezons.

- Des améliorations diverses sur routes existantes, en particulier des élargissements avec construction de passages supérieurs sur la N 14 entre la Porte de Clignancourt et le Vert Galant et sur la N 14 A entre le Vert Galant et A 1, l'élargissement à 4 voies en 1970 de la N 308 entre la N 192 et Maisons Laffitte.

Le bilan actualisé en 1970 de la séquence initiale est de 39 milliards dont 44 millions de Francs pour la part des investissements. Dans la séquence finale obtenue au bout de 15 heures de calcul, le bilan actualisé est réduit à 26 milliards de Francs dont 551 millions de Francs pour les investissements d'infrastructure.

Alors qu'au début du calcul, chaque déplacement d'investissement faisait diminuer le bilan d'environ 250 millions de Francs, au bout de 55 déplacements la diminution du bilan due à un déplacement n'était plus que de 10 millions de Francs. On trouvera ci-après la répartition du montant des investissements entre les différentes périodes.

Année de réalisation	Montant des investissements (F)
1970	685 625 100
1972 $\frac{1}{2}$	0
1975	37 794 600
1980	117 029 900
1985	51 955 700
	<hr/>
TOTAL	: 892 405 300

4.4. Obtention d'une séquence optimale

Ainsi qu'il vient d'être indiqué dans le § 4.1., les séquences finales obtenues après les premiers essais (4.2. et 4.3.) pouvaient être encore améliorées.

Une méthode de choix des déplacements d'investissement à réaliser, différente du cheminement utilisé auparavant a alors été employée. Dans cette dernière méthode, on considère chaque période séparément pour l'optimisation : on commence par déterminer, en laissant le programme réaliser une série de déplacements élémentaires, un état "quasi-optimal" du réseau, pour la 1ère période (ou la dernière) tel que le niveau d'investissement ne puisse être modifié sur aucun tronçon sans qu'augmente le bilan des coûts. On progresse ensuite d'une période à la suivante (ou à la précédente), déterminant ainsi de proche en proche une "séquence quasi-optimale".

Il est à noter qu'une telle méthode ne peut être employée que sous la condition d'indépendance des bilans économiques de chacune des périodes. Si une telle condition se trouve remplie par définition pour la part du bilan que constituent les coûts des usagers, elle implique par contre que les coûts d'investissement ne dépendent que de l'état du réseau pendant la période à laquelle ils sont imputés. Les hypothèses admises pour le calcul des valeurs résiduelles (§ 3.1.2.) ont permis de satisfaire à cette condition.

Les résultats ont été les suivants.

Séquence initiale : Séquence Routière finale (4.2.) Bilan : 45 milliards

Principaux investissements :

- A. 15 : Tronçon Patte d'Oie d'Herblay - Pontoise réalisé en 1975 (2 x 2 voies)
Tronçons Porte Pouchet - Patte d'Oie d'Herblay à réaliser dès 1970 (2 x 4 voies puis 2 x 3 voies après Sannois).
- A. 20 : Tronçons la Garenne Colombes - Patte d'Oie d'Herblay à réaliser après 1990
Tronçon Porte d'Asnières - La Garenne Colombes à réaliser dès 1970 (2 x 4 voies).

Route Nationales : De nombreux investissements sont réalisés, la plupart dès 1970 sur les R.N. 13, R.N. 192 (dans sa totalité), R.N. 184, R.N. 308, R.N. 309, D 106 (Aménagements partiels), et R.N. 14 (dans sa totalité).

Routes projetées : Réalisation dès 1970 avec coordination des feux ou en voie express des liaisons suivantes : A.14 - R.N. 308, A.14 - La Garenne Colombes, et A.14 - Boulevard Périphérique.

Il est à noter que l'autoroute A.14 est toujours supposée réalisée en 1970

Séquence finale : La séquence quasi-optimale ainsi obtenue donne les résultats suivants :

Bilan : 14 Milliards dont 830 Millions pour la part des investissements
Dernières diminutions du bilan : 1 Million de F. par déplacement

Tableau des investissements :

Année de Réalisation	Montant des investissements (Millions de F.)
1970	1 096,6
1972 $\frac{1}{2}$	0
1975	42
1980	7
1985	0
	<hr/>
TOTAL	1 145,60

4.5. Vérification de la séquence optimale

Prenant tout d'abord pour séquence initiale la séquence autoroutière finale (§ 4.3.) on a abouti à la même séquence optimale (§ 4.4.).

Une deuxième vérification, plus probante, a été réalisée ; on a défini une séquence initiale aussi différente que possible de la séquence optimale obtenue précédemment, en supposant réalisée la construction de A 20 dès 1970 et en supprimant au contraire A 15 et tous les investissements sur les routes concurrentes de A 20.

Le programme a commencé par introduire à nouveau la construction partielle de A 15 à 2 x 2 voies entre Porte Pouchet et Patte d'Oie d'Herblay, puis la plupart des aménagements que l'on avait supposé supprimés sur les Routes Nationales. L'autoroute A 20 n'était dès lors

plus rentable, et a été éliminée. Enfin des aménagements complémentaires sur les routes nationales et sur A 14 furent introduits, aboutissant à une séquence finale presque identique à la séquence optimale (§ 4.4.).

Cette dernière séquence fut toujours utilisée par la suite pour les divers paramétrages comme point de départ.

4.6. Paramétrage sur le taux d'actualisation

Une augmentation du taux d'actualisation - de 7 % à 15 % - a entraîné les modifications suivantes :

- A 15 Recul à 1980 de la construction du tronçon Patte d'Oie d'Herblay - Pontoise (2 x 2 voies).
- D 106 et D 13 Recul à 1975 Tronçon La Garenne Colombes - Pont D'Argenteuil (Remplacement du stationnement latéral par des parcs hors-rue).
- N 14 Recul à 1975 de la construction de 4 passages supérieurs sur le tronçon Sannois - Patte d'Oie d'Herblay.

Bilan : 9,5 Milliards dont 1,02 Milliard pour la part des investissements (compte tenu du taux d'actualisation).

Dernières diminutions du bilan : 1 Million de F par déplacement
Tableau des investissements

Année de réalisation	Montant des investissements (Millions de F.)
1970	1 071,6
1972 $\frac{1}{2}$	0
1975	25
1980	49
1985	0
TOTAL	1 145,6

4.7. Paramétrage sur la valeur du temps des usagers

Reprenant le taux d'actualisation de 7 % et la séquence optimale qui lui correspond (§ 4.4.) on a ensuite réduit la valeur du temps pour les usagers à 3,60 F/heure.

Les modifications suivantes, plus sensibles qu'en 4.6., ont été introduites :

- A 15 : Recul à 1980 Tronçon Patte d'Oie d'Herblay - Pontoise (2 x 2 voies)
" à 1973 " Sannois - Patte d'Oie d'Herblay (2 x 3 voies)
- A 20 : Recul à 1975 Tronçon Porte d'Asnières - La Garenne Colombes (2 x 3 voies)
Recul après 1990 Tronçon Porte d'Asnières - La Garenne Colombes (Elargissement à 2 x 4 voies)
- N 184 : Recul à 1985 Tronçon St Germain - Croix de Noailles (Elargissement à 4 voies)
- N 309 : Recul à 1990 Tronçon Asnières - Pont d'Argenteuil (Remplacement du stationnement latéral par des parcs hors-rue)

Bilan : 9,4 Milliards dont 739 Millions pour la part des investissements.
Dernières diminutions du bilan : 100 000 F.

Tableau des investissements

Année de réalisation	Montant des investissements (Millions de F.)
1970	826,1
1972 $\frac{1}{2}$	40
1975	200
1980	42
1985	<u>7</u>
TOTAL	1 115,1

4.8. Paramétrages sur la demande

Les trafics origine - destination ont été ensuite augmentés uniformément de 50 % à toutes les périodes, les trafics locaux n'étant pas modifiés.

Partant de la même séquence optimale (§ 4.4.) et avec le taux d'actualisation de 7 %, le programme n'a introduit d'investissements que sur les autoroutes. Ceci a confirmé que les trafics origine - destination justifient principalement les infrastructures autoroutières, des aménagements sur le réseau routier restant nécessaires pour écouler les trafics locaux.

-A 14 Adjonction d'une voie par sens sur le tronçon N 186 - St Germain en 1975

-A 15 Adjonction d'une voie par sens sur le tronçon Sannois - Patte d'Oie d'Herblay en 1975

Avance à 1973 de la construction du tronçon Patte d'Oie d'Herblay - Pontoise (2 x 2 voies)

Bilan : 16 Milliards dont 843 Millions pour la part des investissements
Dernières diminutions du bilan : 500 000 F.

Tableau des investissements

Année de réalisation	Montant des investissements (Millions de F.)
1970	1 096,6
1972 $\frac{1}{2}$	47,3
1975	4
1980	7
1985	0
TOTAL	1 154,9

4.9. Conclusions

La construction des autoroutes a permis de réduire considérablement le bilan général actualisé en diminuant les temps de parcours et les coûts d'exploitation des véhicules sur les trajets entre Paris et la banlieue. Les trajets sont ramenés à 20 minutes environ entre Pontoise et le boulevard périphérique.

La diminution du bilan général actualisé est obtenue par une masse importante d'investissement dont le montant représente environ 1/15ème du bilan général et dont les valeurs résiduelles en 1990 sont estimées à 220 Millions de Francs en valeur actualisée.

Il faut noter l'importance des investissements à réaliser dès 1970, et la part relativement faible de ceux qui viennent s'y ajouter après cette date. Ces deux observations peuvent s'expliquer l'une par le retard d'équipement de la Région Parisienne, l'autre par la croissance modérée des trafics entre 1970 et 1990 dans les hypothèses admises jusqu'ici. Ces phénomènes permettent aussi d'expliquer vraisemblablement le peu de modifications apportées à la séquence optimale après une augmentation sensible du taux d'actualisation.

La faible croissance des trafics a comme autre conséquence que très peu d'investissements sont réalisés en 1972 $\frac{1}{2}$. Le programme a introduit les investissements dès 1970 ou les a repoussés à 1975, ce qui semble indiquer qu'avec les hypothèses de trafics admises, la précision du $\frac{1}{2}$ plan est un peu illusoire, même pour les périodes les plus rapprochées.

Il faut noter toutefois que retard d'équipement et croissance modérée des trafics sont particuliers au cas d'application choisi. La structure du programme d'investissements obtenu doit donc être jugée en fonction de ces phénomènes, et ne remet pas en cause la méthode elle-même.

D'un point de vue plus général, ces résultats permettent de confirmer :

- que les trafics locaux peuvent à eux seuls justifier des aménagements importants sur les routes existantes,
- que le processus de calcul choisi permet bien d'introduire des investissements sur les tronçons successifs d'une autoroute, en rapport avec l'importance des trafics à longue distance qu'il faut écouler.

*

* * *

A l'issue de ce tour d'horizon des diverses exploitations du modèle réalisées à ce jour, il paraît utile de rappeler le caractère méthodologique de l'étude entreprise et que les résultats obtenus doivent être jugés comme un test de la méthode, et non dans leurs conséquences sur le cas particulier d'application choisi.

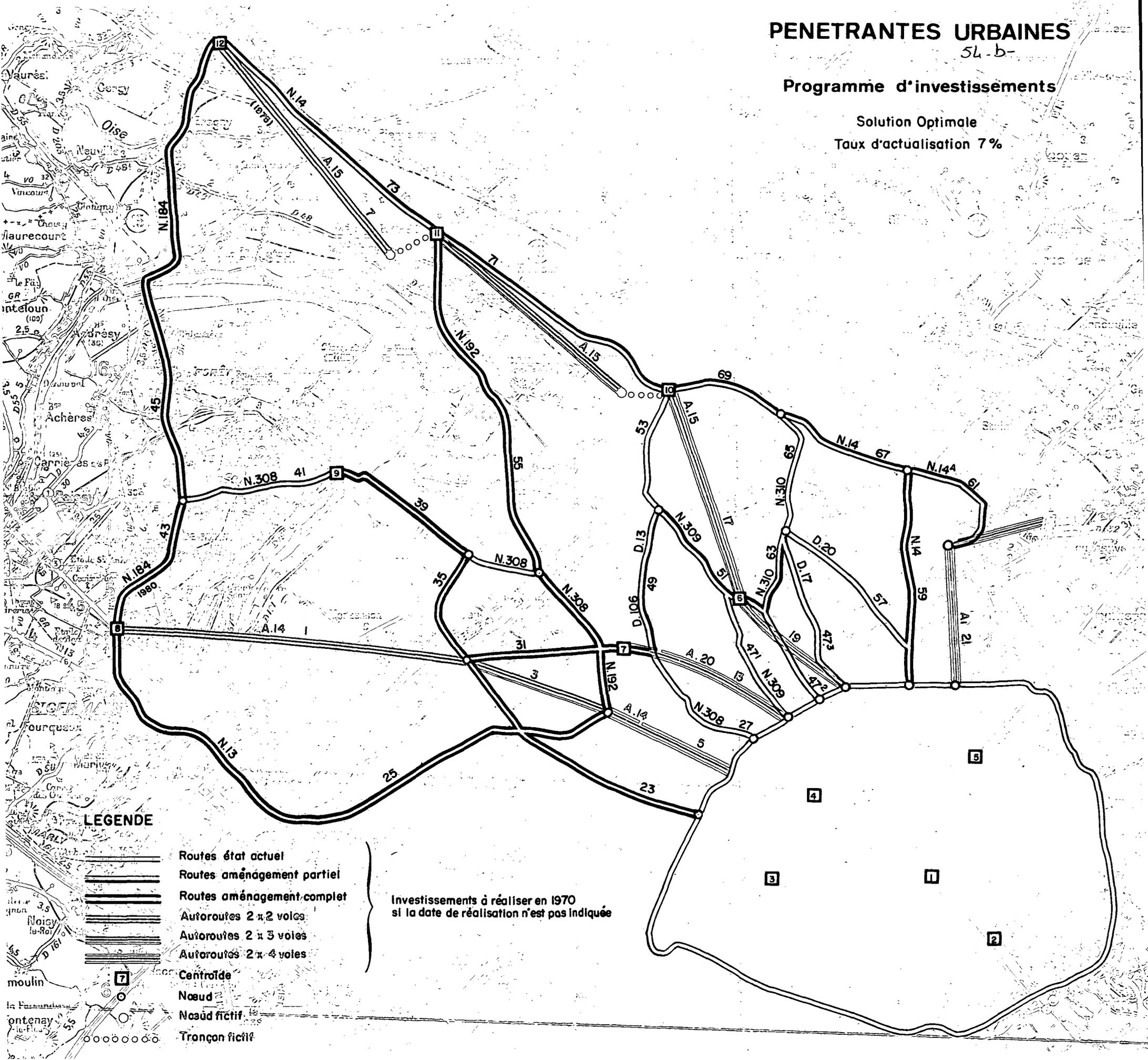
Dans ces conditions, le modèle des Pénétrantes Urbaines peut être considéré dès maintenant comme un outil satisfaisant pour la programmation des investissements routiers en zone urbaine. D'une part au niveau de la ville, il permet de faire des choix entre diverses opérations et d'établir un programme en fonction d'hypothèses sur la croissance de la cité. Au delà de ce cadre d'autre part, la comparaison au niveau du territoire entre investissements dans des villes différentes devient possible au moyen des taux de rentabilités déterminés par le modèle, compte tenu de la cohérence nécessaire entre les hypothèses d'urbanisation retenues pour chaque ville.

PENETRANTES URBAINES

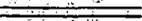
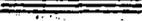
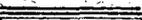
54-b-

Programme d'investissements

Solution Optimale
Taux d'actualisation 7%



LEGENDE

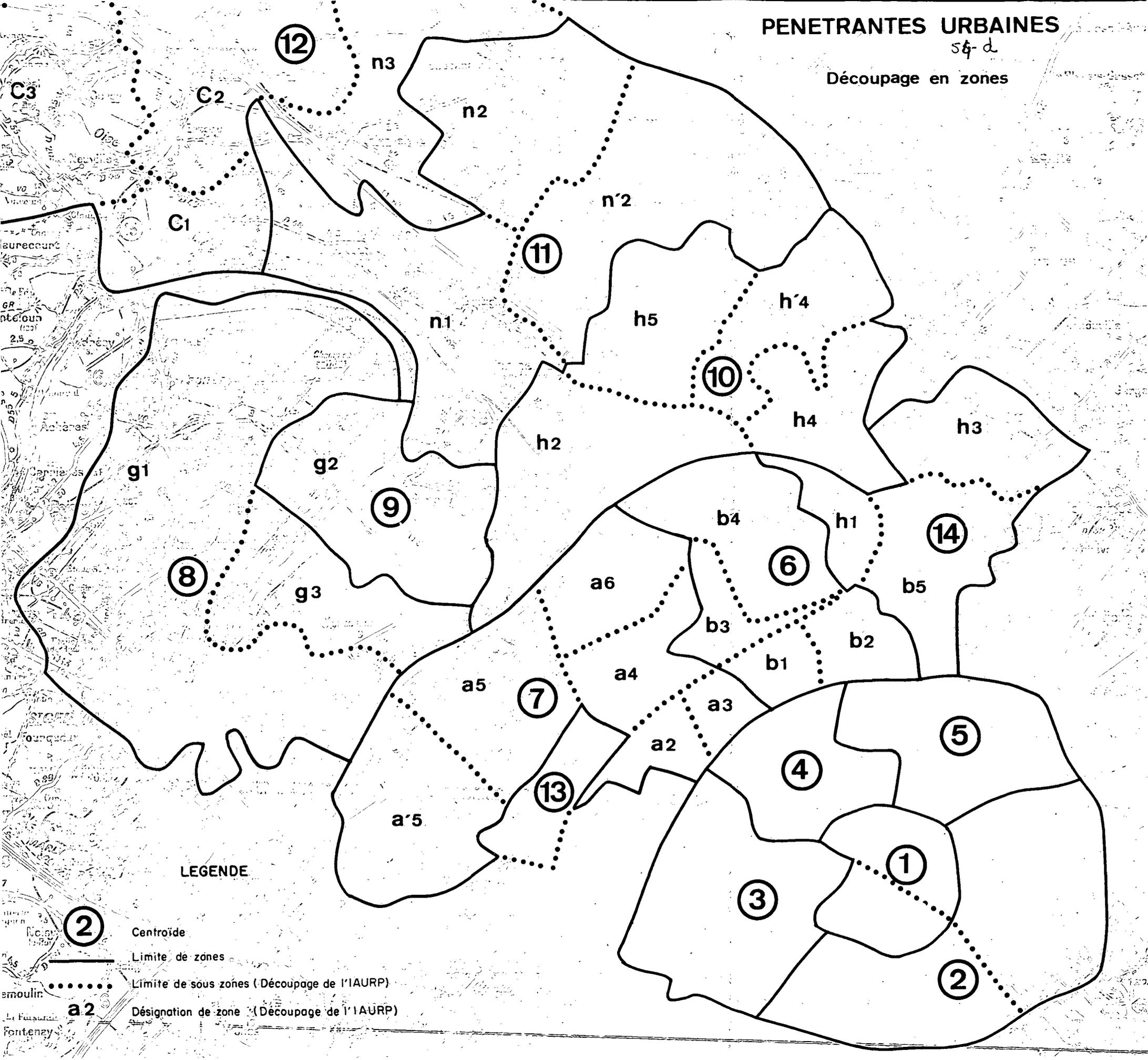
-  Routes état actuel
-  Routes aménagement partiel
-  Routes aménagement complet
-  Autoroutes 2 x 2 voies
-  Autoroutes 2 x 3 voies
-  Autoroutes 2 x 4 voies
-  Centre-ville
-  Nœud
-  Nœud fictif
-  Tronçon fictif

Investissements à réaliser en 1970
si la date de réalisation n'est pas indiquée

PENETRANTES URBAINES

54-d

Découpage en zones



LEGENDE

②

Centroïde

Limite de zones

..... Limite de sous zones (Découpage de l'IAURP)

a2 Désignation de zone (Découpage de l'IAURP)

ANNEXE IFONCTION TEMPS DE PARCOURS-DEBIT1. ETUDES ANTERIEURES

Les fonctions temps de parcours-débit ont fait l'objet de recherches diverses. Parmi les résultats les plus sûrs, on peut citer les courbes du Highway Capacity Manual (1).

Ce même manuel rappelle les résultats de régressions linéaires valables en zone urbaine (Chicago) : vitesse (mph) = $35,50 - 0,016 q$

où q est le débit par file et par heure de vert lorsque le stationnement est interdit, et vitesse (mph) = $20,45 - 0,041 q$ lorsque le stationnement est autorisé.

Le traffic Research Corporation a essayé, d'une manière analogue par analyse statistique, de représenter la fonction temps de parcours-débit en zone urbaine (Toronto) par 2 segments de droite, ne dépendant que de la fréquence des intersections.

Des essais ont été également effectués par le S.E.R.C. (2) dans Paris pour obtenir des résultats spécifiques à cette région. Une analyse de l'axe Saint Marcel - Gobelins - Gare Montparnasse a donné la régression suivante :

(1) Highway Research Board "Highway Capacity Manual, pp. 62-65

(2) S.E.R.C. "Corrélation Débit-Temps de Parcours en zone urbaine - Résultats de Paris", 1966.

$$\text{temps de parcours (minutes/km)} = - 22,43 + \frac{Q}{l} \quad (r = 0,77)$$

où Q est le débit dans un sens (véh/heure)

et l la 1/2 largeur de chaussée en mètre.

La fréquence des feux était de 3 au km (moins l'emprise du stationnement) et l'on a supposé que le stationnement occupait 3 m de chaussée.

L'analyse a montré, dans ce cas, que la corrélation était pratiquement aussi bonne lorsque la variable utilisée était le débit dans un seul sens au lieu de la somme des débits des deux sens.

Les résultats des différents bords sont finalement assez dispersés et pas très cohérents de sorte qu'une recherche plus poussée s'impose pour analyser plus finement les causes des variations, en particulier l'effet des manoeuvres de stationnement sur la capacité et la vitesse de la file la plus voisine.

2. SIMPLIFICATION DU MODELE

Nous avons été amenés à simplifier le fonctionnement d'un axe de route à trafic interrompu.

Le temps de parcours sur un itinéraire est décomposé :

- en temps dépensé entre les intersections,
- en temps dépensé aux intersections, en faisant abstraction de l'effet de congestion,

- en temps dépensé par suite de la congestion et de la formation des files d'attente.

Le modèle adopté est cependant suffisant pour mesurer l'effet approximatif de l'aménagement d'un carrefour, la suppression du stationnement, la coordination de certains carrefours, etc.

3. DELAIS ENTRE INTERSECTIONS

D'après les résultats déjà obtenus, on peut penser qu'une représentation linéaire du temps de parcours en fonction du débit est une image assez bonne de la réalité.

$$\text{On écrira : } t = t_0 + \alpha Q$$

où t est le temps de parcours correspondant au débit Q dans un sens,

t_0 le temps de parcours à débit nul,

α un coefficient constant.

Pour obtenir la valeur de t_0 on a procédé comme suit dans la région parisienne. On a parcouru en voiture les différents tronçons dans les deux sens et aux mêmes heures, en notant le temps de parcours, le temps perdu aux arrêts et le nombre de véhicules croisés, ce qui a permis de calculer les estimations des débits dans chaque sens.

On disposait donc sur un tronçon d'un temps de parcours T , d'une estimation du débit Q dans le sens du parcours et du temps total θ dépensé en arrêt devant les feux. D'après l'annexe 2 on a estimé à environ 50 % du temps d'arrêt, le temps perdu supplémentaire en décélération et accélération consécutif à un arrêt. Par suite, si l'on fixe α on peut tirer : $t_0 = T - 1,50\theta - \alpha Q$

Bien qu'une régression linéaire sur 81 tronçons nous ait donné la relation

$$T - 1,50 \theta = 67,1 + 0,04649 \frac{Q}{n} \quad (\text{temps exprimés en secondes}),$$

où n est le nombre de files de 3 m dans un sens (voir figure 1), la faible corrélation obtenue nous a incité à utiliser plutôt les résultats du Highway Capacity Manual sur la circulation ininterrompue.

On a posé $\alpha = \frac{\alpha_0}{n}$ où n est le nombre de pistes de 3 m en demi-chaussée après avoir déduit, si nécessaire 3 m pour le stationnement.

Les valeurs de α_0 choisies ont été :

$\alpha_0 = 0,023$ pour une route à deux voies,
 $0,014$ pour une route à plus de deux voies,
 $0,012$ pour une autoroute (avec des pistes de 3,50 m au lieu de 3 m).

4. DELAIS AUX INTERSECTIONS

Ces délais ont fait également l'objet de nombreuses recherches. La formule de WEBSTER est très connue ainsi que les résultats des travaux de GOODE, POLLMAR et WRIGHT (1). La forme de ces résultats obtenus par simulation ainsi que la théorie simplifiée exposée à l'annexe 2 conduisent à approximer la fonction temps moyen dépense-débit par un palier lorsque le débit varie de zéro à la moitié de la capacité et par une fonction linéaire au-delà.

(1) Harry H. GOODE, Carl H. POLLMAR, Jesse B. WRIGHT "The Use of a Digital Computer to Model a Signalized Intersection", H.R.B. Proceedings, 1956.

Les essais que nous avons effectués dans la région parisienne ne sont pas concluants. Les valeurs moyennes sont cependant significatives. Sur 231 arrêts, la durée moyenne était de 35" avec une probabilité d'arrêt de 42,5 % alors que le cycle moyen des feux était de 70" avec une proportion moyenne de vert de 60 %. Des résultats plus détaillés sont portés sur la table ci-après.

Une analyse de régression a donné les résultats suivants :

$$t = 52 + 0,017 \frac{Q}{n} + F (3,75 + 0,026 \frac{Q}{n})$$

où t est le temps de parcours en sec/km,

Q/n est le débit par piste de 3 m,

F le nombre de feux par km.

On n'en a pas tenu compte à cause de la trop faible corrélation et l'on a préféré utiliser une formule plus proche des moyennes observées :

$$t_1 = 15 + 0,030 \frac{Q}{n_f}$$

où t_1 est le temps moyen perdu à un feu, en secondes,

et $\frac{Q}{n_f}$ le débit par piste de 3 m sur l'approche du carrefour.

5. TERME DE CONGESTION

La capacité maximale C_p du tronçon peut être dépassée lors des pointes du matin et du soir.

PENETRANTES URBAINESDISTRICT DE LA REGION DE PARIS : ZONE NORD OUESTENQUETE DU TRAFIC

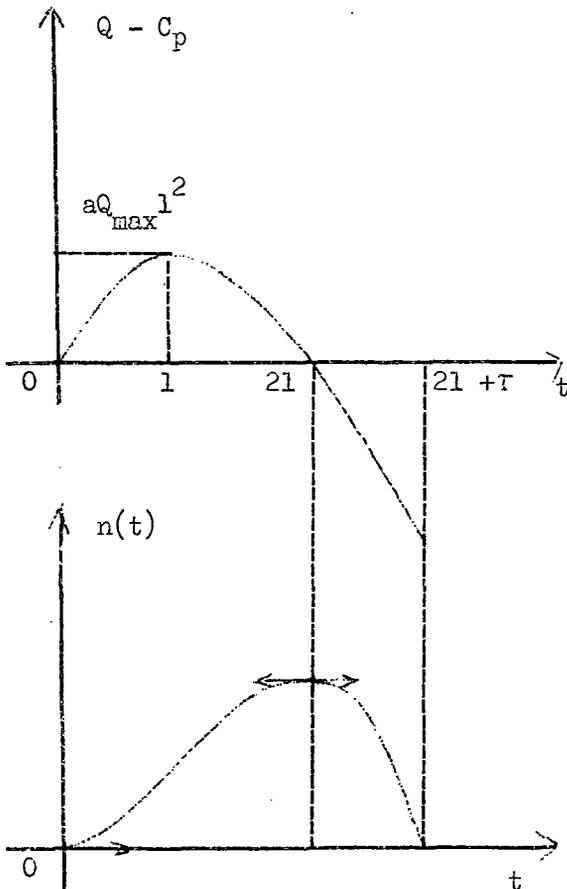
TRAFIC Q par heure et par voie de 3 m	Nombre total de feux	Nombre de feux avec arrêt	Pourcentage d'arrêt aux feux	Temps d'arrêt aux feux (seconde)	Durée moyenne d'arrêt aux feux (seconde)
$Q \leq 300$	96	41	42 %	1 444 "	35 "
$300 \leq Q \leq 400$	83	33	40 %	1 119 "	34 "
$400 \leq Q \leq 500$	151	56	38 %	1 976 "	35 "
$500 \leq Q \leq 700$	100	47	47 %	1 570 "	34 "
$Q \geq 700$	114	54	47,5 %	2 013 "	37 "

Figure 2 : Délais aux intersections

En première approximation la forme d'une pointe en fonction du temps peut être représentée par une courbe du second degré :

$Q = Q_{\max} (1 - at^2)$, où Q_{\max} est le maximum de la pointe et a , un coefficient de dimension temps⁻².

Par exemple, d'après l'enquête de Paris-Nord (1), un coefficient $a = 0,12 \text{ h}^{-2}$ conviendrait assez bien pour décrire la pointe du soir dans le sens Paris-Province. Il est à noter cependant que cette représentation ne prend pas en considération la dissymétrie observée sur le terrain.



En faisant le changement d'axes ci-contre, il vient :

$$Q - C_p = a Q_{\max} t (21 - t)$$

Le nombre de véhicules accumulés au temps

t est :

$$n(t) = \int_0^t (Q - C_p) dt = a Q_{\max} (1t^2 - \frac{t^3}{3})$$

Se reporter à la figure

Le maximum est :

$$n(21) = \frac{4}{3} a Q_{\max} 1^3$$

On a par ailleurs :

$$\frac{dQ}{dt} = a Q_{\max} (21 - 2t), \text{ de sorte qu'en}$$

approximant pour $t = 21$ la parabole par sa

tangente au point $t = 21$, le nombre de

véhicules accumulés lorsque $t = 21 + \tau$

s'exprime :

$$n_1(\tau) = n(21) - \int_0^\tau 2a Q_{\max} 1 d\tau = \frac{4}{3} a Q_{\max} 1^3 - a Q_{\max} 1 \tau^2$$

(1) Ponts et Chaussées de la Seine "Etude de Circulation Paris-Nord" SETEC, 1959 p.14

En fin d'accumulation, on a :

$$\frac{4}{3} a Q \max. l^3 - a Q \max. l \tau^2 = 0 \quad \text{d'où } \tau = \sqrt{\frac{2}{3}} l$$

La perte de temps moyenne durant la période où existe une file d'attente $2.l + \tau$ est :

$$\frac{1}{2l + \tau} \left[\int_0^{2l} n(t) dt + \int_0^{\tau} n_1(t) dt \right] = \frac{0,74}{(aQ_{\max})^{3/2}} (Q \max. - C)^{3/2}$$

Supposons maintenant que le volume sur l'itinéraire soit mesuré par un volume moyen \bar{Q} appliqué à une période contenant toute la durée de file d'attente.

$$\text{Nous aurons : } \bar{Q} = \frac{Q \max.}{\lambda} \quad \text{avec } \lambda > 1.$$

La perte de temps totale sera :

$$T_3 = \frac{4}{3} a Q \max. l^4 \left(1 + \frac{4}{3\sqrt{3}}\right) = \frac{3,70}{a Q \max.} (Q \max. - C_p)^2 = \frac{3,70}{a \lambda \bar{Q}} (\bar{Q} - C')^2$$

$$\text{où } \bar{Q} = \frac{Q_0}{\lambda} \quad \text{et } C' = \frac{C_p}{\lambda}$$

et la perte de temps moyenne par usager sur la période $2L$ sera :

$$\bar{t}_3 = \frac{1}{2L \bar{Q}^2} \times \frac{3,70}{a} \times (\bar{Q} - C')^2 = K \left(1 - \frac{C'}{\bar{Q}}\right)^2 = K \left(1 - \frac{C_p}{Q \max.}\right)^2$$

Lorsque \bar{Q} reste voisin de C' on peut écrire :

$$\bar{t}_3 \approx \frac{1}{2L C'^2} \times \frac{3,70}{a \lambda} \times (\bar{Q} - C')^2$$

C'est-à-dire une fonction du second degré de \bar{Q}

Lorsque la forme de la pointe est différente d'une parabole, on pourrait procéder pratiquement comme suit :

calculer la perte \bar{t}_3 lorsque $\frac{C_p}{Q_{\max.}} = 0,95$ et déduire $K = K_1$

calculer la perte \bar{t}_3 lorsque $\frac{C_p}{Q_{\max.}} = 0,90$ et déduire $K = K_2$

Prendre en valeur moyenne $K = (K_1 + K_2)/2$ et utiliser la formule :

$$\bar{t}_3 = K \left(1 - \frac{C_p}{Q_{\max.}} \right)^2$$

Les résultats de Paris-Nord nous ont donné :

$$K = 30\ 000 \text{ pour la pointe du matin,}$$

et

$$K = 13\ 000 \text{ pour la pointe du soir.}$$

Une valeur moyenne $K = 15\ 000$ a été utilisée pour les deux pointes dans cette étude.

ANNEXE IITEMPS D'ATTENTE AUX FEUX1. HYPOTHESES (voir figure 1)

1. Le feu n'est pas saturé.

2. Les véhicules sont divisés en trois catégories :

a) ceux s'arrêtant au feu,

b) ceux ralentissant au passage du feu sans s'arrêter,

c) ceux ne subissant pas de ralentissement au passage du feu.

3. Le cycle K se compose d'une période jaune de longueur J, d'une période rouge de longueur R et d'une période verte de longueur V.

4. La période jaune J est supposée permettre au premier véhicule susceptible de s'arrêter au feu rouge de choisir entre l'arrêt et le passage à vitesse constante. La trajectoire de décélération dans le diagramme Espace Temps est supposée parabolique avec un temps de réaction de 1 seconde.

5. Le démarrage à partir d'une position arrêtée entraîne une perte moyenne de temps par rapport au trajet à vitesse constante V_0 notée a.

6. Le dernier véhicule à s'arrêter subit une perte de temps moyenne, notée b , due à la décélération de la vitesse V_0 à la vitesse 0 puis à l'accélération de la vitesse 0 à la vitesse V_0 .

Le délai à l'arrêt est supposé négligeable pour ce véhicule.

7. Le débit en amont est supposé homogène, soit Q .

Les intervalles de temps correspondant au passage des véhicules de catégories 1, 2 et 3 durant un cycle sont respectivement $t_1 - t_2 - t_3$ alors qu'en aval ils sont $\tau_1 - \tau_2$ et τ_3 .

8. Le débit de sortie en aval des véhicules de catégories 1 et 2 est supposé le même et égal à q .

2. EQUATIONS DU PROBLEME

La proportion de véhicules arrêtés est :

$$\alpha = \frac{Q t}{Q (t_1 + t_2 + t_3)} = \frac{t}{t_1 + t_2 + t_3} \quad (\text{Equation 1})$$

La proportion de véhicules ralentis ou arrêtés est :

$$\beta = \frac{Q (t_1 + t_2)}{Q (t_1 + t_2 + t_3)} = \frac{t_1 + t_2}{t_1 + t_2 + t_3} \quad (\text{Equation 2})$$

On a par ailleurs :

l'égalité des volumes de véhicules arrêtés, à l'amont et à l'aval :

$$Q t_1 = q \left[t_1 + b - \frac{J-1}{2} - R - a \right] = q \tau_1 \quad (\text{Equation 3})$$

et l'égalité des volumes de véhicules arrêtés ou ralentis, à l'amont et à l'aval :

$$Q (t_1 + t_2) = q (\tau_1 + \tau_2) = q \left(V - a - t_3 + \frac{J+1}{2} \right) \quad (\text{Equation 4})$$

On tire des Equations 3 et 4 :

$$\frac{t_1}{t_1 + t_2} = \frac{\alpha}{\beta} = \frac{t_1 + b - \frac{J-1}{2} - R - a}{V - a - t_3 + \frac{J+1}{2}}$$

et en posant $t_1 + t_2 + t_3 = K = \text{longueur du cycle}$

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{K + b - \frac{J-1}{2} - R - a}{V - a - K + \frac{J+1}{2}}$$

$$\text{d'où } \alpha (V - a - K + \frac{J+1}{2}) = \beta (b - \frac{J-1}{2} - R - a)$$

et comme $K - V = R + J$

$$\alpha (a + R + J - \frac{J+1}{2}) = \beta (a + R + \frac{J-1}{2} - b)$$

$$\text{d'où : } \frac{\alpha}{\beta} = \frac{a + R + \frac{J-1}{2}}{a + R + \frac{J-1}{2} - b}$$

$$\text{et } \boxed{\beta / \alpha \approx 1 + b / \left(a + R + \frac{J-1}{2} \right)}$$

alors que :

$$b = \left(1 - \frac{\alpha}{\beta} \right) \left(a + R + \frac{J-1}{2} \right) \quad (1)$$

formule qui permet d'évaluer b à partir de α, β, a, R et J .

Le temps moyen perdu \bar{t} par véhicule peut être calculé en supposant une variation linéaire entre les temps perdus par le premier et le dernier véhicule dans chaque catégorie, à savoir :

$$\bar{t} = \beta \frac{a + R + \frac{J-1}{2}}{2} = \frac{\alpha}{2} \frac{\left(a + R + \frac{J-1}{2} \right)^2}{a + R + \frac{J-1}{2} - b}$$

$$\bar{t} = \frac{\alpha}{2} \left(a + R + \frac{J-1}{2} \right) \left(1 + \frac{b}{a + R + \frac{J-1}{2}} \right)$$

Comme $\beta = \frac{a}{q - Q} \times \frac{1}{K} \left(a + R + \frac{J-1}{2} \right)$, il vient :

$$\bar{t} = \frac{1}{2} \frac{a}{q - Q} \times \frac{1}{K} \left(a + R + \frac{J-1}{2} \right)^2$$

Le temps d'attente moyen \bar{t}_a des véhicules arrêtés est :

$\bar{t}_a \neq \frac{R}{2}$ de sorte que \bar{t} peut être tiré de \bar{t}_a par la relation :

$$\bar{t} = \bar{t}_a \times \frac{a + R + \frac{J-1}{2}}{R} \times \frac{a + R + \frac{J-1}{2}}{a + R + \frac{J-1}{2} - b}$$

3. CONDITION DE POSSIBILITE

Le problème tel qu'il est posé n'a de sens que si $t_3 \geq 0$, or d'après l'équation IV :

$$Q(t_1 + t_2) + Qt_3 = QK = q(V - a - t_3 + \frac{J+1}{2}) + Qt_3$$

$$\text{ou } QK = q(V - a + \frac{J+1}{2}) - (q - Q)t_3$$

$$\text{d'où } t_3 = \frac{q(V - a + \frac{J+1}{2}) - QK}{q - Q}$$

Comme $q > Q$, la condition s'écrit :

$$\frac{Q}{q} < \frac{1}{K} (V - a + \frac{J+1}{2})$$

4. EXEMPLE NUMERIQUE

J = 3 secondes,

R = variable,

a = 4 secondes,

b = 8 secondes.

1. R = 15 secondes

$$\bar{t} = \alpha \bar{t}_a \frac{5+R}{R} \frac{5+R}{5+R-b} = 2,2 \alpha \bar{t}_a \quad \beta | \alpha = 1,66$$

2. R = 20 secondes

$$\bar{t} = 1,83 \alpha \bar{t}_a \quad \beta | \alpha = 1,46$$

3. R = 30 secondes

$$\bar{t} = 1,52 \alpha \bar{t}_a \quad \beta | \alpha = 1,25$$

La condition (6) s'écrit :

$$\frac{Q}{q} < \frac{1}{K} \quad (V - 1,5)$$

$$\text{En prenant } V/K = 0,60 \quad K = 80 \text{ secondes, } q = \frac{3\,600}{2,1}$$

La condition s'exprime :

$$Q < \frac{3\,600}{2,1} \left(0,60 - \frac{1,5}{80}\right) = 1\,000 \text{ uvp}$$

où 1 660 uvp (en ligne droite) par heure de feu vert.

5. CAS D'UNE SUCCESSION DE PLUSIEURS FEUX

D'après ce qui a été montré plus haut, le débit reste habituellement inférieur à $\frac{q}{2}$ dans les cas courants ($\frac{R}{K} = 0,40$ $\beta \leq 1$).

A un feu, nous disposerons de la formule approchée :

$$\bar{t} = \frac{1}{2} \frac{q}{q - Q} \times K \times \left(a + R + \frac{J-1}{2} \right)^2$$

Si b , R et K sont indépendants de Q , il vient :

$$\bar{t} = \text{Const.} \times \frac{q}{q - Q} = \text{Const.} \left(1 + \frac{Q}{q} + \frac{Q^2}{q^2} + \dots \right)$$

$$\bar{t}_a = \text{Const.} \times \left(\frac{q}{q - Q^2} \right) = \text{Const.} \left(\frac{1}{q} + 2 \frac{Q}{q^2} + \dots \right)$$

Si on s'intéresse surtout aux accroissement de délai lorsque le trafic est voisin de la saturation, c'est-à-dire pour $Q \neq \frac{q}{2}$ on obtient une représentation approchée par la formule :

$$\bar{t} = \text{Const.} \left(1 + \frac{Q}{q} + 1,5 \frac{Q^2}{q^2} \right)$$

qui donne une valeur exacte pour $Q = \frac{q}{2}$ et $Q = 0$

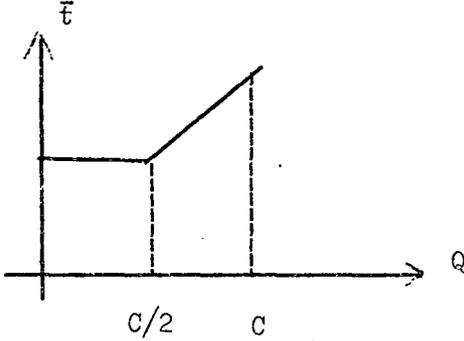
et une valeur approchée de \bar{t} à 12 % au maximum.

On peut alors sommer les délais à diverses intersections sous la forme :

$$\Sigma \bar{t} = \Sigma \text{Const.} + Q \Sigma \left(\frac{\text{Const.}}{q} \right) + 1,5 Q^2 \Sigma \left(\frac{\text{Const.}}{q^2} \right)$$

c'est-à-dire obtenir une fonction du second degré pour le délai total.

Dans le modèle utilisé par le programme électronique on s'est ramené à la courbe suivante :



\bar{t} = constante lorsque $Q \leq \text{capacité}/2$

\bar{t} = fonction linéaire de Q lorsque
 $Q \geq \text{capacité}/2$.

ANNEXE IIICOORDINATION DES FEUX SUR UN AXE1. CONDITION DE COORDINATION

Il existe deux cas de synchronisation sur un axe seul.

1. Le trafic est prépondérant dans un sens et l'on favorise ce sens en créant une "onde verte" portée par des feux coordonnés. La coordination exige que la longueur du cycle soit la même pour tous les feux et les déphasages sont fixés de façon à ce que le début du vert corresponde au passage du véhicule de tête d'un peloton roulant à une vitesse moyenne constante ou peu variable, dans le sens favorisé.

A noter que l'avantage évident en faveur du sens prépondérant peut entraîner des délais supplémentaires aux véhicules circulant dans l'autre sens.

2. Aucun sens n'est prépondérant, mais on peut espérer améliorer la vitesse moyenne en calculant les déphasages des feux de façon à faire passer des bandes vertes de largeur maximale (et égale dans les deux sens) correspondant à une même vitesse dans les deux sens. Pour que cette coordination soit possible (largeur de bande non nulle), il est nécessaire que la localisation relative des feux soit favorable.

A noter encore ici que la coordination entraîne l'égalité de longueur des cycles pour tous les feux du système de sorte que chaque feu n'est pas à son cycle optimal. Ainsi, l'avantage procuré sur l'axe peut avoir pour contrepartie des allongements de délais sur les axes sécants.

En conclusion, la décision de coordonner un axe est une affaire de jugement assez délicate où chaque cas doit être traité avec soin.

2. NOTIONS DE CAPACITE EFFICACE ET THEORIQUE

Lorsqu'une bande verte peut être créée, on admettra qu'un peloton de n véhicules peut se déplacer à vitesse constante ou peu variable suivant cette bande.

En fait, le temps de passage du peloton présentera une certaine dispersion de sorte que l'on supposera que l'on est assuré que le peloton passe bien dans la bande lorsque le temps de passage est par exemple de α % la largeur b de la bande.

Si l'on admet maintenant entre deux véhicules un temps de passage moyen de 2 " (1), la capacité efficace de la bande verte sera par voie :

$$C_e = \frac{\alpha}{100} \times \frac{b}{K} \times \frac{3\,600}{2} \text{ vph}$$

où b est la largeur de la bande en seconde, K est la longueur du cycle en seconde.

Exemple : b = 30" K = 60 " $\alpha = 85$ %

$$C_e = \frac{85}{100} \times \frac{30}{60} \times \frac{3\,600}{2} = 765 \text{ vph}$$

Le nombre limite de véhicules dans le peloton sera alors : $n = 0,85 \times \frac{30}{2} = 13$

(1) Matson, Smith and Hurd, "Traffic Engineering", 1965, page 131

Si le nombre de véhicules est supérieur à 13, les derniers véhicules sont arrêtés par le feu rouge ainsi que le peloton qui suit, rendant la coordination inopérante en ce point.

La capacité théorique de l'itinéraire correspond par contre à la capacité minimale pour des véhicules partant d'une position arrêtée. Si l'on admet un intervalle moyen de 2,5" entre passage de véhicules pour une queue d'une douzaine de véhicules environ (1), cette capacité serait avec les chiffres précédents :

$$C_t = \frac{b}{K} \times \frac{3\,600}{2,5} = \frac{30}{60} \times \frac{3\,600}{2,5} = 720 \text{ vph.}$$

La capacité théorique est ici finalement peu différente de la capacité efficace et si le coefficient = 85 % devait être retenu, il n'y aurait pas lieu de faire de différence entre ces deux valeurs.

3. CALCULS PRATIQUES

L'expérience montre que l'effet de coordination se perd lorsque la distance entre deux feux devient trop grande. Une distance de 500 m semble la limite raisonnable d'efficacité lorsque les perturbations latérales sont limitées. On a admis, dans les calculs de cette étude, que tout couple d'intersections à feux à moins de 500 m pouvait être coordonné.

Il est très difficile d'apprécier l'effet de la coordination sur les temps de parcours lorsque les distances entre intersections sont hétérogènes. On a considéré ici que le gain était au moins égal au cas où l'on passerait une bande verte dans un sens.

(1) Matson, Smith and Hurd, "Traffic Engineering", 1965, page 330

Autrement dit, sans vouloir entrer dans le détail, on s'est basé sur l'hypothèse que l'effet se partageait entre les deux sens avec moitié moins de feux coordonnés par sens.

Ainsi, une série de n feux coordonnés correspondrait pour un sens à $1 + \frac{n-1}{2}$ feux non coordonnés, c'est-à-dire à la suppression de $\frac{n-1}{2}$ feux.

ANNEXE IVESTIMATION DES COUTS COLLECTIFS1. SIMPLIFICATIONS

Le programme sur ordinateur utilise pour l'affectation du trafic des fonctions donnant une estimation de temps de parcours en fonction des débits.

Dans le calcul des coûts collectifs, on tiendra compte d'une part de la valeur du temps perdu par les usagers et accessoirement des coûts proportionnels au temps et d'autre part des autres coûts représentés par une nouvelle fonction dépendant du débit.

Si $T(Q)$ est la fonction temps de parcours en fonction du débit sur un tronçon, V la valeur du temps, $C(Q)$ la fonction représentant les autres coûts en fonction du débit, le coût collectif sur un tronçon peut se représenter par :

$$C(Q) + T(Q)(V + \epsilon)$$

où ϵ représente certains coûts accessoires proportionnels au temps de parcours.

La valeur du temps est elle-même une fonction dépendant :

1. des heures caractéristiques, en rapport avec une répartition type entre motifs du déplacement à chacune des heures,

2. de l'importance du parcours mesuré ici par le temps de parcours total t_{oD} entre une origine et une destination ,

on aura donc :

$$V_i = V_i (t_{oD})$$

où i est un indice d'heure caractéristique.

La fonction $T (Q)$ a été étudiée à l'annexe 1.

2. FONCTION C (Q)

La fonction $C (Q)$ sera estimée à partir des distances parcourues et de la gêne apportée à la circulation par les intersections à feux. On admettra d'autre part, suivant la classification de la route, des vitesses moyennes en zone urbaine, suburbaine ou rurale.

Dans les calculs qui suivent, on prendra :

1. sur les routes nationales ou départementales autres que voies express en zone urbaine une vitesse moyenne entre feux (compte non tenu des accélérations et décélérations à ces feux) :

- de 45 km/h pour les V.L. (véhicules légers)
- et 35 km/h pour les P.L. (poids lourds)

2. sur les routes nationales ou départementales, en zone rurale ou sur les voies express en zone urbaine, une vitesse moyenne :

- de 65 km/h pour les V.L.
- et 45 km/h pour les P.L.

3. sur les autoroutes :

- de 90 km/h pour les V.L.
- et 60 km/h pour les P.L.

Les postes considérés dans une première approche sont :

- a) la consommation de carburant,
- b) la consommation d'huile,
- c) l'usure des pneus,
- d) l'entretien et les réparations courantes,
- e) l'amortissement du véhicule,
- f) les déséconomies dues aux accidents,
- g) le confort des usagers,
- h) les nuisances pour les riverains (bruit, pollution atmosphérique, allongement du parcours, tension nerveuse).

On distinguera les coûts entre intersections et les coûts attachés aux intersections.

A. COUT ENTRE INTERSECTIONS

a) b) Consommation carburant + huile

V.L. On ne tient compte que de la consommation d'essence conformément à l'Instruction Provisoire sur les Calculs de Rentabilité appliquée aux Investissements Routiers,

soit à :

45 km/h	7,3 l/100 km	0,0255 F par km
65 km/h	7 l/100 km	0,0245 F par km
90 km/h	9 l/100 km	0,0315 F par km

P.L. On ajoute à la consommation d'essence, les coûts de consommation d'huile, soit d'après l'Instruction Provisoire, un coût collectif :

$$G \times 0,31 \left(1 + \frac{1}{23} \times \frac{2}{0,31} \right) = G \times 0,31 \times 1,28$$

où G est la consommation de gas-oil.

à :

35 km/h	G = 20 l/100 km d'où un coût de 0,079 F par km
45 km/h	G = 17,9 l/100 km d'où un coût de 0,071 F par km
60 km/h	G = 20,7 l/100 km d'où un coût de 0,082 F par km

Les majorations de consommation en zone urbaine sont prises en charge dans les coûts aux intersections.

c) Usure des pneus

V.L. on ne tient pas compte de l'usure des pneus.

P.L. on prend 0,069 F par km.

d) Entretien et Réparations courantes

V.L. on prend 0,04 F/km

P.L. on prend 0,12 F/km

e) Amortissement du véhicule

V.L. Valeur d'achat 8.000 F, kilométrage 100.000 km
 $\frac{1}{2}$ de la dépréciation venant du kilométrage
 soit 0,04 F par km

P.L. Valeur d'achat 40.000 F, kilométrage 200.000 km
 amortissement complet 0,20 F par km.

f) Déséconomies dues aux accidents

Routes nationales et départementales :

. zone rurale 0,0282 F par véhicule \times km,

. zone urbaine 0,0712 F par véhicule \times km.

Autoroute 0,0135 F par véhicule \times km.

Route express : valeur intermédiaire entre R.N. et autoroute. On prend :

. zone rurale 0,02 F par véhicule \times km,

. zone urbaine 0,04 F par véhicule \times km.

g) Confort des usagers

On applique un bonus de 0,03 F par km sur autoroute.

h) Nuisances pour les riverains

Si on estime à 80 F par an le sacrifice par véhicule que la collectivité accepterait pour diminuer le bruit des véhicules et l'émission de gaz nocifs dans des proportions compatibles avec les possibilités techniques actuelles et compte tenu d'une utilisation urbaine des véhicules à 30 % à raison de 20.000 km par an, le dispositif revient à :

$$\frac{80 \text{ F}}{6\ 000 \text{ km}} = 0,013 \text{ F par km en zone urbaine.}$$

On prend 0,026 F par km pour les camions.

Ce coût est à diminuer de moitié sur les autoroutes urbaines encaissées, bordées de constructions.

La gêne apportée aux riverains par la suppression des interœctions ou par les barrières matérielles que constituent les autoroutes n'a pas été estimée ici, mais elle peut être non négligeable dans le cas où existerait un trafic piétonnier sécant important.

B. COUTS AUX INTERSECTIONS

a) Carburant

D'après le "Road User Benefit Analysis for Highway Improvements", le coût supplémentaire de consommation dû à un arrêt peut être estimé lorsque la vitesse d'approche est de 45 km/h à 0,19 ¢.

Pour une voiture légère française, on pourrait estimer le coût collectif correspondant à :

$$\frac{0,19}{100} \times 5 \text{ F} \frac{7 \text{ l}}{11,5 \text{ l}} \times \frac{4,53 \times 0,35}{0,32 \times 5} = 0,006 \text{ F par arrêt,}$$

et pour un camion à 3 fois plus soit 0,018 F par arrêt.

Ces coût seraient à majorer de 70 % environ lorsque la vitesse d'approche atteint 60 km/h et à diminuer de 50 % lorsque la vitesse n'est plus que 35 km/h.

c) Pneus et freins

Les dépenses supplémentaires en pneus et freins peuvent être estimées en valeur collective à 80 % de la valeur américaine, soit :

$$\frac{0,16}{100} \times 0,80 \times 5 = 0,0064 \text{ F par arrêt pour les V.L.}$$

et 3 fois plus pour les P.L.

b) d) Huile et réparation, entretien

Ces autres coûts sont estimés à 50 % environ de la somme des coûts a) et c),
soit finalement :

pour les V.L.	0,0186 F par arrêt,
pour les P.L.	0,056 F par arrêt.

3. VALEURS FINALES ADOPTEES DANS LE MODELE

Il a été tenu compte d'un pourcentage moyen de camions dans la journée de 15 %
(cf..enquête Paris-Nord précitée).

On distingue comme précédemment :

1. Les routes nationales et départementales :a) Sous-tronçon urbain et suburbain

Pour V.L. (45 km/h)	Essence	0,0255
	Entretien	0,04
	Amortissement	0,04
	Accidents	0,0712
	Nuisances	0,013
		<hr/>
		0,1897 ou 0,19 F par km

P.L. (35 km/h)	Gas oil	0,079
	Usure pneus	0,069
	Entretien	0,12
	Amortissement	0,20
	Accidents	0,0712
	Nuisances	0,026
		<hr/>
		0,5752 ou 0,58 F par km

En supposant un mélange de 85 % de V.L. et de 15 % de P.L., le coût moyen est de :

$$0,164 + 0,087 = 0,251 \text{ F par km}$$

ou 0,25 F par km

Par arrêt devant un feu, on compte :

0,0186 F pour les V.L.

0,037 F pour le véhicule moyen.

La probabilité d'arrêt au feu croît avec le débit. On admet qu'il passe de 35 % pour des débits faibles jusqu'à 300 véhicules/heure par voie, à 60 % pour des débits élevés de 700 véhicules/heure. Le pourcentage croît donc de 25 % lorsque le débit par voie augmente de 400 véhicules/heure soit une espérance de coût par feu de :

$$\dots \quad 0,021 \times \left(0,16 + 0,25 \frac{Q}{400 n} \right)$$

où Q est le débit dans un sens

et n le nombre de voies d'approche dans ce sens.

Sur un tronçon, on prend :

$$0,0033 \times F + 0,00013 \times \left(\sum \frac{1}{n} \right) \times Q$$

où F est le nombre de feux

Lorsque des feux sont coordonnés, on répartit l'effet sur les 2 sens en prenant un coût moitié des précédents par feu coordonné, excepté pour le premier feu de la série qui n'est pas supposé bénéficier de la coordination.

b) Sous-tronçon rural

Pour V.L. (65 km/h)	Essence	0,0245
	Entretien	0,04
	Amortissement	0,04
	Accidents	0,0282
	Nuisances	0
		<hr/>
		0,1327 ou 0,13 F par km

Pour P.L. (45 km/h)	Gas oil	0,071
	Usure pneus	0,069
	Entretien	0,12
	Amortissement	0,20
	Accidents	0,0712
	Nuisances	0
		<hr/>
		0,5312

soit pour le véhicule moyen, un coût de :

$$0,11 + 0,08 = 0,19 \text{ F par km}$$

La formule pour les arrêts aux feux devient :

$$0,036 \times \left(0,16 + 0,25 \frac{Q}{400 n} \right) = 0,0058 + 0,000022 \frac{Q}{n}$$

2. Les routes express

Les différences essentielles avec le cas précédent consistent en des vitesses plus élevées, une sécurité accrue et une moindre fréquence de feux.

D'un autre côté, le fait que l'accès soit partiellement limité entraîne des gênes pour les riverains que nous ne chiffrons pas ici.

On prend une vitesse de 65 km/h pour les V.L. et 45 km/h pour les P.L.

a) Sous-tronçon urbain ou suburbain

Pour V.L. (65 km/h)	Essence	0,0245
	Entretien	0,04
	Amortissement	0,04
	Accidents	0,04
	Nuisances	0,013
		0,1575 ou 0,16 F/km

Pour P.L. (45km/h)	Gas oil	0,071
	Usure pneus	0,069
	Entretien	0,12
	Amortissement	0,20
	Accidents	0,04
	Nuisances	0,026
		0,526 ou 0,53 F/km

soit pour le véhicule moyen :

$$0,136 + 0,079 = 0,215 \text{ F ou } 0,21 \text{ F par km}$$

Les arrêts aux feux sont pris en compte par la formule :

$$0,0058 + 0,000022 \times \frac{Q}{n}$$

b) Sous-tronçon rural

Pour V.L. (90 km/h)	Essence	0,0315
	Entretien	0,04
	Amortissement	0,04
	Accidents	0,02
	Nuisances	0
		<hr/>

Pour P.L. (60 km/h)	Gas oil	0,082
	Entretien	0,12
	Usure pneus	0,069
	Amortissement	0,20
	Accidents	0,02
	Nuisances	0
	<hr/>	0,491 ou 0,49 F/km

soit pour le véhicule moyen

$$0,11 + 0,074 = 0,18 \text{ F/km}$$

Les arrêts aux feux sont pris en compte par la formule :

$$0,0087 + 0,000033 \times \frac{Q}{n}$$

3. Les autoroutes

a) Tronçon urbain

Pour les V.L. (90 km/h)	Essence	$0,0315 - 10 \% = 0,0284$
	Entretien	0,04
	Amortissement	0,04
	Accidents	0,0135
	Nuisances	0,0065
		<hr/>
		0,1284 ou 0,13 F/km

Pour les P.L. (60 km/h)	Gas oil	$0,082 - 10 \% = 0,0778$
	Usure pneus	$0,069 - 10 \% = 0,0621$
	Entretien	0,12
	Amortissement	0,20
	Accidents	0,0135
	Nuisances	0,013
		<hr/>
		0,4864 ou 0,49 F/km

soit pour le véhicule moyen :

$$0,11 + 0,073 = 0,183 \text{ F/km}$$

On déduit de plus le bonus dû au confort de l'autoroute soit :

$$0,03 \times 0,85 = 0,025 \text{ F/km}$$

d'où finalement un coût d'environ 0,16 F par kilomètre.

b) Tronçon rural

La principale différence avec l'implantation en zone urbaine réside dans la suppression des nuisances, d'où un coût kilométrique estimé à 0,15 F par kilomètre.

4. RECAPITULATION DES VALEURS ADOPTÉES EN FRANCS

	Urbain, suburbain		Rural	
	Par km	Par feu	Par km	Par feu
R.N. et R.D. ordinaire	0,25 F	$33 \times 10^{-4} + 13 \times 10^{-6} \times \frac{Q}{n}$	0,19 F	$58 \times 10^{-4} + 22 \times 10^{-6} \times \frac{Q}{n}$
voie express	0,21 F	$58 \times 10^{-4} + 22 \times 10^{-6} \times \frac{Q}{n}$	0,18 F	$87 \times 10^{-4} + 33 \times 10^{-6} \times \frac{Q}{n}$
autoroute	0,16 F	néant	0,15 F	néant

Une "autoroute" dont les échangeurs ne sont pas construits dans une phase provisoire sera considérée comme une route express.

ANNEXE N° V

Investissements successifs à réaliser
sur un tronçon routier

1. Prise en compte des fluctuations journalières du trafic

Les avantages apportés par des améliorations sur un tronçon routier ne peuvent être analysés sans une connaissance assez approfondie des fluctuations journalières du trafic.

D'après l'enquête de Paris Nord, un modèle simple pourrait consister en :

2 périodes de pointe de 2 heures chacune à débit maximum Q_{\max} ,

10 heures à débit réduit au 4/10 du débit maximum.

Les relations temps de parcours - débit étant supposées linéaires (cf. Annexe I), la dépense totale journalière en temps de parcours peut s'évaluer à partir du modèle de fluctuations journalières :

$t = a + bQ$ où t est le temps de parcours individuel
et Q le débit

$$\sum t = \sum (a + bQ) Q = a \sum Q + b \sum Q^2 = 8 a Q_{\max} + 5,6 b Q_{\max}^2$$

On estime dans ce qui suit à 8 F. (1) l'heure de véhicule.

2. Installations de feux et coordination

A - Installation des feux

Lorsqu'un courant est prioritaire, l'installation de feux à un carrefour se justifie par le fait que le courant sécant n'arrive plus à passer ou avec des délais d'attente innacceptables.

Cependant, il ne faut pas perdre de vue que l'installation de feux introduit des pertes de temps systématiques aussi bien pour le courant prioritaire que pour le courant sécant, du moins si les feux sur le courant prioritaire ne sont pas coordonnés et si l'on n'utilise pas de système adaptatif. Il faut donc respecter des seuils raisonnables de trafic avant d'installer des feux ou bien si des circonstances particulières l'exigent, comme des traversées importantes de piétons à la sortie des usines, des bureaux, ou des écoles, il faut prévoir des presse-boutons qui ne sont actionnés que lorsqu'il y a un réel besoin.

Prenons un exemple :

Un courant sécant dont le débit est $\Psi = 0,30$ fois le débit du courant prioritaire, a besoin de 6 secondes pour traverser le carrefour. Le temps d'attente moyen par véhicule sera approximativement (2), en secondes :

$$\frac{Q}{3\ 600} \times 6 \times 6 = \frac{Q}{100}$$

(1) Direction des Rentes "calculs de rentabilité appliqués aux investissements routiers", Septembre 1964, Page 5.

(2) Matson, Smith and Furd, "Traffic Engineering", 1955, p. 159.

en fonction du débit Q du trafic principal, si $Q_{\max} = 400$ uvp,
le temps total dépensé dans la journée s'élèvera à :

$$4 \cdot \frac{Q^2}{100} = \frac{4}{100} \times 5,6 Q_{\max}^2 = 2\ 700'' \text{ ou } 3/4 \text{ heure}$$

En installant des feux au carrefour, on supprime ces délais mais on en crée d'autres à cause des temps de rouge sur les deux phases.

Des règles simples et pratiques fixent alors les seuils inférieurs de débit sur les courants principaux et sécants au delà desquels il est justifié d'installer des feux. On peut se reporter par exemple aux règles américaines (1).

B - Coordination des feux

Généralement, on admet qu'il y a un intérêt à coordonner des feux lorsqu'ils sont à moins de 500 mètres les uns des autres. Au delà de 500 mètres, la coordination perd beaucoup de son efficacité par suite de la dispersion des vitesses dans les pelotons de véhicules.

Le coût de la coordination est très variable puisqu'elle nécessite l'installation d'une armoire de commande supplémentaire dont le coût est d'environ 20 000 F par intersection. Si le cycle est $K = 60$ sec. et le rouge $R = 30$ sec., le temps moyen perdu est au minimum :

$$\frac{1}{2} R \times \frac{R}{K} = 7,5''$$

(1) Department of Commerce "Manual on Uniform Control Devices", Juin 1961, pp. 185 et 186.

Le gain journalier serait ainsi au minimum :

$$7,5'' \times 8 Q_{\max}$$

d'où par an, un bénéfice :

$$7,5 \times 8 Q_{\max} \times \frac{8 \text{ F}}{3600} \times 365 = 48,5 Q_{\max} \text{ F.}$$

Cette rente, au taux de 15 % correspond à un capital de :

$$\frac{48,5}{0,15} Q_{\max} = 325 Q_{\max}$$

Le montant de l'investissement est de 20 000 F, d'où

$$Q_{\max} \rightarrow \frac{20\,000}{325} = 60 \text{ u.v.p.}$$

Le trafic nécessaire est très faible, ce qui révèle la très haute rentabilité des opérations de coordination de feux quand elles sont possibles.

En fait, l'efficacité de la coordination dépend de plusieurs facteurs :

- a) - Un débit inférieur à la capacité de la bande verte. On admettra dans une première approche que ce débit doit être inférieur à 80 % de cette capacité, dans le cas contraire, la coordination n'aura plus d'effet au feu saturé.
- b) - Des distances convenables et homogènes entre intersections. Pratiquement des distances de 300 mètres sont nécessaires entre feux pour passer dans les 2 sens des bandes de largeur convenable et correspondant à des vitesses de groupe de 40 Km/heure. Lorsque les distances sont

peu homogènes ou très inférieures à 300 mètres, on ne peut guère passer de bande que dans un sens de sorte que l'avantage n'est à mesurer que dans ce sens là. De toute façon, les rentabilités de ce genre d'investissement sont suffisamment grandes pour le justifier même lorsque les trafics sont très faibles.

- c) - Un pourcentage de tourne-à-gauche faible ou la prévision de voies spéciales pour ceux-ci . Par exemple si les pelotons comportent 9 véhicules, et si le pourcentage de tourne-à-gauche est de 10 % dans une rue à 2 voies, la probabilité que le 1er véhicule ne soit pas arrêté est 0,90, la probabilité que le 2ème véhicule ne soit pas arrêté est $0,90 \times 0,90 = 0,81$ etc ... de sorte que l'espérance du nombre de véhicules non arrêtés est :

$$0,90 [1 + 0,90 + \dots] = 0,90 \frac{1 - 0,90^9}{1 - 0,90} = 5,5$$

L'efficacité est alors réduite de près de moitié.

S'il est possible de supprimer le stationnement sur les approches sans gêne économique sérieuse pour les riverains, l'opération est très rentable puisque le gain annuel par constitution d'une piste spéciale pour tourner à gauche pourrait être :

$$\frac{2,6}{9} \times 8 \times \frac{7,5''}{3600} \times 365 \times 8 \text{ F.} \times Q_{\max} = 13,5 Q_{\max}$$

Si $Q_{\max} = 500$ u.v.p., le gain annuel de 6 750 F. correspondrait au taux de 15 % à la récupération d'un capital de 45 000 F.

En définitive, les gains importants apportés par la coordination la rendent obligatoire sur tous les axes munis de feux situés à des distances inférieures à 500 mètres. Lorsque le débit de pointe atteint les 80 % de la capacité de la bande verte, l'efficacité est probablement très réduite au carrefour qui limite la largeur de cette bande mais pas nécessairement aux autres carrefours.

Lorsqu'il y a congestion complète, on ne peut attendre de l'itinéraire une meilleure capacité après mise en place de la coordination.

3. Suppression du stationnement sur rue avant défaut de capacité

1°/ En section courante

Lorsque le trafic est faible, l'influence d'une augmentation de trafic sur les délais causés par les feux est relativement faible par rapport à celle sur les temps de parcours.

Une enquête récente (1) en zone urbaine, lorsque la fréquence des feux est de 3 au Km, a montré que pour les trafics de l'ordre de 100 à 200 u.v.p. par m.l. de largeur de chaussée, le temps de parcours peut augmenter d'environ 1" pour chaque accroissement d'une unité de trafic par m.l., ou de 3 unités par voie de 3 mètres. La suppression du stationnement libère pratiquement une voie de 3 mètres, de sorte que dans une rue disposant déjà de 2 voies libres, le débit par m.l. peut être divisé par 2 dans un sens passant par exemple de 200 u.v.p. par m.l. à 100 u.v.p. par m.l. et le temps de parcours réduit de $\frac{Q}{2 \times 3}$ secondes/Km.

Le gain annuel serait alors :

$$\frac{1}{6} \times 5,6 \times Q_{\max}^2 \times 365 \times \frac{8}{3 \times 600} = 0,76 Q_{\max}^2 \text{ Francs par Km.}$$

Si l'on recherche un taux de rentabilité immédiate de 15 %, l'investissement autorisé est :

$$I = \frac{0,76}{0,15} Q_{\max}^2 = 5 \times Q_{\max}^2$$

Si par exemple $Q_{\max} = 600$ u.v.p. dans un sens

$$I < 5 \times (600)^2 = 1\,800\,000 \text{ F. par Km}$$

(1) S.E.R.C., "Corrélation débit-temps de parcours en zone urbaine - Résultats de Paris", 1965.

Tout dépend alors de la gêne apportée aux riverains par la suppression du stationnement.

Le nombre de places à supprimer est d'environ :

$$0,80 \times \frac{10\ 000}{6} = 130$$

S'il est possible de reconstituer les places à proximité de la rue pour moins de 14 000 F. par place de stationnement et sous réserve de maintenir à certaines heures creuses l'autorisation de charger ou décharger les véhicules commerciaux, la suppression de stationnement apparaît rentable. Ceci est vrai lorsqu'il n'y a pas saturation des places de stationnement, ce qui permettrait de financer des garages à étages à 20 000 Francs la place. Les garages sont en effet souvent des opérations réalisables à ce prix même dans des zones denses (1).

2°/ Sur les approches du carrefour

On peut utiliser la valeur approchée du délai moyen à une intersection munie de feux (en secondes) :

$$\bar{t} = 15 + 0,030 \frac{Q}{nf}$$

où Q est le débit et nf le nombre de voies sur l'approche.

On peut passer d'une seule file sur l'approche à deux files en supprimant le stationnement soit un gain de temps de $0,015 Q$

$$\text{ou } 5,6 \times 0,015 Q_{\max}^2 = 0,084 Q_{\max}^2 \text{ par jour.}$$

Lorsque Q_{\max} s'élève à 600 véhicules/heure, le gain annuel se chiffre à :

$$0,084 \times 600^2 \times 365 \times \frac{8 \text{ F}}{3 \times 600} = 24\ 500 \text{ F.}$$

(1) Wilbur Smith and Associates "Parking in City Centers", May 1965.

Si un taux de rentabilité de 15 % est recherché, le capital autorisé est :

$$\frac{11\ 600\ \text{F}}{0,15} = 164\ 000\ \text{F}.$$

Pour être efficace l'interdiction de stationner devrait porter sur près de 80 mètres soit sur 13 emplacements. Si la demande en places de stationnement n'est pas trop forte, la suppression du stationnement est justifiée mais pas lorsqu'il faut reconstituer les places de stationnement à coût élevé, par exemple à 20 000 F. la place en zone urbaine dense.

La véritable justification de la suppression du stationnement aux approches est l'augmentation de capacité.

En conclusion, si la mise en place de feux aux intersections lorsque le courant principal devient important est une opération rentable surtout quand elle est doublée d'une coordination des feux, la suppression du parking en section courante et sur les approches des carrefours ne l'est pas nécessairement dans les zones où la demande en places de stationnement est très forte et lorsque l'on n'a pas encore atteint la capacité aux heures de pointe.

4. Augmentation de la capacité

4.1. Suppression du stationnement

4.1.1. Méthode d'approche

La suppression du stationnement dans une rue commerçante et saturée entraîne :

d'une part une augmentation de capacité que l'on peut estimer à l'équivalent d'un débouché de 3 mètres ;

et d'autre part des désavantages qui sont principalement causés par des difficultés nouvelles d'accès.

Pratiquement, pour ne pas léser les intérêts locaux, on peut supposer qu'on reconstitue les places de stationnement supprimées dans des garages situés à une distance raisonnable, tout en tenant compte de la perte supplémentaire causée par l'éloignement du garage.

Dans cette approche le déchargement des véhicules commerciaux n'est autorisé qu'aux heures creuses, restriction dont le coût collectif ne sera pas chiffré ici.

Une autre solution, plus radicale, pour augmenter la capacité consisterait à accroître l'emprise de la voie d'une largeur uniforme, 10 mètres par exemple.

On obtient ainsi la surface nécessaire pour ajouter 3 voies de 3 mètres et d'autre part, on libère la voie utilisée pour le stationnement, compte tenu que cette voie ne sert plus s'il n'y a pas reconstitution de commerces, résidences ou bureaux, le long du nouvel alignement. En fait, cette voie pourrait être utilisée pour réaliser un terre-plein central sur une voie express.

On comparera ci-dessous les deux solutions, en fonction du débouché supplémentaire obtenu.

4.1.2. Hypothèses de calcul

On supposera que les parkings ou garages seront disposés sur l'axe à une distance moyenne de 500 mètres correspondant à une capacité d'environ 70 places de stationnement sur rue (6 mètres d'encombrement + 1 mètre pour tenir compte des intersections).

Les rotations par place seront supposées de 3 par jour correspondant :

soit à 5 rotations par place occupée compte tenu d'une occupation moyenne de 60 % ;

soit à 3 rotations par place occupée (occupation 70 %) pendant les heures d'activité et 2 rotations (occupation 50 %) aux autres heures.

4.1.3. Application

L'augmentation du trajet suite au remplacement du stationnement sur rue par des garages est estimée à environ 125 mètres, soit 2 minutes de marche. Si on ajoute à ce temps, 1 minute à l'entrée du garage et autant à la sortie, 4 minutes au total sont en moyenne perdues par les occupants du véhicule, soit à raison de 8 F. de l'heure par véhicule, une perte par an (de 350 jours) de :

$$3 \times \frac{4}{60} \times 8 \times 350 = 560 \text{ F.}$$

Cette somme correspond à l'avantage annuel attribué au stationnement sur rue, avec les hypothèses du modèle.

Comparons maintenant les deux solutions :

1°/ Solution I : Suppression d'un côté du stationnement sur rue.

Le coût par Km linéaire est égal au coût de 140 places en garage, plus le coût de la suppression de l'avantage du stationnement sur rue.

En appelant $K(p)$ le coût capitalisé de création d'une place en garage, en fonction du prix p du m^2 de terrain, le coût de la solution I peut s'estimer à :

$$C_1 = 140 \left[K(p) + \frac{560 F}{a} \right]$$

où a est le taux de rentabilité immédiate de l'opération.

La contrepartie est une augmentation de débouché de 3 mètres.

2°/ Solution II : Expropriation et destruction d'une rangée de constructions sur une profondeur de 10 mètres environ et construction de 3 voies supplémentaires.

Le coût est la somme du coût d'expropriation $140 \times 6 \times 10 p$ (où p est le prix du m^2 de terrain) et du coût de construction C_0 , soit :

$$C_2 = 8\,400 p + C_0$$

La contrepartie est une augmentation de débouché de 9 mètres.

Par conséquent, la solution I serait à préférer à la solution II, dans le cas où un accroissement de capacité est à rechercher, si $C_1 \leq \frac{C_2}{3}$,

$$\text{ou } 140 K(p) + \frac{560}{a} \leq \frac{1}{3} (8\,400 p + C_0) \quad (1)$$

Exemple numérique :

$$K(p) = 20\,000 \text{ F.} \quad (\text{zone urbarisée})$$

$$a = 10 \%$$

$$C_0 = 1 \text{ MF/Km}$$

La condition (1) sur P s'écrit :

$$140 \left[20\,000 + \frac{560}{0,10} \right] \leq \frac{1}{3} \left[8\,400 P + 10^6 \right] \quad \text{ou } P \geq 1\,160 \text{ F/m}^2$$

La condition est en principe réalisée en zone urbaine (P de l'ordre de $4\,000 \text{ F/m}^2$ pour des constructions à 1 ou 2 étages).

Autrement dit, si des accroissements de capacité sont à rechercher, il y aurait intérêt sur les artères de transit à supprimer d'abord le stationnement avant d'élargir.

4.2. Rentabilité des opérations sur les axes saturés

D'après la forme des pointes dans la Région Parisienne, le délai moyen sur 4 heures lorsque la demande en amont d'un goulot dépasse la capacité s'exprime par la forme approchée :

$$\bar{t} = 15\,000'' \times \left(1 - \frac{C}{Q_{\max}} \right)^2$$

où C est la capacité et Q_{\max} le débit maximum de pointe.

Par exemple, si Q dépasse la capacité de 10 %, le délai moyen est de 150" par véhicule, valeur très importante permettant de justifier de grands investissements d'amélioration.

A cause des coûts d'expropriation en zone urbaine, la première opération à réaliser quand elle est possible est la suppression du stationnement sur les approches des intersections faisant goulot.

Ainsi, d'après le Highway Capacity Manual, la suppression du stationnement d'un côté sur une voie de 6 mètres permet de faire passer la capacité de 1 000 u.v.p. par approche et par heure de vert à 1 750 u.v.p. ; et sur une voie de 9 mètres, de 1 750 avec stationnement des 2 côtés ou 2 000 u.v.p. avec stationnement d'un côté, jusqu'à 2 700 u.v.p. sans stationnement autorisé.

Prenons le cas d'une voie de 9 mètres à stationnement bilatéral au départ et supposons que l'on interdise ce stationnement sur 80 mètres de part et d'autre du carrefour ce qui correspond à la suppression de 52 places de stationnement.

Si la zone est dense et la demande très forte, ces places sont à remplacer par des places en garage à 20 000 F. par place environ, d'où une dépense de 1 040 000 F.

Le dépassement de capacité justifiant cette dépense peut être tiré de la relation :

$$2 \times \frac{15\,000''}{3\,600} \times 8 \times 365 \times 0,72 \times 4 Q_{\max} \left(1 - \frac{c}{Q_{\max}}\right)^2 = 0,15 \times 1\,040\,000$$

$$\text{avec } Q_{\max} \cdot C = 1\,750$$

$$\text{ou } 123\,000\,000 \left(1 - \frac{C}{Q_{\max}}\right)^2 = 156\,000$$

$$\text{et } \left(1 - \frac{C}{Q_{\max}}\right)^2 = 156\,000 = 15,6 \cdot 10^{-4}$$

$$\text{et } \frac{Q_{\max}}{C} = 1,035$$

soit un dépassement de 3,5 % seulement de la capacité.

Si l'augmentation de capacité ne peut être obtenue par suppression du stationnement parce que celui-ci a déjà été supprimé, il faut faire un aménagement systématique du carrefour et des approches, en expropriant si nécessaire. Les coûts de tels travaux sont bien sûr importants puisque les coûts moyens relevés sont de 2 Millions de Francs par carrefour dans le département de la Seine et 1 Million de Francs dans la Seine et Oise.

Cependant, même avec ces chiffres, de faibles dépassements de la capacité pendant des temps limités justifient les investissements quand la demande ne peut être satisfaite sur d'autres axes concurrents tout aussi chargés. Ainsi, dans la Seine, ce dépassement serait de l'ordre de 5 % conduisant à des temps d'attente maximum de 4 à 5 minutes devant le goulot.

En fait, il ne s'agit pas d'aménager un carrefour, mais une série de carrefours pour augmenter la capacité d'un itinéraire. S'il s'agissait par exemple de 4 carrefours critiques, le dépassement en capacité devrait être de 10 % pour justifier l'ensemble des investissements.

Lorsque la demande est très forte, il y a intérêt à profiter au maximum de l'augmentation de capacité aux carrefours consécutive à leur aménagement en utilisant toute la capacité de la section courante par la suppression du stationnement aux heures de pointe. Nous avons vu que le coût de la suppression sur les deux côtés pouvait revenir à 2 600 000 du Km dans les zones très denses, somme qui s'ajouterait aux 8 000 000 d'aménagement des carrefours mais qui procurerait un gain de plus de 50 % sur la capacité initiale dans une rue de 9 mètres.

Lorsque l'on veut augmenter encore la capacité après avoir aménagé les carrefours critiques et supprimé le stationnement pour bénéficier de toute la capacité de la section courante, il ne reste plus qu'une solution : réaliser un élargissement général de la voie en la transformant si nécessaire en voie express.

Une voie express exige au minimum :

- 2 trottoirs de 2,50 m	5,00 m
- 2 x 2 voies de 3,50 m	14,00 m
- 1 terre-plein central de 2,50 m	<u>2,50 m</u>
	21,50 m

Des expropriations supplémentaires seront nécessaires sur les approches lorsqu'on voudra encore augmenter la capacité en réalisant des passages inférieurs. La section pourrait alors être :

- passage inférieur 2 x 2 voies de 3,50 m séparées par un terre- plein	14,00 m 2,50 m
- 2 murs latéraux 1 m	2,00 m
- 2 voies d'accès au carrefour	8,00 m
- 2 trottoirs de 2,50 m	5,00 m
	<u>31,50 m</u>

C'est donc environ 22 m en section courante et 30 mètres sur les approches qui apparaissent être les emprises strictement nécessaires pour obtenir une capacité maximale de 4 voies soit 6 000 u.v.p. à l'heure de pointe avec une vitesse moyenne de l'ordre de 50 Km/heure.

Les coûts de ces élargissements sont très variables mais de toute façon extrêmement élevés et probablement plus élevés dans bien des cas que la construction d'autoroutes urbaines sur les tracés nouveaux. Cependant lorsque la construction d'autoroutes exige le traitement de routes existantes en voie de distribution à grande capacité, on n'échappe pas à des élargissements. Il semble que ces opérations doivent être conçues dans le cadre d'opérations de plus grande envergure comme des rénovations de quartiers où l'on profite de l'expropriation nécessaire à la voie express pour reconstruire et aménager une zone plus vaste.

ANNEXE N°VICOUTS ADMIS POUR LE CALCUL DES INVESTISSEMENTS

1. Construction de parkings	20 000 NF par place en zone urbaine 5 000 NF par place en zone rurale
2. Feux coordonnés	50 000 NF par intervalle entre 2 feux coordonnés
3. Elargissement d'un carrefour	1 000 000 NF par carrefour
4. Construction d'un pont de chemin de fer	1 000 000 NF par pont
5. Construction d'un passage supérieur	3 000 000 NF par passage supérieur
6. Elargissement :	
a) en zone urbaine	4 000 000 NF par voie de 3,5 m et par km
b) en zone rurale	1 200 000 NF par voie de 3,5 m et par km
c) si le tronçon est à la fois rural et urbain, on le décompose en sous-tronçons urbains et ruraux.	
7. Echangeur :	
a) en zone urbaine	1 500 000 NF par échangeur
b) en zone rurale	5 000 000 NF par échangeur
8. Construction d'une autoroute :	
a) en zone urbaine	4 000 000 NF par voie par km
b) en zone rurale	1 200 000 NF par voie par km
c) élargissement 2 x 1 voie	par km

Montant estimé
de l'investissement
en millions de F

A.1 - Tronçon 21 - Longueur 3,5 km, allant de la Porte
de la Chapelle à N.1

- niveau 1 - Etat initial existant, vitesse de base 90 km/h

A.14 - Tronçon 1 - Longueur 9,4 km, allant de la N.186
à St Germain

- niveau 1 - Etat initial

- niveau 2 - Ajouter 2 voies.....

5,30

A.14 - Tronçon 3 - Longueur 3,5 km, allant de la Défense
à N.186

- niveau 1 - Etat initial

A.14 - Tronçon 5 - Longueur 3,2 km, allant de la Porte
Maillot à la Défense

- niveau 1 - Etat initial

Montant estimé
de l'investissement
en millions de F

A.15 - Tronçon 7 - Longueur 7,5 km, allant de la Patte d'Oie
d'Herblay à Pontoise

- niveau 1 - Etat non existant	
- niveau 2 - Construction de 2 x 2 voies avec 1 échangeur	42,00
- niveau 3 - Construction de 2 voies supplémentaires	10,00

A.15 - Tronçon 15 - Longueur 7 km, allant de Sannois à la
Patte d'Oie d'Herblay

- niveau 1 - Etat non existant	
- niveau 2 - Construction de 2 x 3 voies avec 2 carrefours à niveau	30,00
- niveau 3 - Construction de 2 échangeurs	10,00
- niveau 4 - Construction de 2 vois supplémentaires	4,00

A.15 - Tronçon 17 - Longueur 5 km, allant d'Asnières à Sannois

- niveau 1 - Etat non existant	
- niveau 2 - Construction de 2 x 4 voies avec 2 carrefours à niveau (vitesse de base 90 km/h)	30,00
- niveau 3 - Construction de 2 échangeurs, vitesse de base 90 km/h	10,00

Montant estimé
de l'investissement
en millions de F

A.15 - Tronçon 19 - Longueur 3,5 km, allant de la Porte
Ponchet à Asnières

- niveau 1 - Etat non existant	
- niveau 2 - Construction de 2 x 4 voies avec 2 carrefours à niveau (vitesse de base 70 km/h)	14,00
- niveau 3 - Construction de 2 échangeurs, vitesse de base 90 km/h	30,00

A.20 - Tronçon 9 - Longueur 9,3 km, allant de Bezons à la
Patte d'Oie d'Herblay

- niveau 1 - Etat non existant	
- niveau 2 - Construction de 2 x 2 voies avec 2 carrefours à niveau	19,00
- niveau 3 - Construction de 2 échangeurs - Autoroute	10,00
- niveau 4 - Ajouter 2 voies supplémentaires	5,00

A.20 - Tronçon 11 - Longueur 2,8 km, allant de la Garenne-
Colombes à Bezons

- niveau 1 - Etat non existant	
- niveau 2 - Construction de 2 x 3 voies avec 1 carrefour à niveau	58,00
- niveau 3 - Construction d'un échangeur - Autoroute	15,00
- niveau 4 - Construction de 2 voies supplémentaires	1,50

Montant estimé
de l'investissement
en millions de F

A.20 - Tronçon 13 - Longueur 4,5 km, allant de la Porte
d'Asnières à la Garenne-Colombes

- niveau 1 - Etat non existant	
- niveau 2 - Construction de 2 x 3 voies avec 2 carrefours à niveau	170,00
- niveau 3 - Construction de 2 échangeurs - Autoroute	30,00
- niveau 4 - Construction de 2 voies supplémentaires	2,50

N.13 - Tronçon 25 - Longueur 15,95 km, de La Défense à
St Germain

- niveau 1 - Etat initial, 5 sous-tronçons (2,4 ; 1,0 ; 8,3 ; 3,0 ; 1,25), (25 carrefours à feux)	
- niveau 2 - Coordination des feux 10/21 et 23/25	0,55
- niveau 3 - Suppression du stationnement des 2 côtés pour le sous-tronçon n° 2 Elargissement du sous-tronçon n° 5 de 3 à 4 voies Reconstitution de 350 places en garage	12,00
- niveau 4 - Elargissement de 4 à 6 voies des sous-tronçons n°s 1 et 3 avec surlargeurs aux approches des carrefours	48,00
- niveau 5 - Construction de 10 passages supérieurs	30,00

Montant estimé
de l'investissement
en millions de F

N.14 - Tronçon 59 - Longueur 5,7 km : compris entre la Porte
de Clignancourt et Vert Galant

- niveau 1 - Etat initial, 6 sous-tronçons (0,5 ; 0,5 ; 0,90 ; 0,75 ; 1,05 ; 2), 7 carrefours à feux	
- niveau 2 - Coordination des feux 1 à 3 et 5 et 6	0,15
- niveau 3 - Suppression totale du stationnement sur les sous-tronçons 2 (0,5 km), 4 (0,75 km) et 5 (1,05 km) Suppression du stationnement sur les approches des carrefours 2, 3, 5, 6 Suppression du stationnement d'un côté au carrefour n° 4	12,00
- niveau 4 - Elargissement du sous-tronçon n° 6 de 4 à 6 voies	8,00
- niveau 5 - Construction de 5 passages supérieurs aux carrefours n°s 3, 4, 6, 7, 8	15,00

N.14 - Tronçon 67 - Longueur 3,5 km, allant de Vert Galant
au Cygne d'Enghien

- niveau 1 - Etat initial, 1 sous-tronçon, 5 carrefours avec feux	
- niveau 2 - Coordination des feux 1, 2, 3, 4	0,15
- niveau 3 - Elargissement de 5 carrefours à 2 x 4 voies	5,00
- niveau 4 - Construction de 2 passages supérieurs	6,00

Montant estimé
de l'investissement
en millions de F

N.14 - Tronçon 69 - Longueur 3 km, allant du Cygne d'Enghien
à Sannois

- niveau 1 - Etat initial, 1 sous-tronçon, 3 carrefours avec feux	
- niveau 2 - Coordination des feux 1, 2, 3	0,10
- niveau 3 - Elargissement de 3 carrefours de 2 à 4 voies par sens	3,00
- niveau 4 - Construction d'un passage supérieur au carre- four n° 3	3,00

N.14 - Tronçon 71 - Longueur 7,6 km, allant de Sannois à La
Patte d'Oie d'Herblay

- niveau 1 - Etat initial, 1 sous-tronçon, 4 carrefours avec feux	
- niveau 2 - Elargissement des approches des 4 carrefours de 2 à 4 voies par sens	4,00
- niveau 3 - Transformation des 4 carrefours : passages supérieurs	12,00

N.14 - Tronçon 73 - Longueur 7,2 km, allant de La Patte d'Oie
d'Herblay à Pontoise

- niveau 1 - Etat initial, 2 sous-tronçons (4, 7 ; 2, 5) (3 carrefours avec feux)	
--	--

Montant estimé
de l'investissement
en millions de F

- niveau 2 - Elargissement de 3 à 4 voies du sous-tronçon n° 2 (2,5 km)	20,00
- niveau 3 - Elargissement du 2 ^e carrefour avec approche de 4 voies au lieu de 2	1,00
- niveau 4 - Transformation du 2 ^e carrefour en un passage supérieur	3,00

N.14^A - Tronçon 61 - Longueur 3,8 km, allant de la Porte de
Paris à Vert-Galant

- niveau 1 - Etat initial, 2 sous-tronçons (2,7 ; 1,1) 6 carrefours avec feux	
- niveau 2 - Coordination des feux 4, 5, 6,	0,10
- niveau 3 - Réalisation de 4 passages supérieurs n ^{os} 2, 3, 4, 5,	12,00
- niveau 4 - Elargissement de 4 à 6 voies du sous-tronçon n° 3 (1,1 km)	4,50

N.184 - Tronçon 43 - Longueur 3,8 km, de St Germain à la
Croix de Noailles

- niveau 1 - Etat initial, 2 sous-tronçons (1, 6 ; 2, 2) (2 carrefours à feux)	
- niveau 2 - Elargissement du tronçon à 2 voies par sens	7,00

Montant estimé
de l'investissement
en millions de F

N.184 - Tronçon 45 - Longueur 12,6 km, de la Croix de Noailles
à Pontoise

- niveau 1 - Etat initial, 3 sous-tronçons (5,8 ; 1,2 ; 5,6) 4 carrefours à feux	
- niveau 2 - Coordination des feux 3 et 4	0,05
- niveau 3 - Suppression du stationnement sur le sous- tronçon n° 2	3,00
- niveau 4 - Elargissement du sous-tronçon n° 1 à 2 x 2 voies Déviation 8 km à 2 x 2 voies la vitesse de base admise est de 65 km/h Voie express	25,00

N.192 - Tronçon 29 - Longueur 1,85 km, allant de La Défense
à la Garenne-Colombes

- niveau 1 - Etat initial, 4 sous-tronçons (0,6 ; 0,4 ; 0,3 ; 0,55) 6 carrefours à feux	
- niveau 2 - Coordination des feux de 1 à 7	0,30
- niveau 3 - Suppression du stationnement, reconstitution <u>de 370 places en garages</u>	7,50
des 2 côtés pour le sous-tronçon 2 (0,4 x 2 = 0,8 km) d'un côté pour le sous-tronçon 3 (0,3 km) des 2 côtés pour le sous-tronçon 4 (0,55 km)	

Montant estimé
de l'investissement
en millions de F

- niveau 4 - Elargissement de 4 à 6 voies sur tout le tronçon - sur largeur aux approches des carrefours ..	13,00
- niveau 5 - Construction de 2 passages supérieurs	6,00

N.192 - Tronçon 33 - Longueur 2,9 km, allant de la Garenne-Colombes à Bezons

-	
- niveau 1 - Etat initial, 9 carrefours à feux	
- niveau 2 - Coordination des feux de 1 à 10	0,45
- niveau 3 - Elargissement des approches à 4 voies par sens sur les 3 premiers feux et de 3 carrefours à 6 voies par sens	3,00
- niveau 4 - Construction de 3 passages supérieurs	9,00

N.192 - Tronçon 55 - Longueur 9,55 km, allant de Bezons à la Patte d'Oie d'Herblay

- niveau 1 - Etat initial, 3 sous-tronçons (0,75 ; 7,0 ; 1,8), 7 carrefours à feux	
- niveau 2 - Suppression du stationnement unilatéral sur le sous-tronçon 1 (0,75 km)	2,00
- niveau 3 - Elargissement du tronçon à 2 x 2 voies	22,00

Montant estimé
de l'investissement
en millions de F

N.308 - Tronçon 27 - Longueur 4,2 km, allant de la Porte
Champerret à la Garenne-Colombes

- niveau 1 - Etat initial, 2 sous-tronçons (2,1 ; 2,1) 12 carrefours à feux	
- niveau 2 - Coordination des feux de 1 à 7 et 8 à 11	0,45
- niveau 3 - Suppression complète du stationnement sur le sous-tronçon n° 2, reconstitution de 700 places en garages (2,1 km)	14,00
- niveau 4 - Elargissement à 2 x 3 voies du sous-tronçon n° 2 (2,1 km) avec surlargeurs sur les approches	8,00
- niveau 5 - Construction de 4 passages supérieurs	12,00

N.308 - Tronçon 37 - Longueur 2,1 km, allant de Bezons au
tronçon n° 35

- niveau 1 - Etat initial, 1 sous-tronçon, 1 carrefour avec feux	
- niveau 2 - Elargissement de 3 à 4 voies	8,00

N.308 - Tronçon 39 - Longueur 3,65 km, allant du tronçon
37 à Maisons-Laffitte

- niveau 1 - Etat initial, 2 sous-tronçons (2,8 ; 0,85); 5 carrefours avec feux,	
---	--

Montant estimé
de l'investissement
en millions de F'

- niveau 2 - Coordination des feux 1, 2, 3 / 4, 5	0,15
- niveau 3 - Elargissement de 1,5 à 2 voies par sens du sous-tronçon 1 (2,8 km), Elargissement de 1 à 2 voies par sens du sous-tronçon 2 (0,85)	14,00

N.308 - Tronçon 41 - Longueur 4 km, allant de Maisons-
Laffitte à Croix de Noailles

- niveau 1 - Etat initial, 4 sous-tronçons (0,3 ; 0,4 ; 1,4 ; 1,9), 4 carrefours à feux	
- niveau 2 - Coordination des feux 2, 3, 4	0,10
- niveau 3 - Suppression du stationnement unilatéral sur le sous-tronçon n° 3 (1,4 km), reconstitution de 250 places en parking, Suppression du stationnement aux approches des carrefours 3 et 4,	5,00
- niveau 4 - Elargissement de 1,5 à 2 voies par sens du sous-tronçon 3 (1,4 km) et de 1 à 2 voies par sens du sous-tronçon n° 4 (1,9 km),;.....	5,00

N.309 - Tronçon 51 - Longueur 2,8 km, allant d'Asnières
au Pont d'Argenteuil,

- niveau 1 - Etat initial, 3 sous-tronçons (1,9 ; 0,50 ; 0,4) 3 carrefours à feux,	
---	--

Montant estimé
de l'investissement
en millions de F

- niveau 2 - Coordination des feux 2 et 3,	0,05
- niveau 3 - Suppression du stationnement bilatéral du sous-tronçon n° 1 (1,9 km) et du stationnement unilatéral du sous-tronçon n° 2 (1,4 km); reconstitution de 750 places en garages,	15,00
- niveau 4 - Elargissement des approches aux 3 carrefours, ..	3,00

N.309 - Tronçon 53 - Longueur 3,44 km, allant du Pont
d'Argenteuil à Sannois,

- niveau 1 - Etat initial, 2 sous tronçons (0,64 ; 2,80) ; 3 carrefours à feux	
- niveau 2 - Elargissement des approches à 2 carrefours en zone suburbaine (2 voies par sens),	5,00

N.310 - Tronçon 47 - Longueur 3,66 km, allant de la Porte
de Clichy à Asnières, (Voir 47 bis)

- niveau 1 - Etat initial, 3 sous-tronçons (1,2 ; 1,4 ; 1,06), 11 carrefours à feux,	
- niveau 2 - Coordination de 10 carrefours,	
- niveau 3 - Suppression stationnement unilatéral du sous-tronçon n° 1 (1,2 km) et du stationnement bilatéral du sous-tronçon n° 3 (1,06 km),	
- niveau 4 - Elargissement du tronçon à 4 voies, surlargeur aux approches des carrefours, reconstitution de 550 places en garages.	

Montant estimé
de l'investissement
en millions de F

N.310 - Tronçon 47 bis - Longueur 2,4 km, allant de la Porte
de Clichy à Asnières,

- niveau 1 - Etat initial, 1 sous-tronçon,
6 carrefours à feux,
- niveau 2 - Coordination des feux de 1 à 7, 0,75
- niveau 3 - Suppression du stationnement bilatéral,
reconstitution de 800 places en garages, 27,00
- niveau 4 - Elargissement du tronçon à 2 x 3 voies, 38,00

N.310 - Tronçon 63 - Longueur 2,4 km, allant d'Asnières à
Gennevilliers,

- niveau 1 - Etat initial, 2 sous-tronçons (0,5 ; 1,9),
1 carrefour avec feux,
- niveau 2 - Suppression totale du stationnement sur le
tronçon n° 1 (0,5 x 2 = 1) 170 places, 19,00
Elargissement du sous-tronçon n° 2 (1,9 km)
de 2 à 4 voies,
- niveau 3 - Elargissement de l'ensemble du tronçon (2,4 km)
de 4 à 6 voies 17,00

N.310 - Tronçon 65 - Longueur 3,3 km, allant de Gennevilliers
au Cygne d'Enghien

- niveau 1 - Etat initial, 3 sous-tronçons (1,1 ; 1,4 ; 0,8)
3 carrefours avec feux,

Montant estimé
de l'investissement
en millions de F

- niveau 2 - Suppression totale du stationnement sur le sous-tronçon n° 1 (soit $2 \times 1,1 = 2,2$ km) 400 places à reconstituer en parking,	8,00
- niveau 3 - Elargissement de 2 à 3 voies des approches des 2 premiers carrefours,	2,00
- niveau 4 - Elargissement général de 4 à 6	14,00

D.17 - Tronçon 47 ter - Longueur 5,7 km, allant de la Porte
Pouchet à Gennevilliers, (Voir 47 bis)

- niveau 1 - Etat initial, 4 sous-tronçons (1,5 ; 0,45 ;
0,90 ; 1,85), 3 carrefours à feux,
- niveau 2 - Suppression du stationnement sur 1 côté du
sous-tronçon n° 1 (1,5 km), reconstitution
de 1 600 places en garages,
Suppression du stationnement du sous-tronçon
n° 4 (1,85 km),
- niveau 3 - Suppression totale du stationnement du sous-
tronçon n° 1 (+ 1,5 km), reconstitution de
200 places en garages,
Elargissement du sous-tronçon 4 (1,85 km)
à 2×2 voies,
Elargissement des approches de 2 à 3 voies
sur 2 carrefours en zone urbaine et 2 en
zone suburbaine.

Montant estimé
de l'investissement
en millions de F

D.20 - Tronçon 57 - Longueur 5,300 km, compris entre Gennevilliers et intersection de la D.20 avec la N.14

- | | |
|--|-------|
| - niveau 1 - Etat initial, 5 sous-tronçons (0,4 ; 0,5 ; 1,8 ; 0,45 ; 2,15), 5 carrefours à feux, | |
| - niveau 2 - Coordination des feux 1, 2, 3 | 0,15 |
| - niveau 3 - Suppression du stationnement sur 1 côté pour les sous-tronçons 2 (0,5 km) et 3 (1,8 km), reconstitution de 400 places en garages, | 21,00 |
| - niveau 4 - Suppression totale du stationnement pour le sous-tronçon 2 (0,5 km) et suppression du stationnement sur 1 côté pour le sous-tronçon 5 (2,15), reconstitution de 450 places en garages | 27,50 |

D.106 et D.13 - Tronçon 49 - Longueur 3,7 km, allant de la Garenne Colombes au Pont d'Argenteuil,

- | | |
|---|-------|
| - niveau 1 - Etat initial, 3 sous-tronçons (2,5 ; 0,6 ; 0,6) 6 carrefours à feux, | |
| - niveau 2 - Coordination des feux 2, 3, 4, 5 | 0,15 |
| - niveau 3 - Suppression du stationnement unilatéral du sous-tronçon n° 1 (2,5 km), reconstitution de 650 places en garages | 13,00 |
| Suppression du stationnement bilatéral du sous-tronçon n° 2 (0,6 km), | |

Montant estimé
de l'investissement
en millions de F

-niveau 4 - Elargissement du sous-tronçon n° 1 (2,5 km) à 2 x 2 voies	11,00
Elargissement du carrefour n° 6 de 2 à 3 voies en zone suburbaine.	
Route projetée - <u>Tronçon 23</u> - Longueur 8 km, allant du Bd périphérique à A.14,	
- niveau 1 - Etat initial non existant,	
- niveau 2 - Voie express 2 x 2 voies, 16 feux coordonnés vitesse de base 60 km/h.	200,00
Route projetée - <u>Tronçon 31</u> - Longueur 4 km, allant de la Garenne-Colombes à A.14,	
- niveau 1 - Etat initial non existant,	
- niveau 2 - Echangeur avec A.14, coordination de 10 feux vitesse de base 38 km/h	67,00
Route projetée - <u>Tronçon 35</u> - Longueur 2,2 km, allant de A.14 à N.308	
- niveau 1 - Etat initial non existant,	
- niveau 2 - Construction de 1 km à 2 voies + 1,2 km à 4 voies express + échangeur	30,00
- niveau 3 - Elargissement sur 1 km de 2 à 4 voies	8,00

ANNEXE N° VII

Modèle de Carter et Stowers

A. Définition du modèle

Le modèle est basé sur une minimisation de la somme des coûts de construction et des coûts d'exploitation ou des coûts collectifs individuels. Dans ce modèle, la courbe de coût total sur un tronçon est approximée par deux segments de droite dont les pentes u_1 et u_2 ($u_2 > u_1$) sont les coûts unitaires par véhicule supposés constants. Pour plus de finesse, on peut d'ailleurs inscrire dans la courbe un polygone quelconque ; le point anguleux définit la capacité pratique C_p , le point extrême à droite, la capacité possible C (voir figure à la fin de cette annexe).

Carter considère alors que tout se passe comme si chaque tronçon ou arc pouvait se décomposer en deux branches de coûts u_1 et u_2 de capacité C_p , et $C - C_p$ pour un même arc. Avec cet artifice, le problème se traite avec des coûts unitaires constants sur chaque branche qui constitue un arc élémentaire du réseau. Augmenter la capacité d'un arc, revient à faire sur la courbe des coûts une homothétie de sorte que les nouvelles valeurs C' et C'_p sont données en fonction des anciennes par la relation :

$$\frac{C'}{C'_p} = \frac{C}{C_p}$$

Notons que même en supposant la constance du niveau des paliers u_1 et u_2 , le modèle traduit bien la diminution du coût unitaire avec l'augmentation de capacité.

Une seconde hypothèse importante du modèle consiste en ce que les investissements sont proportionnels à l'augmentation de capacité qu'ils entraînent, c'est à dire que l'on peut définir le coût r_j résultant de l'accroissement unitaire de capacité sur l'arc j .

Notations :

j est l'indice des arcs,

$k = 1$ ou 2 est l'indice qui définit la branche de l'arc de coût u_1 ou u_2 ,

i est un noeud origine,

h un noeud destination

U_{jk} est le coût unitaire usagers sur l'arc j , branche k

X_{jk}^{ih} est le flux sur le j^e arc k^e branche des usagers venant du noeud i , se rendant au noeud h . X^{ih} est la demande correspondant au couple ordonné ih ,

r_j est le coût de l'accroissement unitaire de capacité de l'arc j ,

C'_{jk} est l'accroissement de capacité de la k^e branche du j^e arc.

$$F = \text{Min} \sum_{j,k} \left[\sum_{i,h} X_{jk}^{ih} \right] U_{jk} + \sum_j r_j C'_{j1}$$

Les contraintes sont les suivantes :

a) Contraintes de demande :

$$\sum_{j,k} X_{jk}^{ih} = X^{ih}$$

b) Contraintes de capacité :

$$\sum_{i,h} X_{jk}^{ih} \leq C_{jk}$$

$$C_{j1} C'_j - C_j C'_{j1} = 0$$

c) Contraintes de budget :

$$\sum_j r_j C'_j \leq F, \quad F \text{ étant les fonds disponibles.}$$

d) Equilibre aux noeuds :

$$\sum_{j,k} \sum_h e_{jih} \left[X_{jk}^{ih} - X_{jk}^{hi} \right] = \sum_h (X^{hi} - X^{ih})$$

avec $e_{jih} = 1$ pour un arc d'origine i
 $= 0$ dans les autres cas.

e) $X_{jk}^{ih}, C'_{jk} \geq 0$

Dans ce modèle, les variables principales sont les X_{jk}^{ih} et les C'_{jk} . Le programme détermine l'affectation et le niveau des investissements continus. C'est un programme linéaire mais on voit qu'il ne laisse aucune place à l'influence du comportement réel des usagers.

B. Méthode de résolution du modèle de Carter et Stowers

La minimisation de la fonction objectif se fait sous un certain nombre de contraintes, écrites précédemment que nous allons dénombrer :

Supposons que $i = 1 \dots m$ noeuds origines.

$h = 1 \dots n$ noeuds destinations.

$j = 1 \dots L$ arcs ou tronçons.

$k = 1, 2$.

Dans le cas général, $m = n$.

Il y a m contraintes de demande, $2L + L = 3L$ contraintes de capacité, 1 contrainte de budget, soit au total : $m + 3L + 1$ contraintes.

Les fonctions données sont les X^{ih} , les C_{jk} et F .

Soit (P_i) le programme optimum relatif au i^e noeud origine, P_{iq} le q^e point extrême pour la i^e distribution. Les (P_i) s'obtiennent assez facilement sans tenir compte des contraintes, puisqu'il n'y a qu'une origine.

Les (P_i) étant obtenus, on résoud le problème composé suivant :

$$\text{Minimiser : } H = \sum_{i,q} U_{iq} R_{iq}$$

$$\text{Avec } \sum_q R_{iq} = 1$$

$$\sum_{i,q} P_{iq} R_{iq} \leq C$$

$$R_{iq} \geq 0$$

Où R_{iq} est la part du q^e point extrême de la i^e distribution du trafic qui doit intervenir dans le programme optimum final. Le problème composé n'a que $m + 2L$ contraintes.

Il y a donc deux programmes linéaires à résoudre, mais chacun est plus simple que le problème complet traité séparément.

C. Interprétation du dual du modèle de Carter et Stowers

Deux variables duales sont particulièrement intéressantes :

G_{jk} la variable associée à la contrainte de capacité, et D celle qui est associée à la contrainte financière :

$\sum_{i,h} X_{jk}^{ih} - C'_{jk} \leq C_{jk}$; variable duale G_{jk}

$\sum_j r_j C'_j \leq F$; variable duale D

G_{jk} et D sont négatifs. G_{jk} est l'augmentation de coût qui résulte de l'augmentation d'une unité de la capacité d'un arc pour lequel le C' associé était nul dans le programme optimum. D est l'augmentation du coût qui résulte de l'augmentation d'une unité des fonds disponibles. Ce sont en fait des diminutions.

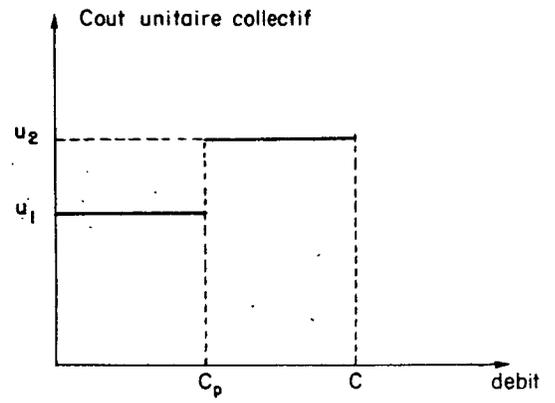
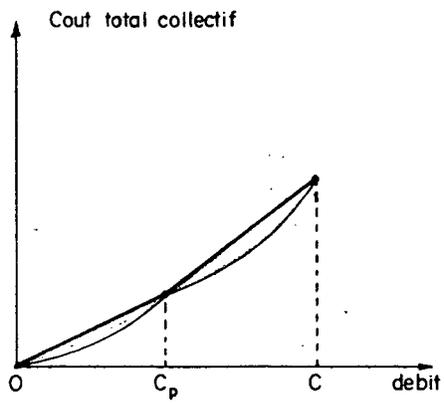
On mesure pour ces variables la perte que l'on fait en n'augmentant pas la capacité sur un arc, ou en se limitant à un budget donné. On voit ainsi que G_{jk} et D sont les valeurs que la collectivité doit attribuer à l'augmentation unitaire de capacité d'un arc, ou à l'augmentation unitaire des fonds disponibles.

BIBLIOGRAPHIE

- E.C. Carter et J.R. Stowers A model for the allocation of funds for Capacity improvements to urban highway systems. Janvier 1963.
- N.O. Jorgensen Some aspects of the urban traffic assignment problem Berkeley - Juillet 1963.
- J.M. Ridley An investment Policy to reduce the travel time in a transportation Network.

(D'après une note de Messieurs Burdeau et Yaucourt, ingénieurs élèves à l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées).

MODELE DE CARTER ET STOWERS



ANNEXE N° VIII

Estimation des valeurs résiduelles
par la méthode des coûts
de dernière année

Considérons à partir d'une année n , deux séries d'opérations successives correspondant à deux états initiaux différents de l'infrastructure ; il s'agit des états laissés à la fin d'une période d'analyse, par exemple une période de 20 ans. On peut alors représenter, en fonction du temps, les coûts collectifs usagers + riverains C et C' correspondant aux deux infrastructures initiales précédentes. La différence des valeurs résiduelles laissées à l'année n est égale à la différence des bilans actualisés infrastructure + coût des usagers et des riverains de n à ∞ ce que l'on pourra écrire :

$$\int_n^{\infty} (C - C') e^{-at} \cdot dt + \sum_i I_i e^{-at_i} - \sum_j J_j e^{-a\theta_j}$$

où les I_i sont les investissements sur l'infrastructure n° 1 effectués aux dates t_1, t_2, t_3 , etc ..., après l'époque n ,
et J_j les investissements effectués sur l'infrastructure n° 2 aux dates θ_1, θ_2 , etc ..., après l'époque n ,
 a est le taux d'actualisation.

Nous ferons d'autre part l'hypothèse qu'entre deux améliorations successives du réseau, le coût annuel usagers + riverains croît en fonction du temps, et l'on admettra que lorsqu'une infrastructure correspond à un coût annuel inférieur à celui d'une autre infrastructure, la dérivée du coût en

fonction du temps est plus faible. Ainsi, en représentant sur un graphique les fonction C et Γ en mettant en abscisse le temps et en ordonnée le coût, la fonction C sera constituée d'une courbe à concavité positive et de sauts négatifs aux dates t_1, t_2, t_3 , correspondant à des investissements J_1, J_2 , effectués aux dates θ_1, θ_2 . La fonction $C - \Gamma$ peut elle-même se décomposer en une fonction $s - \sigma$ comportant les différents sauts de la fonction $C - \Gamma$ et des paliers entre ces différents sauts et d'une fonction continue $C^* - \Gamma^*$ où il n'y a plus de saut.

La fonction $C^* - \Gamma^*$ peut être prise égale à sa valeur initiale $(C - \Gamma)_n$ augmentée d'une fonction Δ qui d'après nos hypothèses, est croissante tant que $C - \Gamma > 0$, et décroissante lorsque $C - \Gamma < 0$. En fait, on ne peut connaître à l'avance ce que sera exactement la valeur de Δ aux différentes époques ($\Delta = 0$ à l'époque n). On ne peut même pas tirer du fait que Δ soit > 0 au départ juste après l'époque n, l'assurance qu'il le restera continuellement car, même si une infrastructure a initialement un niveau peu élevé, il ne s'en suit pas nécessairement qu'elle n'atteindra pas, par suite d'améliorations successives, un niveau plus important qu'une autre infrastructure au départ plus importante. Dans ces conditions, un bon estimateur, au sens de la théorie des probabilités, de l'intégrale

$$\int_n^{\infty} \Delta e^{-at} \cdot dt$$

est la valeur 0.

Revenons maintenant à la fonction $s - \sigma$ représentée sur le graphique ci-contre. On peut écrire :

$$\int_n^{\infty} (s - \sigma) e^{-at} \cdot dt = \int_n^{\infty} s e^{-at} \cdot dt - \int_n^{\infty} \sigma e^{-at} \cdot dt$$

Les fonctions σ et s sont représentables très simplement. La fonction s est composée de sauts successifs aux époques t_1, t_2, t_3 de valeur égale à aI_1, aI_2, aI_3 puisque les investissements sont par hypothèse réalisés à leurs dates optimales ; de même, pour la fonction σ , on notera les sauts aJ_1 et aJ_2 aux dates θ_1 et θ_2 .

On aura ainsi :

$$\int_n^\infty s e^{-at} \cdot dt + \sum_i I_i e^{-ati} = 0$$

$$\int_n^\infty \sigma e^{-a\theta} \cdot d\theta + \sum_j J_j e^{-a\theta j} = 0$$

$$\int_n^\infty (s - \sigma) e^{-at} \cdot dt + \sum_i I_i e^{-ati} - \sum_j J_j e^{-a\theta j} = 0$$

et finalement

$$\int_n^\infty (C - \Gamma) e^{-at} \cdot dt + \sum_i I_i e^{-ati} - \sum_j J_j e^{-a\theta j} = \int_n^\infty (C - \Gamma)_n e^{-at} \cdot dt + \int_n^\infty \Delta \cdot e^{-at} \cdot dt$$

En prenant pour meilleure estimation du 2ème terme, la valeur 0, on voit que la différence des valeurs résiduelles peut être estimée par $(C - \Gamma)_n$ c'est à dire, par le quotient de la différence des coûts annuels à l'année n par le taux d'actualisation.

Cas particulier :

$d(C - \Gamma) = \alpha (C - \Gamma) \cdot dt$ avec α constant,
d'où $C - \Gamma = (C - \Gamma)_x \cdot e^{\alpha(t-x)}$, si x est l'époque du dernier investissement réalisé soit sur le réseau 1 soit sur le réseau 2.

$$\text{On déduit : } \Delta = (C - \Gamma)_x \left[e^{\alpha(t-x)} - 1 \right]$$

Si les investissements sont très nombreux et très rapprochés les uns des autres, on supposera $|t - x| < \epsilon$ pour ϵ assez petit.

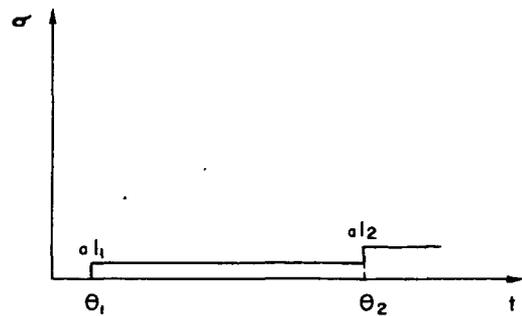
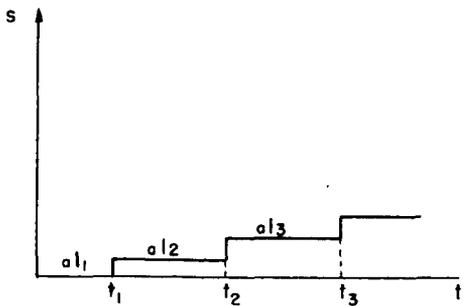
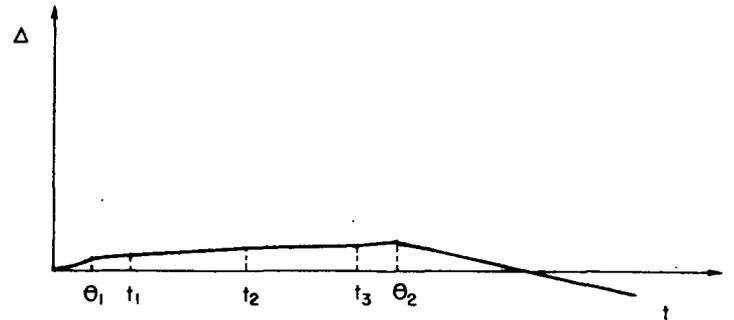
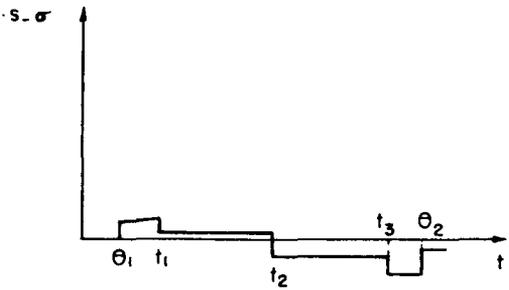
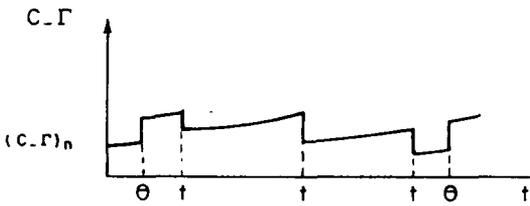
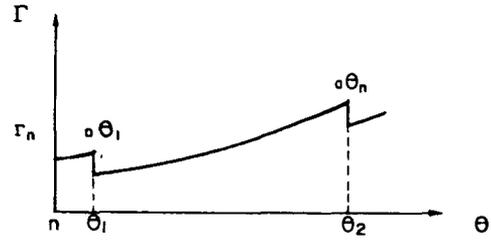
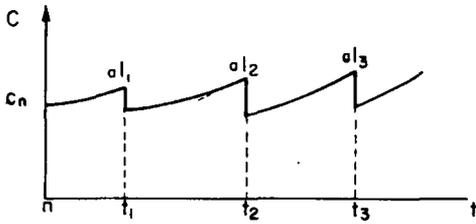
D'où

$$|\Delta| < 2 |C - \Gamma|_x \alpha \epsilon \text{ pour } \epsilon \text{ assez petit,}$$

$$\text{et } \left| \int \Delta e^{-at} . dt \right| < 2 \alpha \epsilon \int |C - \Gamma|_x . e^{-at} . dt$$

Si $|C - \Gamma|_x$ reste borné pour $\forall x$, on peut conclure que $\int \Delta . e^{-at} . dt$ peut être rendu aussi petit que l'on veut, pour ϵ assez petit. ⁿ

ESTIMATION DES VALEURS RESIDUELLES
 PAR LA METHODE DES COÛTS DE DERNIERE ANNEE



ANNEXE N° IX

Valeur résiduelle d'un investissement
à partir de sa valeur d'amortissement

1. Préliminaires

Dans le capital nécessaire à la réalisation d'investissements routiers, on distinguera deux postes assez différents :

A - L'appropriation pendant une certaine durée du terrain, ce qui du point de vue économique correspond aux phases suivantes :

- 1/ cessation d'un usage antérieur du sol et par conséquent suppression des rentes futures provenant de cet usage ou de nouveaux investissements dans cette même catégorie d'usage,
- 2/ mutation de l'ancien usage en un service de transport correspondant à des bénéfices récoltés par les usagers,
- 3/ obsolescence éventuelle dans un avenir lointain du nouvel usage avec possibilité d'utiliser le sol pour de nouveaux usages apportant de nouvelles rentes.

L'achat proprement dit du terrain apparaît alors comme un transfert de fonds qui ne présente d'intérêt économique que dans la mesure où il représente assez bien la valeur actualisée des avantages futurs.

B - Les investissements proprement techniques sur le sol occupé parmi lesquels l'on distinguera :

- 1/ les coûts de destruction des équipements anciens,
- 2/ les coûts de construction des équipements nouveaux.

2. Hypothèses fondamentales

On admettra dans ce qui suit deux hypothèses essentielles qui sont d'ailleurs liées :

- 1/ L'investissement routier présentera une obsolescence technique à un horizon N très lointain, très mal défini mais que l'on fixera d'avance, par exemple An 2 020. Cette obsolescence correspond : soit à des caractéristiques insuffisantes du tracé conduisant à son abandon, soit à l'usage de véhicules nouveaux différents des véhicules actuels et nécessitant des plates-formes spéciales ou pas de plate-forme du tout, (exemple : déplacements aériens).
- 2/ L'usage du sol sur le domaine public routier actuel ou pour les nouvelles opérations conduisant à des expropriations au profit du domaine public routier n'est pas remis en question jusqu'à l'horizon lointain N. Cela signifie que l'on suppose que les rentes collectives apportées par l'usage du sol au profit des usagers de la route sont supérieures à toutes autres rentes provenant d'un usage différent jusqu'à l'année N. A l'horizon N, le sol peut être soit réutilisé pour les routes soit aménagé pour un nouvel usage suivant l'intérêt de la collectivité. La valeur résiduelle du terrain à l'année N est donc en principe la somme actualisée des rentes pour le meilleur usage à partir de cette date.

3. Analyse des valeurs résiduelles

Le bilan actualisé d'une opération effectué à l'année x comportera :

- 1/ Les coûts d'investissement à l'année x auxquels sont ajoutées la valeur actualisée à l'année x de l'entretien et des réfections périodiques pour maintenir l'état initial de l'année x à l'année N, et les coûts collectifs dûs à la gêne supplémentaire lors des travaux, soit finalement un terme $I + \Delta I$

2/ L'avantage des usagers $\int_x^N b(t) \cdot e^{-at} \cdot dt$ entre l'année x et l'année N d'obsolescence diminuée de la rente $\int_x^N r(t) \cdot e^{-at} \cdot dt$ que pourrait apporter l'ancien usage du sol.

3/ La valeur de récupération du terrain à l'horizon N , compte tenu du fait que les équipements n'ont plus de valeur de service par suite de l'obsolescence technique. Si la valeur du terrain à l'année 0 peut être mesurée par la somme actualisée des rentes, nous aurons :

$$V(0) = \int_0^{\infty} r(t) \cdot e^{-at} \cdot dt$$

où $V(0)$ est la valeur de vente du terrain,
 $r(t)$ les rentes probables à l'année t pour l'usage envisagé,
 a le taux d'actualisation,
 t la variable temps.

Lorsque le terrain est utilisé pendant un certain temps pour la circulation, il en résulte une organisation ou une réorganisation de l'usage du terrain avoisinant de sorte qu'à l'année N , au moment où il devient récupérable, sa rente est devenue $r'(t)$ et la valeur résiduelle du terrain :

$$V(N) = \int_N^{\infty} r'(t) \cdot e^{-at} \cdot dt$$

Finalement, le bilan actualisé peut s'écrire :

$$B(x, N) = \int_x^N [b(t) - r(t)] e^{-at} \cdot dt - (I + \Delta I) e^{-ax} +$$

$$\int_N^{\infty} [r'(t) - r(t)] e^{-at} \cdot dt \quad (I)$$

L'année optimale pour réaliser l'opération est donnée par :

$$\frac{dB}{dx} = b(x) - r(x) - a(I + \Delta I) \cdot e^{-ax} = 0 \quad (2)$$

$$\text{soit } b(x) - r(x) = a(I + \Delta I)$$

sous réserve que le bilan soit positif, c'est à dire :

$$\int_x^N [b(t) - r(t)] e^{-at} \cdot dt + \int_N^\infty [r'(t) - r(t)] e^{-at} \cdot dt \geq (I + \Delta I) e^{-ax}$$

Si l'on convient que :

$$\int_N^\infty [r'(t) - r(t)] e^{-at} \cdot dt \neq 0$$

la condition s'écrit :

$$\int_x^N [b(t) - r(t)] e^{-at} \cdot dt \geq (I + \Delta I) e^{-ax}$$

4. Bilan sur une période réduite

Si l'on analyse maintenant le bilan sur une période réduite de 0 à n ou n est le nouvel horizon inférieur à N, on obtiendra lorsque l'investissement est réalisé entre 0 et n un bilan :

$$B^*(x, n) = \int_x^n [b(t) - r(t)] e^{-at} \cdot dt - (I + \Delta I) e^{-ax} + R(x, n) e^{-an} \quad (3)$$

où $R(x, n)$ est la valeur résiduelle à prendre en compte à l'année n.

Nous désirons que l'année optimale soit la même que celle obtenue par le bilan complet de 0 à ∞ et qu'elle soit obtenue par maximisation du bilan $B^*(x,n)$, soit :

$$\frac{\partial B^*(x,n)}{\partial x} = \left[b(x) - r(x) - i(I + \Delta I) + \frac{\partial R}{\partial x} e^{-i(n-x)} \right] \cdot e^{-ix} = 0 \quad (4)$$

En comparant 2 et 4, il vient

$$\frac{\partial R}{\partial x} = 0$$

ce qui signifie que R ne dépend pas de x.

Par ailleurs, si l'investissement est réalisé effectivement après l'horizon n, il n'intervient pas dans le bilan B^* . Autrement dit $B^*(x,n) = 0$ lorsque $x > n$.

Par continuité, nous devons donc avoir :

$$B^*(n,n) = 0$$

soit :

$$R(n) = I + \Delta I \quad (5)$$

Posons maintenant

$$\int_x^\infty r(t) \cdot e^{-at} \cdot dt = V(x) \cdot e^{-ax}$$

et

$$\int_n^\infty r(t) \cdot e^{-at} \cdot dt = V(n) \cdot e^{-an}$$

On obtient finalement :

$$B^*(x;n) = \int_x^n b(t) \cdot e^{-at} \cdot dt - \left[I + \Delta I + V(x) \right] \cdot e^{-ax} + \left[I + \Delta I + V(n) \right] \cdot e^{-an}$$

(6)

où $V(x)$ et $V(n)$ sont les valeurs du sol aux années x et n dans le cas du premier usage qu'il en est fait. Tout se passe alors, comme si le capital dépensé à l'année x en achat du terrain, équipement et provisions pour entretien était récupérable à l'année n avec une valeur de vente du terrain égale à sa valeur à l'année n suivant son premier usage. Le bilan réduit peut encore s'écrire, en faisant apparaître la rente annuelle :

$$B^*(x,n) = \int_x^n [b(t) - r(t)] e^{-at} . dt - [I + \Delta I] e^{-ax} + [I + \Delta I] e^{-an} \quad (7)$$

Dans ce cas, il faut déduire du bénéfice des usagers la rente des équipements initiaux et les coûts d'investissement ne comprennent plus que le coût des nouveaux équipements à l'exclusion des valeurs d'achat ou de vente du terrain. La valeur résiduelle est constante et égale au montant de ces équipements, soit : $I + \Delta I$.

5. Calcul du terme ΔI

On suppose que le niveau de service d'un investissement I est maintenu à sa valeur initiale par des investissements successifs J d'entretien et de refaction réalisés à des fréquences connues. L'époque x à laquelle est réalisé l'investissement I jusqu'à l'horizon ∞ est la somme actualisée des investissements J est :

$$\sum_{y=x}^{\infty} J(y) \cdot e^{-ay} = \left[\sum_{\alpha=0}^{\infty} J(x+\alpha) e^{-a\alpha} \right] e^{-ax} = Ke^{-ax}$$

où K est une constante ne dépendant que du type d'investissement et du taux d'actualisation a .

On cherche maintenant quel est l'investissement continu constant $j dt$, équivalent à l'ensemble des investissements périodiques J :

$$\int_x^{\infty} j e^{-at} . dt = j \frac{e^{-ix}}{i} = Ke^{-ax}$$

où $j = aK$

Pour maintenir constant le niveau de service de l'investissement I jusqu'à un horizon fini n , il est alors nécessaire de faire l'investissement continu j dt de l'époque x à l'horizon n , ce qui correspond à un capital actualisé :

$$e^{-an} \Delta I = j \int_x^n e^{-at} dt = j \frac{e^{-ax} - e^{-an}}{i} = Ke^{-an} \left[1 - e^{-a(n-x)} \right]$$

Maintenant, à condition de mobiliser au départ un investissement, $I + \Delta I$, le niveau de service correspondant à l'investissement I et pour maintenir ce niveau jusqu'à l'horizon n est :

$$\begin{aligned} (I + \Delta I) e^{-ax} - I e^{-an} &= \left\{ I + K \left[1 - e^{-a(n-x)} \right] \right\} e^{-ax} - I e^{-an} \\ &= (I + K) (e^{-ax} - e^{-an}) \end{aligned}$$

En conclusion, tout se passe comme si un investissement $I + K$ était nécessaire à l'année x au lieu de I seulement et que cet investissement ne perdait pas de sa valeur jusqu'à l'horizon n .

Comme application numérique, on considèrera une durée de vie $A = 40$ ans ; $a = 8$ %.

Tout revient à concevoir un investissement non amortissable $I + K$ avec $K = I e^{-aA} + I e^{-2aA} + \dots = I e^{-aA} \frac{1}{1 - e^{-aA}}$

$$\text{soit } I + K = I \left[1 + \frac{e^{-aA}}{1 - e^{-aA}} \right] = \frac{1}{1 - e^{-aA}}$$

$$I + K = \frac{I}{1 - 0,073} \approx 1,08 I$$

soit une majoration de I de 8 % environ.

6. Fonction de récupération

On peut encore aborder le problème de la valeur de récupération d'une autre manière en supposant qu'un investissement de valeur initiale I lors de sa réalisation à l'année x a une valeur de récupération qui est une fonction de son âge seul, soit $I \times f(y)$.

A l'année n , fin de la période d'études et dernière année sur laquelle porte le bilan actualisé des coûts collectifs, la valeur de récupération de l'investissement est :

$$I \times f(n - x)$$

Actualisée à l'année 0, cette valeur devient :

$$I \times f(n - x) e^{-an}$$

Lorsque l'on déplace la date de réalisation x de l'investissement de dx , la variation de la valeur résiduelle actualisée est :

$$I \times \frac{d}{dx} \left[f(n - x) e^{-an} \right] dx$$

Si l'on veut que cette variation soit indépendante de n , on doit avoir :

$$\frac{d}{dn} \left[\frac{d}{dx} \left[f(n - x) e^{-an} \right] \right] = 0$$

ou

$$\frac{d}{dx} \left[f(n - x) e^{-an} \right] = g(x)$$

$$f(n - x) e^{-an} = G(x) + G_0(n)$$

avec :

140.

$$f(0) = 1$$

$$f(A) = 0 \quad \text{où } A \text{ est la durée de vie de l'investissement}$$

d'où

$$e^{-in} = G(n) + G_0(n)$$

$$0 = G(n - A) + G_0(n)$$

$$f(n - x) = e^{an} \left[G(x) - G(n) \right] + 1$$

$$f(y) = e^{an} \left[G(n - y) - G(n) \right] + 1$$

Le terme de droite doit être indépendant de n ainsi que sa dérivée :

$$e^{an} \left[a(G(n - y) - G(n)) + G'(n - y) - G'(n) \right] = 0$$

d'où pour $n = y$

$$a \left[G(0) - G(y) \right] + G'(0) - G'(y) = 0$$

$$G'(y) + aG(y) = G'(0) + aG(0) = \text{Cte}$$

Cette équation différentielle a pour solution générale :

$$G(y) = \lambda e^{-ay} + \mu$$

d'où

$$\begin{aligned} f(y) &= e^{an} \left[\lambda e^{-a(n-y)} - \lambda e^{-an} \right] + 1 \\ &= \lambda (e^{ay} - 1) + 1 \end{aligned}$$

$$f(A) = \lambda (e^{aA} - 1) + 1 = 0$$

$$f(y) = 1 - \frac{e^{ay} - 1}{e^{aA} - 1}$$

La valeur de récupération de l'investissement I doit avoir la forme suivante

$$R(x, n) = I e^{-an} \left[1 - \frac{e^{ay} - 1}{e^{aA} - 1} \right] = I \frac{e^{aA} - e^{a(n-x)}}{e^{aA} - 1} \times e^{-an}$$

ANNEXE N° X

Réaffectation Partielle

Le déplacement d'un investissement sur un tronçon d'une période à la précédente ou à la suivante entraîne une variation des coûts des usagers donc une affectation différente sur le réseau ainsi modifié, et par suite une variation des coûts collectifs.

Ainsi qu'il est indiqué dans le corps du rapport (§ 3.2.3.3.), il est apparu nécessaire d'employer des méthodes approchées pour évaluer cette variation du bilan des coûts, tout au moins lorsque le déplacement d'investissement envisagé ne constitue pas une suppression ou une création d'un tronçon.

La longueur des calculs nécessaires pour réaliser une affectation complète des trafics sur le réseau provient du fait qu'à chaque itération il faut déterminer le chemin minimum (en distance, temps ou coût) entre tous les couples de centroïdes origine et destination.

Si le réseau comprend n centroïdes, donc n^2 couples, il faut construire successivement n "arbres minimum" chacun ayant pour origine ou racine l'un des centroïdes à partir duquel on peut atteindre en suivant les diverses branches de l'arbre les $n - 1$ autres centroïdes par un chemin unique. Une telle opération, bien que réalisée sur ordinateur au moyen d'algorithmes très efficaces comme celui de Moore, finit par demander un temps non négligeable si elle est répétée un grand nombre de fois.

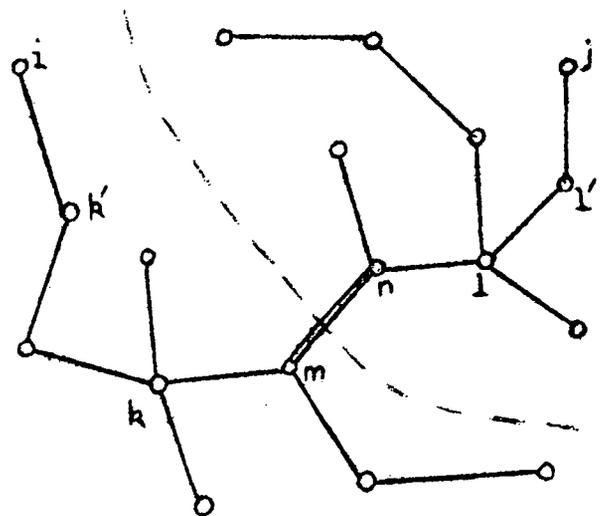
Aussi a-t-il paru intéressant, dans le cadre de l'étude des Pénétrantes Urbaines, d'employer une méthode simplifiée pour évaluer la réaffectation des trafics consécutive à une modification du réseau. Cette méthode est basée sur un algorithme dû à Monsieur Peter S. Loubal (1).

Le problème est le suivant :

Considérons un réseau sur lequel ont été affectés par une méthode quelconque des trafics QOD_{ij} entre origines et destinations, de telle sorte que le temps de parcours (ou coût) est $TOD_{ij}(I,J)$ du centroïde i au centroïde j , et T_{kl} sur l'arc kl .

$$TOD_{ij} = T_{ik} + \dots + T_{lj}$$

Supposons qu'on modifie un tronçon mn du réseau, réduisant son temps de parcours de T_{mn} à $T'_{mn} < T_{mn}$. Il est possible de déterminer s'il existe un itinéraire comprenant le tronçon mn et joignant deux centroïdes quelconques du réseau, et dans l'affirmative de calculer le temps de parcours sur cet itinéraire. Il suffit pour cela de construire l'"arbre minimum" unique ayant pour origine l'une ou l'autre des extrémités m ou n du tronçon modifié. Les deux branches de cet arbre minimum constituent ainsi une partition de l'ensemble des noeuds du réseau. Il existe alors un itinéraire -comprenant mn - du centroïde i au centroïde j si, et seulement si i et j se trouvent sur deux branches de cet arbre situées respectivement de part et d'autre du tronçon mn . Le temps de parcours de i à j sur cet



(1) Peter S. Loubal - A network Evaluation
procédure - August 1966
Bay Area Transportation Study Commission

itinéraire est alors :

$$TOD'_{ij} = T_{ik} + \dots + T_{km} + T'_{mn} + T_{nl} + \dots + T_{lj}$$

Lorsque les temps de parcours T_{ij} sur chaque tronçon sont supposés indépendants des trafics, le problème est immédiatement résolu. La différence $TOD'_{ij} - TOD_{ij}$ mesure en effet, si elle est positive, l'avantage apporté par la modification sur le trajet ij .

Si au contraire, comme dans notre cas, les temps de parcours et les coûts des usagers dépendent du trafic, le report sur le nouvel itinéraire $i, k, \dots m, n, \dots l', j$ d'une fraction du trafic QOD_{ij} prélevée sur les itinéraires anciennement chargés va modifier les temps de parcours sur chaque tronçon du réseau. On peut démontrer que la variation résultante du bilan des usagers est de la forme suivante :

$$\Delta C = (C'_{mn} - C_{mn}) Q_{mn} + \sum_{kl} (C_{kl} + Q_{kl} \frac{dC_{kl}}{dQ}) dQ_{kl}$$

où mn est le tronçon modifié

Q_{kl} , est le trafic initialement affecté au tronçon kl

$C_{kl}(Q_{kl})$ est le coût sur kl correspondant au trafic Q_{kl}

$\frac{dC_{kl}}{dQ}$ est la dérivée de cette fonction

dQ_{kl} est la variation globale de trafic sur kl , résultant de la réaffectation.

Dans l'application qui a été faite de cette méthode au réseau routier Paris-Pontoise, la fraction β du trafic QOD_{ij} à réaffecter était déterminée en fonction du rapport $\frac{TOD'_{ij}}{TOD_{ij}}$ d'après le tableau suivant :

$\frac{TOD'}{TOD}$	β
$\geq 1,2$	0
$1,05 \leq < 1,2$	0,05
$0,95 \leq < 1,05$	0,10
$0,8 \leq < 0,95$	0,15
$0,6 \leq < 0,8$	0,20
$< 0,6$	0,30

Sur chaque itinéraire initialement chargé d'une fraction α de QOD était prélevé $\beta \times (\alpha \times QOD_{ij})$

Il semble d'ores et déjà que les valeurs à retenir pour les coefficients β doivent être relativement faibles, surtout si le nombre de couples origine-destination est élevé. D'autre part, la détermination a priori de ces coefficients devient difficile pour des réseaux proches de la saturation et la méthode proposée ci-dessus doit alors être appliquée avec précaution.

Dans le cas de réseaux non saturés - et plus encore si les temps de parcours et les coûts sont indépendants des débits - l'utilisation de cette méthode permet d'obtenir des résultats satisfaisants tout en réduisant de façon importante les temps de calcul.