



ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE
DÉPARTEMENT DE GÉNIE CIVIL

TRANSPORT I

Prof. Ph. H. Bovy

Note de cours F
LA DEMANDE DE TRANSPORT

Dr Pan. Tzieropoulos

2814

Janvier 1985



INSTITUT DES TRANSPORTS ET DE PLANIFICATION
Transport et aménagement de l'espace GC 1015 - Lausanne

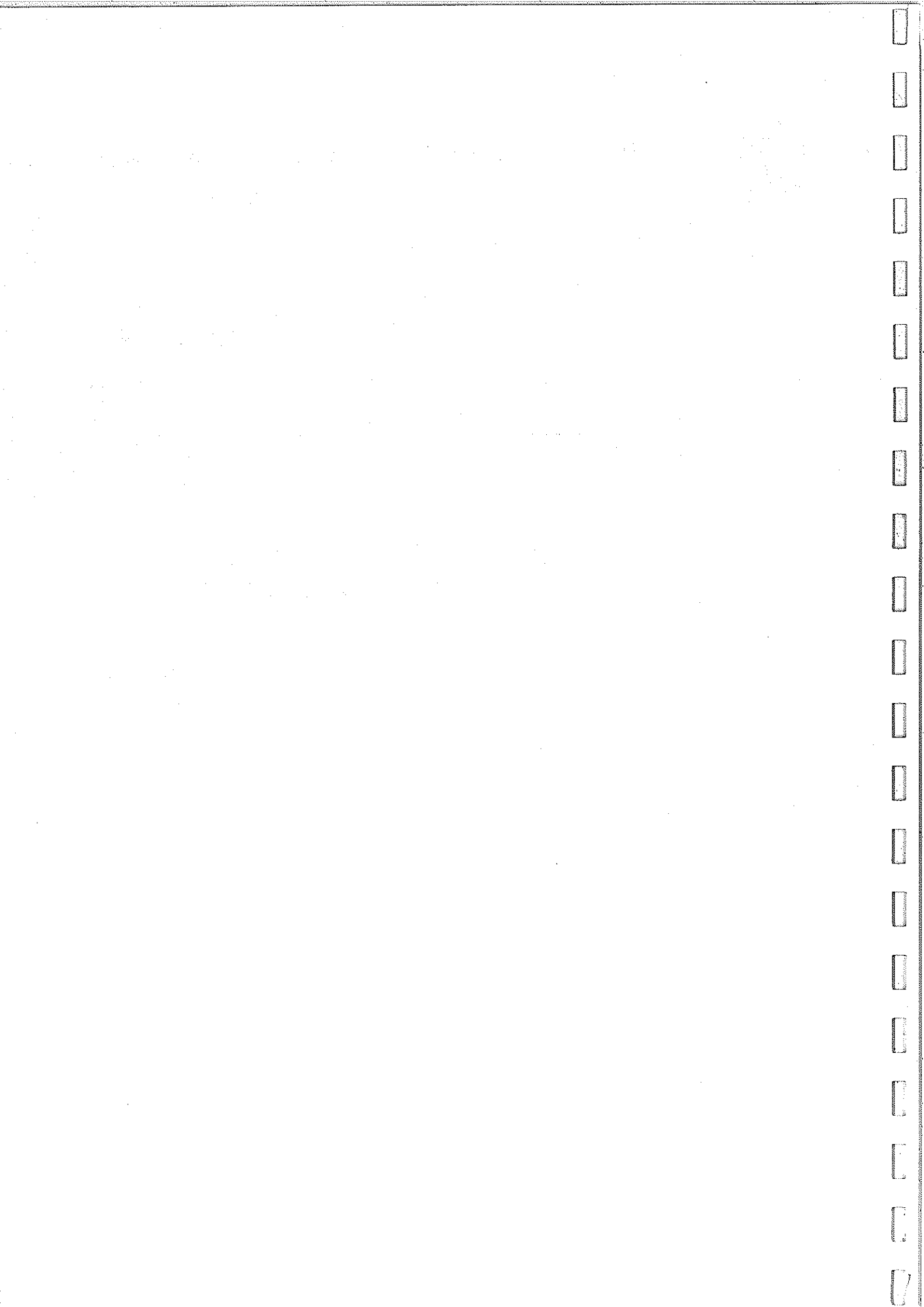


TABLE DES MATIERES

I QUELQUES NOTIONS ELEMENTAIRES D'ECONOMIE

1. Demande, offre et équilibre

II LA NOTION DE LA DEMANDE DANS LE CAS DES TRANSPORTS

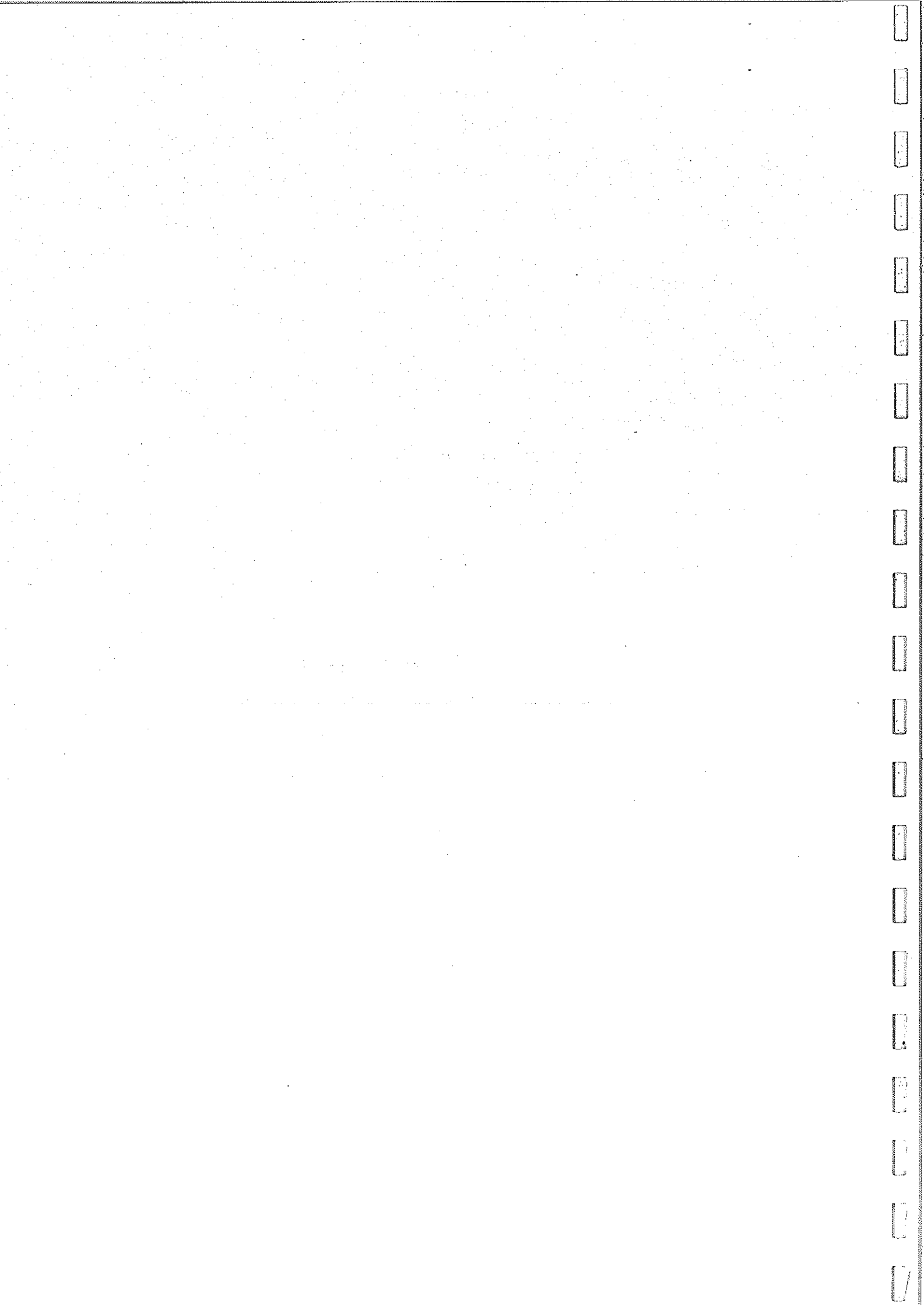
1. Une transposition simple
2. Une formalisation plus précise
3. Mesures et leur définition
4. Les variables
5. Rôle des études de demande de transport

III DESCRIPTION DE LA DEMANDE

1. La demande de transport : une demande dérivée
2. Transports de personnes : dimensions d'un déplacement
3. Champ géographique de l'étude et son découpage
4. Mesures et modes de représentation de la demande

IV MODELES D'ANALYSE ET DE PREVISION DE LA DEMANDE

1. Généralités
2. Les modèles dits "conventionnels"
3. Les modèles désagrégés
4. Les modèles directs ou simultanés
5. Types de modèles de demande



I QUELQUES NOTIONS ELEMENTAIRES D'ECONOMIE ¹⁾

1. DEMANDE, OFFRE ET EQUILIBRE

Les termes demande, offre, équilibre, ont été empruntés par les transports à l'économie. Leur apparition coïncide d'ailleurs avec l'intervention, dans les transports, de spécialistes de formation essentiellement économique : économistes, économétriciens, gestionnaires. Leur apport dans ce domaine a permis de formaliser l'analyse et d'introduire dans le "jargon" des transports certaines notions issues de la terminologie économique.

La quantité d'une marchandise que les gens désirent acheter dépend de son prix unitaire. A un prix élevé correspond une demande modeste et inversement. A chaque moment, il existe une relation déterminée entre le prix possible d'une marchandise et la quantité demandée de cette marchandise. Cette relation est la **fonction de demande** (fig. 1.1). La notion de demande correspond donc de manière générale à une fonction et doit toujours être interprétée en tant que telle, à moins qu'elle ne soit spécifiée différemment de manière explicite.

La fonction de la demande d'un produit donné, dans un marché donné et à un moment donné est, à part quelques exceptions très rares, une fonction décroissante du prix. Une baisse de prix entraîne en effet généralement

- une augmentation du nombre de clients (nouvelle clientèle)
- une augmentation de la consommation moyenne par client (clientèle acquise).

La demande à prix nul (qui correspond dans le graphique de la fonction à l'intersection de la courbe avec l'axe des quantités) est appelée **besoin**. Le besoin est ainsi la quantité qui serait demandée dans l'hypothèse où le client n'aurait aucun prix à payer; il correspond à la quantité la plus grande susceptible d'être demandée. Il s'agit d'une valeur finie.

Le prix à partir duquel aucun client ne demande une seule quantité d'un bien économique (correspondant à l'intersection de la courbe avec l'axe des prix) est appelé **prix prohibitif**. C'est le prix qui découragerait le client le plus riche et le plus avide d'acheter le bien en question. Il s'agit aussi d'une valeur finie.

L'analyse de la satisfaction du besoin n'est pas du domaine de l'économie. Ou bien le besoin porte sur un bien libre, disponible gratuitement (par exemple le soleil, par beau temps) et dans ce cas il ne s'agit pas d'un bien économique. Ou bien le besoin concerne un bien économique qui, par définition, étant produit, n'est disponible qu'en quantité limitée et jamais gratuitement. L'économie traite donc de la satisfaction de demandes à des prix non nuls.

¹⁾ Ce paragraphe est largement inspiré du cours du prof. J.P. Baumgartner "Choix économiques : prévisions économiques", ITEP-EPFL, 1974

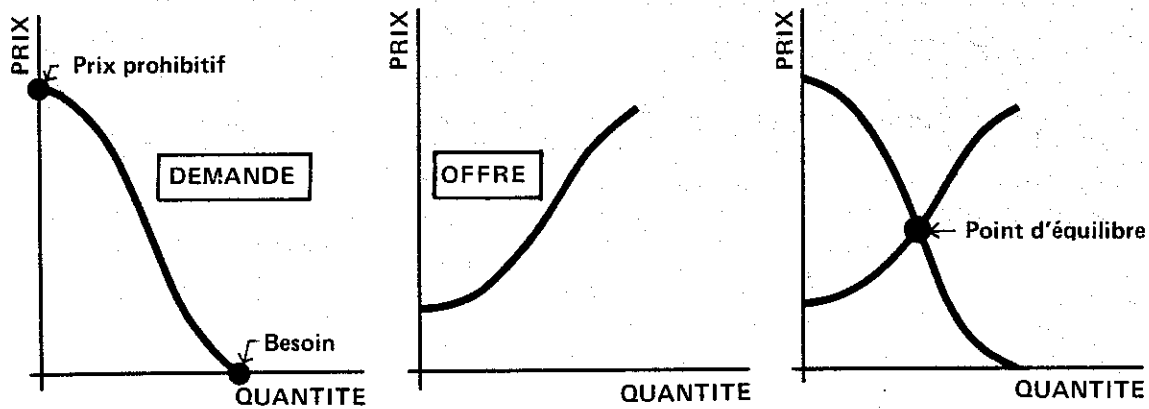


Figure 1.1 - Fonctions de demande, d'offre et point d'équilibre

On associe souvent à une demande donnée son **élasticité**. L'élasticité est par définition la **variation relative de la demande** observée lors d'une **variation relative unitaire du prix**. En clair :

soient x le prix unitaire d'un bien

$y = f(x)$ la fonction de la demande

$e(y_0)$ l'élasticité de la demande lorsque $y = y_0 = f(x_0)$

$$\text{par définition} \quad e(y_0) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\frac{\Delta y}{y_0}}{\frac{\Delta x}{x_0}} = \frac{x_0}{y_0} \cdot \frac{dy}{dx} = \frac{x_0}{y_0} \cdot \frac{df}{dx} / x = x_0$$

et de manière générale

$$e(y) = \frac{x}{y} \cdot \frac{dy}{dx}$$

Or, dy/dx est la dérivée de la fonction de la demande et l'élasticité, au même titre que la dérivée, est une mesure de la décroissance de la fonction. Si, en économie, l'élasticité est souvent préférée à la dérivée d'une fonction, cela tient de ce que :

- intuitivement, l'élasticité représente la modification en pourcent de la demande lors de la modification du prix d'un pourcent (1%); il s'agit par conséquent d'une notion facile à appréhender par le praticien;
- si la fonction est une fonction puissance, l'élasticité -à l'opposé de la dérivée- est une valeur constante

$$\text{si } y = bx^c \quad \text{alors} \quad e(y) = c$$

Or, il a été usuellement admis - et pour des raisons qui n'ont pas forcément trait à l'allure réelle des fonctions ! - que les fonctions de demande et d'offre sont des fonctions puissance.

On dira ainsi qu'une demande est très élastique lorsque la valeur absolue de l'élasticité est élevée, ce qui correspond à une fonction fortement décroissante, c'est-à-dire à une demande très sensible au prix. A l'inverse, une demande inélastique, correspondant à des valeurs d'élasticité proches de zéro, est une demande peu sensible aux modifications de prix; la courbe de la demande s'approcherait, dans ce cas, d'une droite verticale dans la figure 1.1.

La **fonction de l'offre** exprime la relation entre le prix unitaire possible d'une marchandise et la quantité de cette marchandise que les producteurs sont disposés à fournir à un moment donné. Il s'agit généralement d'une fonction croissante (fig. 1.1).

La confrontation des fonctions de demande et d'offre dans un marché donné aboutit à la détermination du **point d'équilibre**. Ce point correspond à la quantité demandée qui est égale spontanément à la quantité offerte et ceci pour un prix appelé prix d'équilibre.

Le terme "à un moment donné" intervient dans l'ensemble des définitions présentées ci-dessus. Son rôle est de souligner qu'il s'agit de fonctions établies pour une situation, une époque, une structure du marché données. Si cette situation venait à changer, d'autres fonctions de demande ou (et) d'offre devraient être prises en considération. L'exemple suivant illustrera ces modifications.

Supposons, par exemple, une élévation du pouvoir d'achat des consommateurs. Celle-ci provoquera un décalage de la courbe de la demande : un nouveau point d'équilibre s'établira, correspondant à une consommation accrue du bien économique à un prix d'équilibre plus élevé (fig. 1.2).

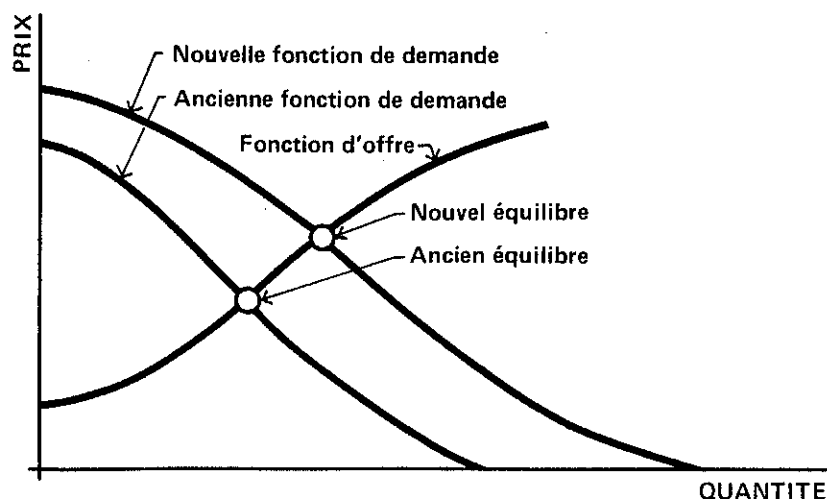


Figure 1.2 Effet sur le point d'équilibre d'une augmentation du pouvoir d'achat

Une amélioration des procédés de fabrication peut entraîner un décalage de la courbe de l'offre : le nouveau point d'équilibre correspondra à une consommation accrue du bien à un prix unitaire inférieur (fig. 1.3) :

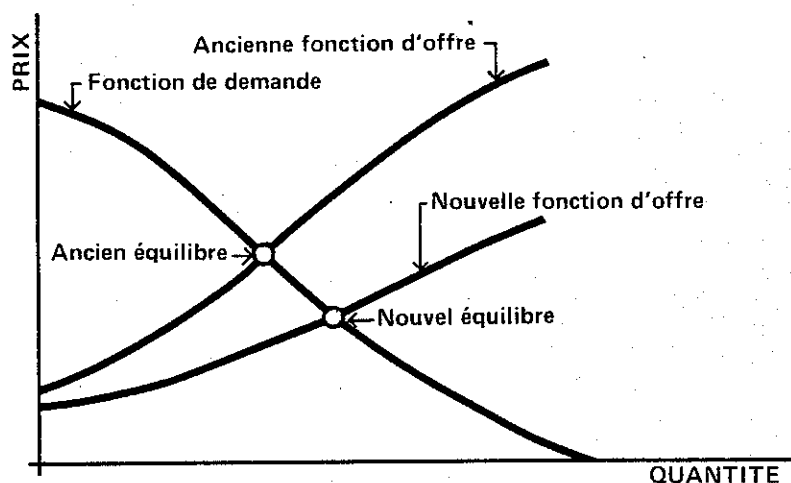


Fig. 1.3
Effet sur le point d'équilibre d'une amélioration des procédés de fabrication

Les relations élémentaires de formation de la demande et des prix qui viennent d'être présentées répondent à des mécanismes très schématiques. Leur validité est tributaire de l'acceptation et du bien-fondé de nombreuses hypothèses qui décrivent ce qu'il est d'usage d'appeler un **marché parfait** ou un régime de concurrence parfaite. Parmi les plus importantes, il y a lieu de citer les hypothèses suivantes :

- le bien économique à échanger est homogène et divisible à l'infini
- le nombre de clients et de producteurs est très élevé et aucun n'est suffisamment puissant pour pouvoir imposer des distorsions dans le marché
- il n'y a pas d'ententes entre clients ou entre producteurs susceptibles de créer de telles distorsions
- il y a une information parfaite sur les conditions du marché, les prix
- les décisions s'opèrent de manière rationnelle et en l'absence de toute contrainte.

Ces hypothèses n'étant jamais vérifiées dans la vie réelle, on se trouve toujours en présence d'une concurrence imparfaite. Ces mécanismes ne sont donc que partiellement valables et c'est à l'analyste de déterminer les distorsions susceptibles d'exister dans chaque cas.

II LA NOTION DE LA DEMANDE DANS LE CAS DES TRANSPORTS

1. UNE TRANSPOSITION SIMPLE

En fait, les transports constituent une activité économique à part entière. Cette activité est orientée vers la production non pas de biens matériels mais de prestations, de services. Le produit qu'une entreprise de transports propose dans le marché, en d'autres termes l'offre de transports, est une certaine capacité de transporter d'un lieu à un autre une certaine quantité de personnes ou de marchandises. Cette offre s'exprime, par exemple, sur une liaison, en termes de places assises par heure pour un train, de sièges par jour ou par an pour une entreprise ferroviaire.

Cette offre de transports est proposée à un marché demandeur de prestations de transport. Les personnes utilisant des services de transport (les usagers), les entreprises industrielles ou commerciales désirant transporter des produits du lieu de leur production aux lieux de distribution ou de vente, etc, constituent la clientèle, les consommateurs de ces prestations.

Dans le cas d'entreprises de transports intégrées, telles que les compagnies ferroviaires ou de transports urbains collectifs, telles que les entreprises de transport routier de marchandises, il est assez facile de reconstituer le schéma classique d'un marché économique. D'un côté il y a des producteurs de prestations qui proposent au marché des services : ce sont les entreprises de transport. De l'autre côté il y a les consommateurs de ces services, les clients. D'un côté il y a une offre de certaines prestations, de l'autre une demande pour ces prestations. Cette offre, confrontée à la demande, aboutit à l'instauration d'un équilibre dans le marché, équilibre qui, à son tour, détermine les prix. On retrouve donc dans ce contexte le mécanisme fondamental : offre, demande, équilibre.

Par extension, il est possible d'admettre qu'un mécanisme analogue est valable pour le cas des transports individuels. Les réseaux routiers, leur équipement constituent une offre de transport dans le sens large : ils assurent les conditions nécessaires pour qu'un déplacement puisse avoir lieu d'un endroit à un autre. De l'ensemble des habitants résidant dans la région desservie par un réseau, de leurs activités économiques, naît une demande de transport. Cette demande, confrontée aux capacités de transport offertes par la voirie, se concrétise en un certain nombre de déplacements effectivement réalisés.

Ces déplacements sont en fait la seule partie observable de la confrontation de l'offre et de la demande dans le cas des transports individuels. C'est ainsi qu'on retrouve dans ce cas aussi un mécanisme comparable au schéma élémentaire offre, demande, performances.

2. UNE FORMALISATION PLUS PRECISE

Une demande de transport apparaît lorsque la plus-value entraînée par la présence d'un objet déterminé (quantité de marchandises, personne ou groupe de personnes) à un lieu précis et à un moment donné est supérieure au coût qu'engendrerait son transport. En raison du profit attendu, déduit par une estimation différentielle de la valeur de cet

objet au départ et d'un objet comparable à l'arrivée, une demande potentielle de transport se forme. Cette demande, confrontée aux possibilités de transport offertes par l'organisation du milieu, donne éventuellement naissance à une opération de transport. De ce mécanisme de formation de la demande, un observateur extérieur ne peut mesurer que les opérations de transport effectivement réalisées. Il observe donc un certain nombre de points d'équilibre mais pas les fonctions proprement dites ! L'établissement des fonctions est le travail de l'analyste : il ne peut être exclusivement fondé sur l'observation directe (et par conséquent sur la statistique descriptive) et doit être précédé d'une formalisation théorique préalable des relations et avoir recours à la statistique d'inférence. C'est par l'établissement de modèles théoriques et par leur validation que l'analyse peut avancer. On retrouve ainsi les notions de base de la modélisation : formalisation, estimation, validation du modèle.

Une opération de transport implique des dépenses de ressources :

- ressources en **temps**, importantes surtout dans le transport de personnes, pour lesquelles la gestion du temps peut être comparée à la gestion du budget; la quantité disponible en est limitée, l'emprunt n'est pas toujours envisageable ou réalisable;
- ressources monétaires, en **argent**, servant à couvrir les frais du transport.

Il est ainsi nécessaire de remplacer le prix unitaire intervenant dans la fonction de la demande par une mesure plus complexe qui tient compte de ces deux types de dépense. Pour des raisons de commodité, afin d'éviter la nécessité de formuler des fonctions de demande distinctes pour des services de transport concurrents, cette mesure peut également tenir compte de certaines conditions sous lesquelles le transport s'effectue et qui peuvent s'exprimer en équivalents monétaires; il s'agit par exemple du confort, de la sécurité potentielle du transport, etc.

On arrive donc à remplacer, dans les relations de base de la demande et de l'offre, le prix unitaire par une mesure globale appelée, selon les différentes écoles :

- coût généralisé (quelquefois temps généralisé)
- niveau (ou qualité) de service
- désutilité (ou utilité, algébriquement toujours négative dans ce cas).

Dans le cas du transport de personnes, cette mesure est une fonction :

- du coût monétaire engendré par le transport
- du temps consacré au déplacement
- des conditions de sécurité, de confort au sens large, exprimées en équivalence monétaire.

Il en résulte une première représentation du mécanisme d'équilibre, devenue désormais classique en transports :

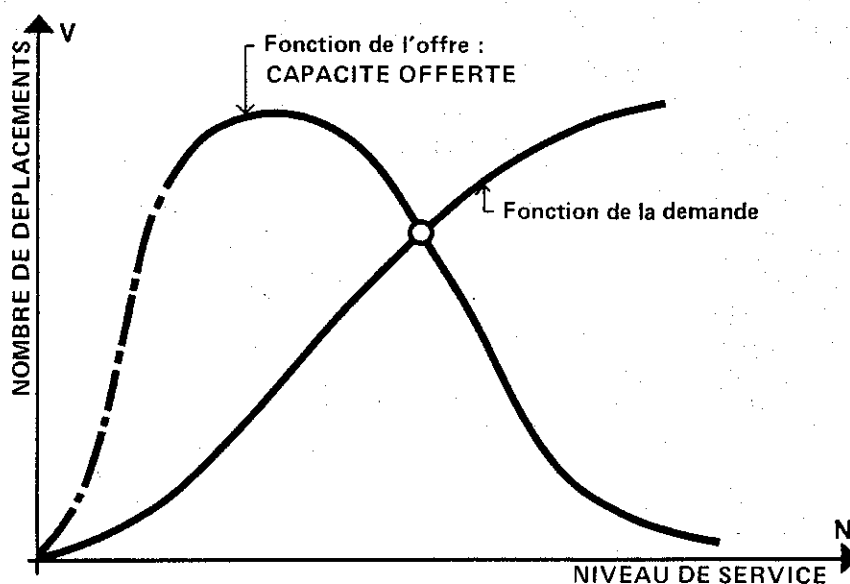


Figure 2.4 - Relations entre l'offre, la demande et le niveau de service

Dans ce cadre conceptuel, l'équilibre serait déterminé par le système :

$$\text{Fonction de demande} \quad V = f_1 (A, N)$$

$$\text{Fonction d'offre} \quad N = f_2 (T, V)$$

avec

V volume de déplacements

A volume d'activités engendrant des transports

N niveau de service

T système des transports

Il est facile au spécialiste des transports routiers de reconnaître la correspondance entre la "fonction d'offre" et les relations classiques débit/vitesse bien connues de la théorie des flots de véhicules.

3. MESURES ET LEUR DEFINITION

La demande de transport est mesurée en termes de **flux transportés par unité de temps**. En première approximation, ces flux représentent des quantités transportées et sont ainsi dépendants de l'objet du transport. Certaines unités de base élémentaires seraient donc :

- des voyageurs par heure, jour, année,
- des tonnes d'une marchandise donnée par jour, par mois, etc.

Si ces unités ne comportent par d'ambiguïté dans les cas de transport simple, du type linéaire, entre une origine et une destination données, il en est tout autrement lorsque la structure spatiale du transport est diversifiée. Lorsque l'offre de transport couvre plusieurs origines et plusieurs destinations possibles, lorsque plusieurs itinéraires assurent une même liaison origine-destination, il est nécessaire de tenir compte de la longueur du transport dans l'unité de mesure. Dans ces cas, de loin les plus courants, l'utilisation d'unités de mesure plus complexes doit en général être envisagée; la demande sera mesurée en :

- voyageurs.kilomètres par unité de temps
- tonnes.kilomètres par unité de temps.

De telles unités de mesure sont largement utilisées dans des approches macro-économiques. Elles permettent d'avoir une quantification globale des **prestations de trafic** qu'il est par la suite possible de comparer aux **prestations d'exploitation**, mesurées en termes de places.kilomètres offertes, par exemple.

Or, en transports, plusieurs grandeurs ne sont pas linéaires et, quelquefois, on assiste à des phénomènes de discontinuité. (Il en est ainsi, par exemple, des tarifs unitaires qui peuvent être dégressifs et de manière discontinue en fonction de la distance du transport.) L'étude de certains aspects de la demande obligera donc à avoir recours à des mesures plus fines, plus précises, plus désagrégées. Une demande mensuelle d'un million de voyageurs.kilomètres a une toute autre consistance lorsqu'il s'agit d'un réseau métropolitain que lorsqu'il s'agit d'un réseau de transports interurbains :

$$1'000'000 \text{ voyageurs.kilomètres} = 500'000 \text{ voyageurs} \times 2 \text{ km}$$

mais aussi

$$1'000'000 \text{ voyageurs.kilomètres} = 2'000 \text{ voyageurs} \times 500 \text{ km}$$

Il est clair dans cet exemple que les appareils de production nécessaires à absorber ces deux demandes, toutes deux de 1'000'000 voyageurs.kilomètres, sont très différents d'un cas à l'autre. Cependant, plusieurs entreprises offrent simultanément les deux genres de prestations mentionnées ci-dessus. Une mesure globale de la demande en voyageurs.kilomètres risque, dans de tels cas, d'être singulièrement lacunaire.

En résumant, des mesures de demande plus fines, affectant à l'indicateur global de voyageurs.kilomètres d'autres grandeurs telles que la longueur moyenne des déplacements ou, mieux, la distribution de cette longueur, peuvent s'avérer nécessaires à cause :

- de la non-linéarité de la tarification
- d'une offre de prestations très diversifiée de la part de l'entreprise
- de la discontinuité de la fonction de l'offre, discontinuité dont il sera question ultérieurement
- etc.

Des problèmes de mesure analogues surgissent quand il s'agit de définir l'unité de temps. Un débit horaire n'a de sens que s'il est précisé à quel moment de la journée la mesure a été faite : s'agit-il d'une heure de pointe, d'une heure creuse, de quelle période de pointe, etc. Ces difficultés peuvent en partie être levées par le relevé de variations dans le temps de ce débit : variations horaires dans la journée, journalières dans l'année, etc.

Mais ceci ne se fait qu'au prix de deux inconvénients :

- un coût de mesure extrêmement élevé, dû à la mise sur pied de procédés de mesure opérationnels sur des intervalles de temps importants
- l'influence sur le résultat du pas de mesure adopté; trop grossier, il ne permettra pas d'appréhender des pointes de débit très "locales"; trop fin, il augmentera de manière disproportionnée le coût de la mesure et risquera de fausser les résultats en accentuant l'effet structurant de l'offre actuelle sur la demande mesurée; ce problème est d'autant plus important dans le cas des transports collectifs où la discontinuité de l'offre dans le temps est relativement marquée (fig. 2.2).

D'autres distorsions peuvent également fausser les résultats ou rendre deux mesures de la même grandeur incomparables. Deux exemples seront cités : celui de la conversion des abonnements en voyageurs.kilomètres et celui des chaînes de déplacement.

Il est d'usage, pour autant que la comptabilité de l'entreprise le permette, d'utiliser les titres de transport émis pour évaluer la demande. Si la conversion des billets en déplacements ne pose pas d'autres problèmes que celui de la détermination du moment du déplacement, la conversion des abonnements en nombre de déplacements réellement effectués ouvre la porte à un large arbitraire.

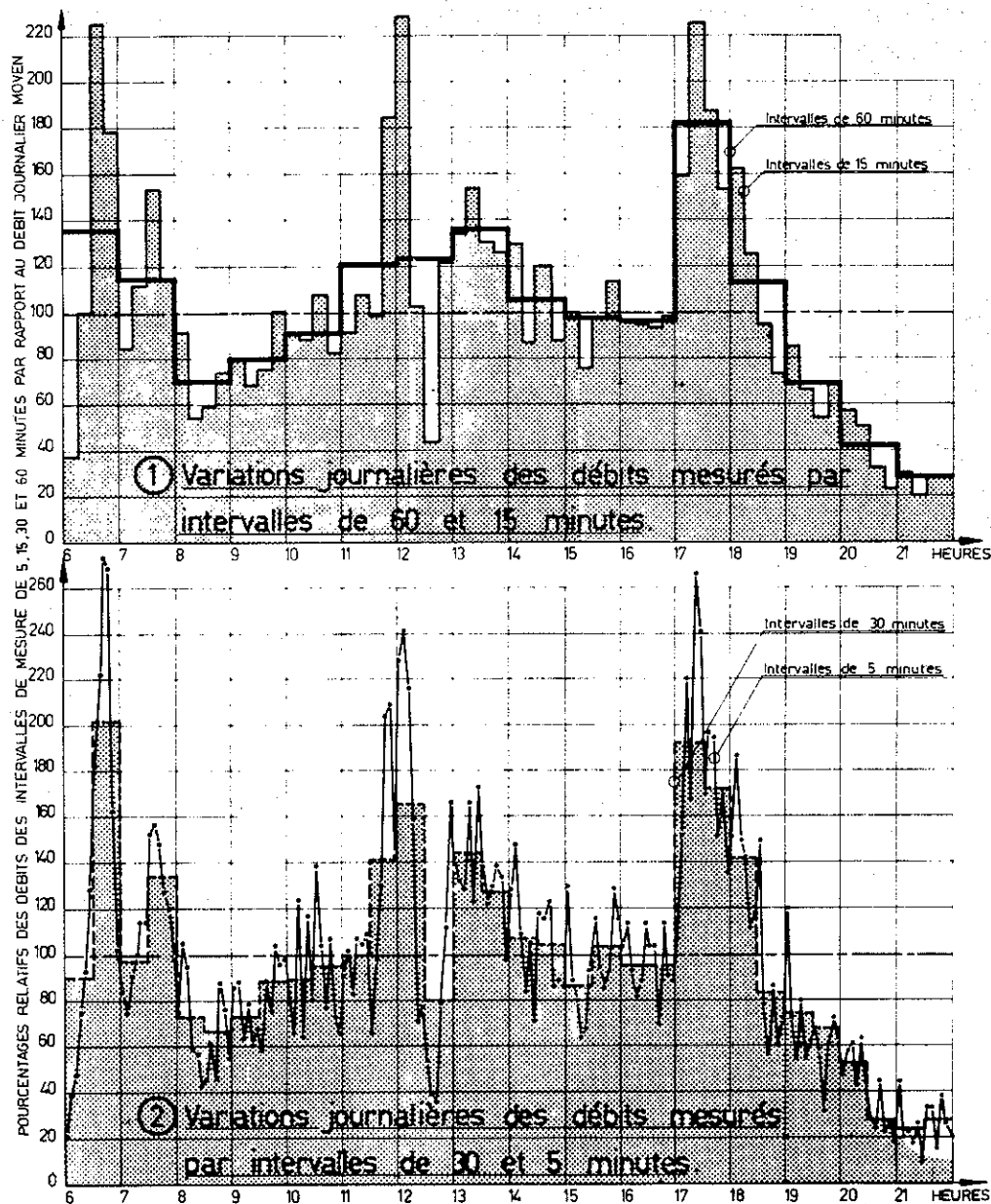
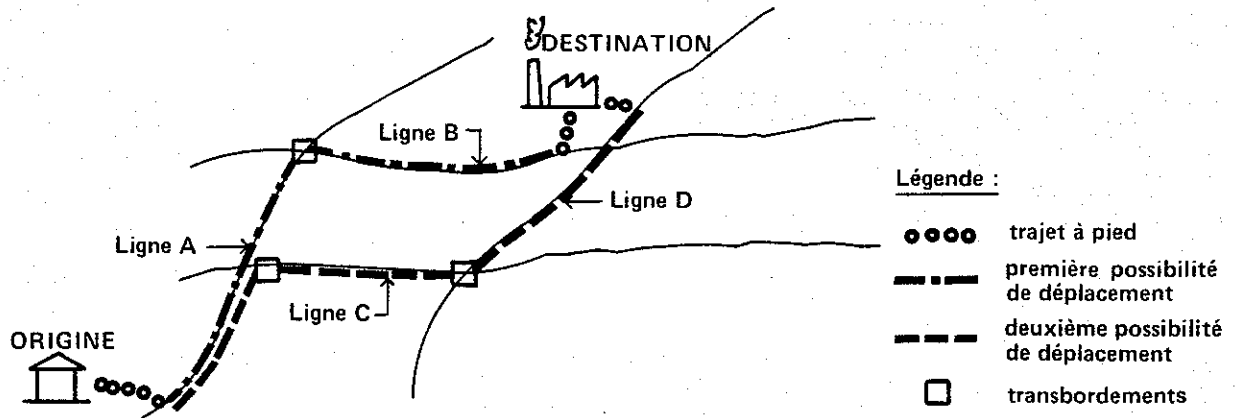


Figure 2.2 - Effet du pas de mesure

Source : P. Müller, Verkehrsspitzen, Tiefbauamt Baselstadt, Strasse und Verkehr, juillet 1960

Des difficultés surviennent également lorsqu'un déplacement comporte un ou plusieurs transbordements : il est ainsi composé de plusieurs voyages élémentaires. En fonction du procédé de mesure, le même déplacement risque donc d'être comptabilisé sous forme d'un ou plusieurs voyageurs :



Ce déplacement correspondra à - 1 voyageur
 - 2 voyageurs
 - 3 voyageurs

Figure 2.3 - Chaîne de déplacement

Ces difficultés sont spécialement aiguës dans le cas des transports urbains où :

- un déplacement à motif unique peut comporter plusieurs voyages élémentaires
- la probabilité qu'il existe plusieurs itinéraires concurrents correspondant à des différentes chaînes est élevée
- plusieurs chaînes de déplacements combinent plusieurs motifs à la fois.

Il incombe donc à l'analyste d'être conscient de l'ensemble de ces problèmes de mesure et de faire en sorte que les distorsions introduites par le procédé de mesure se limitent au strict inévitable. Avant chaque étude de demande, il sera nécessaire de déterminer :

- les unités de mesure pertinentes
- le procédé et les dispositifs de mesure

en fonction des objectifs propres de l'étude et des disponibilités en ressources.

4. LES VARIABLES

La fonction de la demande dans le cas des transports est donc une fonction du type :

$$y = D(X, A, S) \quad \text{avec}$$

y : la variable qui décrit la demande

X : les variables qui décrivent les performances du système des transports (niveau de service)

- A : les variables qui décrivent le niveau d'activités qui engendrent les déplacements
- S : les variables socio-économiques qui décrivent le profil des usagers.

La variable dépendante y peut être, selon le niveau de l'analyse :

- un volume de déplacements d'un type donné, s'il s'agit d'une analyse macroéconomique,
- une probabilité d'entreprendre un déplacement donné, ou, plus largement, une probabilité d'utiliser un service de transports donné, s'il s'agit d'une approche microéconomique.

Les variables qui décrivent les performances du système des transports définissent le niveau de service ou coût généralisé. Elles contiennent donc des éléments ayant trait au prix du transport, aux différents temps composés et aux conditions de confort du service.

L'activité des transports exige de la part de l'utilisateur des dépenses en temps sous plusieurs formes :

- temps nécessaire au déplacement proprement dit; ce temps correspond, pour les modes mécanisés, au temps dépensé à l'intérieur d'un véhicule en mouvement; théoriquement, il s'agit de la seule dépense en temps inévitable pour la réalisation d'un déplacement; on s'y réfère en termes de **temps de parcours**;
- temps consacré aux **attentes**, temps dépensé en attendant un véhicule de transports collectifs, en recherchant une place de stationnement, etc;
- **temps** nécessaire à **l'accès** au système de transport depuis un lieu d'activités et vice-versa; ce temps dépensé en général sous forme de marche à pied, correspond à l'accès à une station de transports collectifs ou à une aire de stationnement, etc.

Ces trois composantes sont en général dissociées dans la fonction de la demande.

Les conditions de confort, intervenant dans le cas de transport de personnes, dépendent de plusieurs facteurs, dont une bonne part est difficilement chiffrable :

- bruit
- vibrations
- densité de passagers
- température
- protection des intempéries
- possibilité de s'asseoir
- effort physique de l'utilisateur
- sentiment d'insécurité
- perception psychologique de l'efficacité du service.

Elles peuvent, dans une fonction de coût généralisé, être assimilées à un temps de déplacement supplémentaire ou, par contre, y être introduites sous forme de facteurs multiplicatifs des différentes composantes du temps. Ces deux approches correspondent à des hypothèses sur le comportement de l'utilisateur totalement différentes : la première équivaut à admettre que l'utilisateur perçoit l'inconfort sous la forme d'une perte de temps supplémentaire et forfaitaire, l'autre que l'utilisateur perçoit en fonction de l'inconfort chaque minute de temps perdu comme plus ou moins longue.

Les variables, qui décrivent l'importance des activités qui engendrent des déplacements, sont propres à chaque motif de déplacement. Il s'agit, lors de chaque cas concret, de choisir les variables les plus pertinentes. Ainsi dans le cas du choix de la destination - ou distribution des déplacements - pour les déplacements dont les achats courants sont le motif, on utilisera :

- le chiffre d'affaires du commerce de détail
- la surface de vente du commerce de détail
- etc.

Le profil socio-économique de l'utilisateur est défini en fonction :

- de son rôle dans le ménage,
- de la situation sociale du ménage,
- de certains éléments d'identité, tels que l'âge ou l'état-civil, par exemple,
- de ses capacités de participation aux activités, qui dépendent de sa formation, de sa profession,
- de variables du cycle de vie, etc.

Les variables suivantes ont fréquemment été utilisées :

- revenu(s)
- type de logement
- motorisation
- sexe
- âge
- état-civil
- origine
- niveau de scolarité
- profession et grade dans la hiérarchie professionnelle
- durée de l'occupation professionnelle
- etc.

5. ROLE DES ETUDES DE DEMANDE DE TRANSPORT

Le terme "étude de la demande de transport" couvre toute étude en matière de transports qui porte sur la **clientèle** du système ou sur **l'objet** du transport. Ce terme d'"étude de demande" a remplacé le terme "étude du trafic" en même temps que la "technique du trafic" (traffic engineering) était remplacée par la "technique des transports".

Les études de demande portent donc principalement sur le produit d'une entreprise de transport : le déplacement d'une personne ou d'une certaine quantité de biens. Il y a ainsi lieu de distinguer entre demande de **personnes** (ou **voyageurs**) et demande de **marchandises**.

Les études de demande dans une entreprise de transport peuvent viser à **analyser** la consommation actuelle ou passée du produit offert (le déplacement) ou à **prévoir** la consommation future de ce produit sous certaines hypothèses d'évolution.

Il est nécessaire d'analyser la consommation du produit, ainsi que la clientèle de l'entreprise, lorsqu'on désire :

- expliquer les mécanismes qui aboutissent à cette consommation, car ce sont ces mécanismes qui justifient du point de vue économique et social l'existence même de l'entreprise; c'est cette analyse qui montrera, parmi d'autres, le bien-fondé de l'adaptation de l'entreprise aux besoins du marché, de la société;
- élaborer des politiques de transport à court, moyen ou long terme, en montrant les rééquilibrages nécessaires dans l'offre de produits, les secteurs où les activités de l'entreprise peuvent ou doivent être étendues (ou, au contraire, réduites), les segments du marché nécessitant des approches différentes, etc.

Il est nécessaire de prévoir la consommation future du produit lorsqu'on désire dimensionner les différents secteurs de l'entreprise, l'appareil de production et le personnel.

En fonction de l'objectif visé, il y aura donc

- des études **d'analyse**, ou
- des études **de prévision**.

L'instrument par excellence de l'étude de la demande est la **statistique**, qu'il s'agisse de **statistique descriptive**, permettant de mettre en valeur certaines évolutions, certaines relations de base ou certains éléments de structure, ou qu'il s'agisse de **statistique d'inférence**, permettant de vérifier des hypothèses, de quantifier des relations, de modéliser des mécanismes ou des phénomènes étudiés.

III. DESCRIPTION DE LA DEMANDE

1. LA DEMANDE DE TRANSPORT : UNE DEMANDE DERIVEE

Quelque soit l'objet du transport, des voyageurs ou des marchandises, le transport lui-même est rarement un but en soi. On ne se déplace en général pas pour le simple plaisir de se déplacer. Les transports sont donc une **activité intermédiaire**, entreprise dans le but de rendre possible l'accomplissement d'autres activités de nature fondamentale. Ainsi, dans le transport des voyageurs, intervient la notion de **motif du déplacement**. Le motif du déplacement se réfère précisément à ces activités de base qui engendrent le transport : se nourrir, travailler, s'approvisionner, se former, se distraire, bénéficier de soins médicaux, etc. Parmi les motifs usuellement mentionnés dans les études de demande, citons :

- le travail
- l'école
- les achats
- professionnel (se réfère aux voyages d'affaires)
- affaires personnelles
- loisirs (se réfère surtout aux loisirs "quotidiens", tels que cinéma, théâtre, etc)
- tourisme (loisirs de "longue" durée).

2. TRANSPORTS DE PERSONNES : DIMENSIONS D'UN DEPLACEMENT

Le produit offert par une entreprise de transport est le déplacement. Du point de vue de la clientèle, c'est-à-dire de l'individu désirant se déplacer, le déplacement est déterminé par un ensemble de caractéristiques qu'on appellera, **dimensions** pour des raisons de convenance. Il importe à l'entreprise de connaître l'ensemble de ces dimensions afin de pouvoir adapter le service offert.

Les dimensions principales qui permettent de déterminer un déplacement du point de vue de l'utilisateur, en dehors du motif de déplacement qui vient d'être évoqué, sont :

- l'**origine** du déplacement
- la **destination** du déplacement
- la **fréquence** ou la régularité de ce déplacement, exprimée en nombre de déplacements par unité de temps
- le **mode** de transport ou l'ensemble de modes utilisés
- l'**itinéraire** emprunté
- le **moment** (dans la journée, dans la semaine, dans l'année) de se déplacer.

Un déplacement n'est déterminé de manière univoque que lorsque l'ensemble de ces dimensions a été déterminé.

La modélisation de la demande, c'est-à-dire l'élaboration d'instruments permettant de quantifier, d'évaluer ou d'analyser la demande vise donc à déterminer ces dimensions, qu'il s'agisse de modélisation

agrégée, c'est-à-dire portant sur un groupe de déplacements, ou de modélisation désagrégée, portant sur des déplacements individuels.

La dimension analysée aura en outre une influence directe sur les variables qui exprimeront la demande et les unités de mesure correspondantes.

Une analyse analogue peut être également établie pour le transport des marchandises. Dans ce dernier cas, le motif n'est en général plus une dimension pertinente mais une autre dimension intervient et joue un rôle capital : la **nature** de la marchandise transportée.

3. CHAMP GEOGRAPHIQUE DE L'ETUDE ET SON DECOUPAGE

La limite ou le périmètre d'une région dont il s'agit d'étudier le système de transports sépare le champ géographique (ou région d'étude) de son environnement. Cette limite devrait être définie en admettant pour critère que le système ainsi conçu influence peu ou pas son environnement.

Le choix de cette limite n'est cependant pas aisé. Il doit être opéré en tenant compte :

- d'études antérieures de systèmes civils et, en particulier, d'études de transports (possibilité de faire des comparaisons)
- d'études dans des régions adjacentes à la région étudiée
- des contraintes géographiques au sens large
- de considérations ayant trait aux limites administratives, etc.

L'exemple de la fig. 3.1 illustre la délimitation de la région étudiée dans le cas d'un carrefour routier.

Pour être en mesure d'analyser le fonctionnement du système des transports et d'identifier, de recenser les différents déplacements de personnes et de choses, la demande, il y a lieu de découper la région d'étude elle-même et son environnement.

Ce découpage **en zones, en secteurs ou en couronnes** s'effectue en principe selon des critères analogues à ceux de la détermination des limites de la région.

La consistance des enquêtes, leur durée et leur coût, la lourdeur des modèles de prévision de la demande dépendent du degré de finesse du découpage.

Dans le but d'alléger l'utilisation des modèles et d'examiner un grand nombre de stratégies et variantes d'action pour des systèmes et des sous-systèmes de transports, il peut être indiqué de limiter le nombre des secteurs d'enquête.

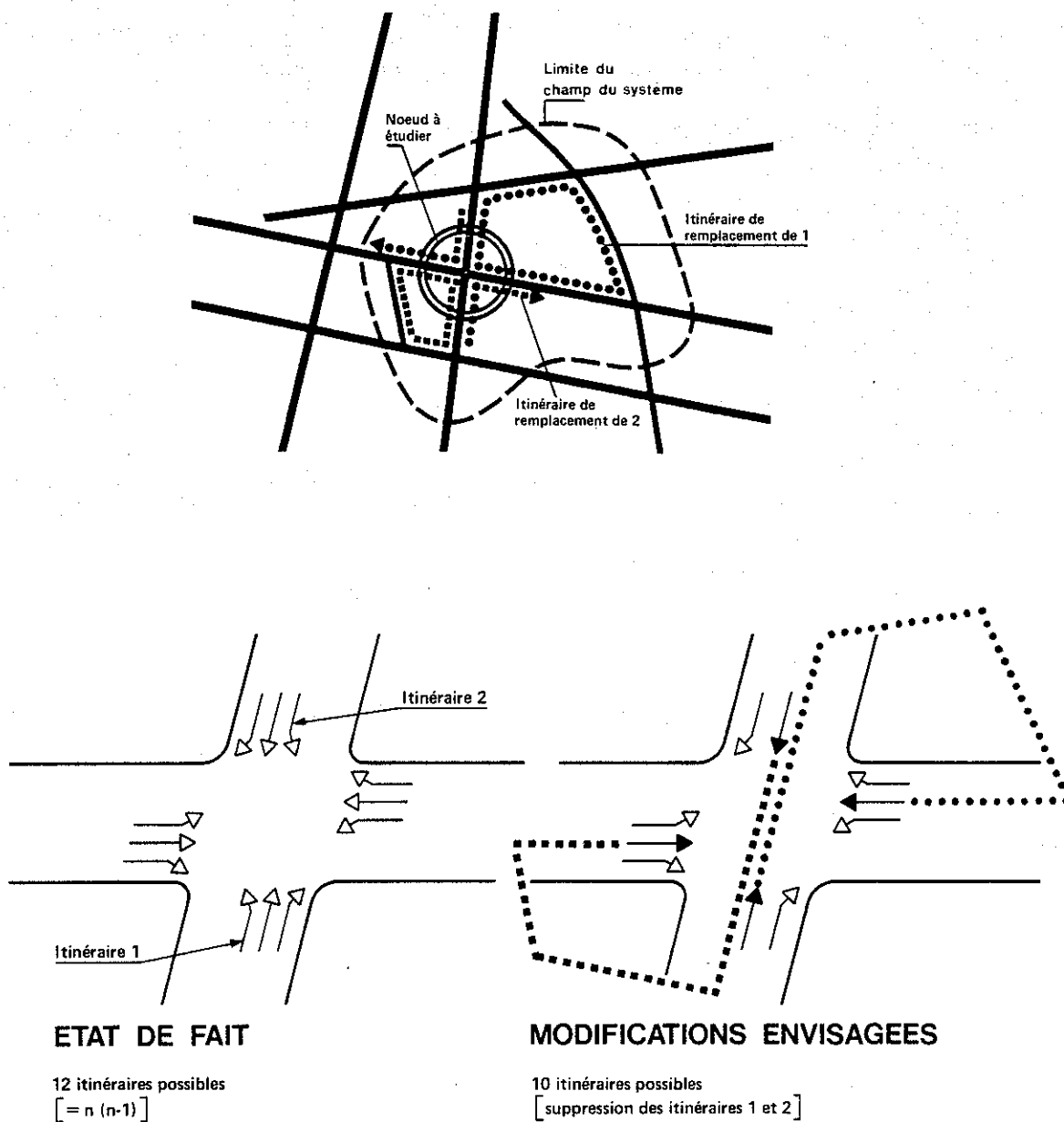


Figure 3.1 - Champ géographique du système, carrefour routier

Il importe toutefois que la dimension des secteurs, notamment en ce qui concerne leur peuplement ou leur nombre de ménages, soit telle que :

- les enquêtes à domicile ne soient pas d'un coût prohibitif,
- l'échantillonnage soit représentatif.

Il y a donc une analogie entre de telles enquêtes et les processus statistiques de contrôle de production. (Notions de lots, d'échantillonnage, de risques du producteur et du client lors des réceptions de matériel).

L'expérience révèle qu'un secteur d'enquête ne devrait pas avoir une population inférieure à environ 10'000 habitants ou à 3'000 ménages pour des grandes agglomérations de pays industrialisés.

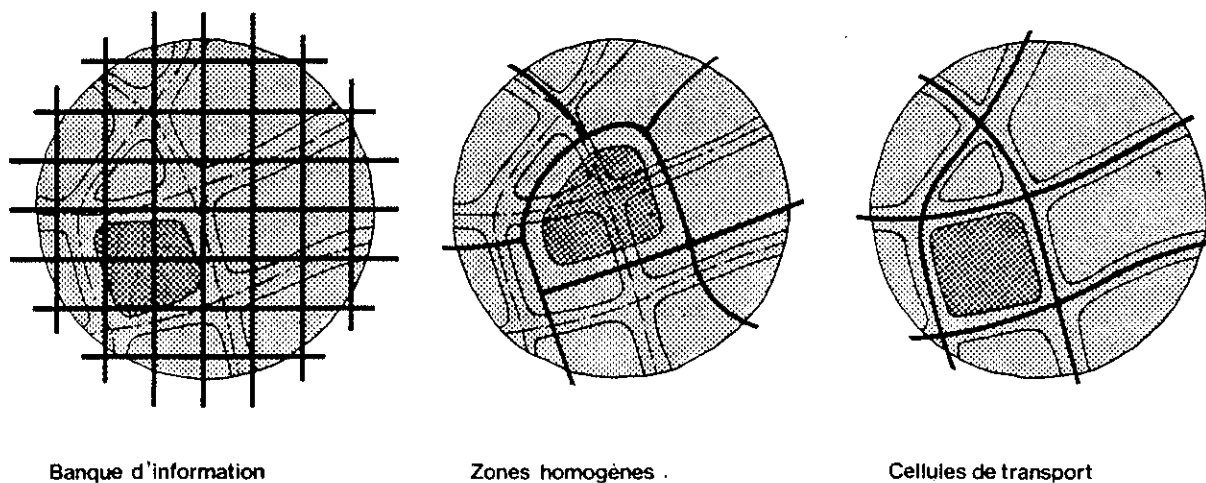
Trois façons d'opérer un découpage peuvent être envisagées (fig. 3.2) :

- découper des zones de caractère homogène par rapport à l'occupation du sol (critère socio-économique);
- découper des zones en s'appuyant sur les données d'une banque d'information de type modulaire, en combinant les modules en fonction de l'occupation du sol;
- définir des "cellules de trafic" délimitées par des mailles de circulation.

Il convient d'insister tout particulièrement sur les conséquences que peut avoir le choix de la limite du champ d'étude et le découpage de la région

- a) sur la formalisation du système et donc sur la représentativité des modèles;
- b) sur la précision des résultats;
- c) sur l'efficacité du processus de planification;
- d) sur la possibilité de comparer des études successives.

PRINCIPES DE DECOUPAGE DE LA REGION D'ETUDE



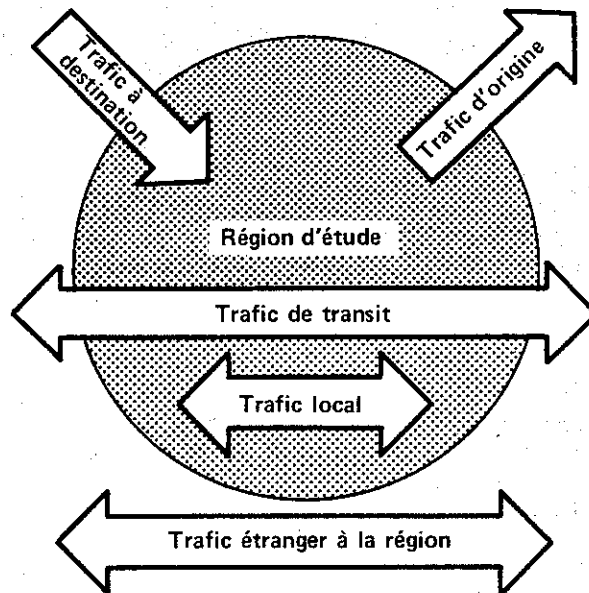
Banque d'information

Zones homogènes .

Cellules de transport

Figure 3.2 - Principes de découpage en zones d'une région d'étude

La délimitation du champ d'étude permet enfin de classer les déplacements en fonction de leur répartition spatiale (fig. 3.3).



NATURE DU TRAFIC SELON L'ORIGINE ET
LA DESTINATION DES DEPLACEMENTS.

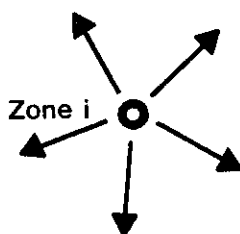
Figure 3.3 - Déplacements classés selon leur répartition spatiale en fonction du champ géographique de l'étude

4. MESURES ET MODES DE REPRESENTATION DE LA DEMANDE¹

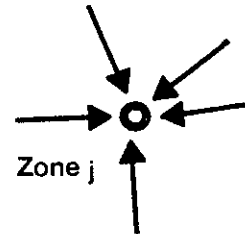
Dans une région d'étude découpée en zones, l'ensemble des déplacements (à l'exception du trafic local des zones) peut être recensé et représenté sous forme de tableau. Un tel tableau, de dimensions $n \times n$ (où n est le nombre total de zones) indique le volume (nombre) de déplacements entre toute zone d'origine et toute zone de destination (fig. 3.4). Il est appelé "matrice origine-destination".

ZONES		ZONES D'ATTRACTION, DESTINATIONS					$\sum_j V_{ij}$
		1	j	n	
ZONES D'EMISSION, ORIGINES	1			V_{1j}		V_{1n}	G_1
						
	i	V_{i1}		V_{ij}		V_{in}	G_i
						
	n	V_{n1}		V_{nj}			G_n
$\sum_i V_{ij}$		A_1		A_j		A_n	

GENERATION G_i



ATTRACTION A_j



V_{ij} = nombre de déplacements depuis la zone d'origine i à la zone de destination j , pendant l'unité de temps.

Figure 3.4 - Matrice origine-destination

La représentation graphique de la matrice origine-destination (matrice O/D, dans la suite), donne lieu à la constitution d'un diagramme de lignes de désir. Dans ce diagramme, les zones sont représentées par un point matériel, appelé "centroïde", et l'épaisseur du trait reliant deux centroïdes correspond, à une échelle donnée, au volume de déplacements entre les deux zones (fig. 3.5).

¹ Ce paragraphe, ainsi que le précédent, sont largement inspirés du cours du prof. D. Genton "Systèmes de transports : analyse de la demande", ITEP-EPFL, 1982

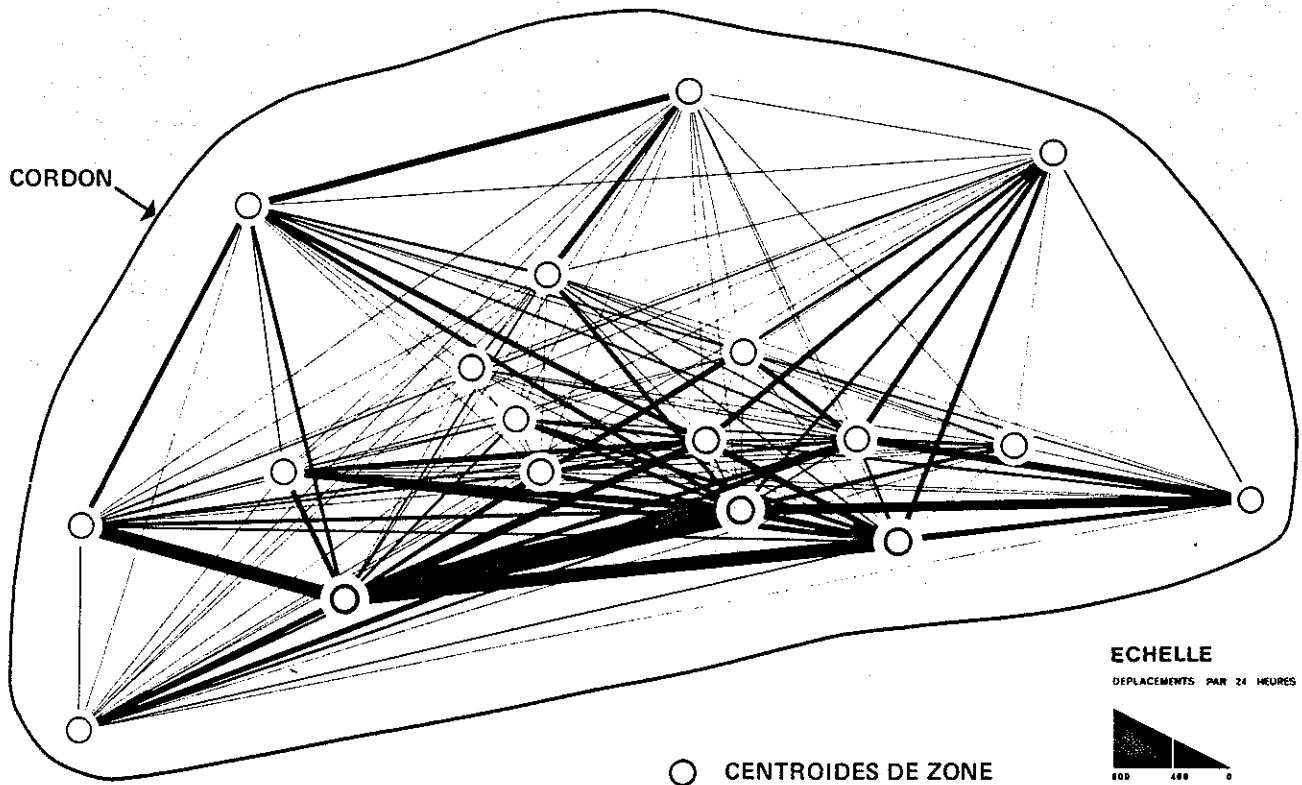


Figure 3.5 - Montreux, lignes de désir du trafic local des transports collectifs, prévision pour l'Etat 1
(Source : Commune de Montreux, Plan des transports, ITEP, 1970)

La matrice O/D et le diagramme des lignes de désir ne fournissent pas directement d'indications sur la charge du réseau. Celle-ci peut être obtenue :

- par des comptages en section du nombre de passagers à un moment donné, comptages réalisés sur l'ensemble des sections importantes d'un réseau, de préférence simultanément (dans le cas contraire : problèmes de conversion !)
- par des enquêtes auprès des passagers, voire des ménages
- indirectement, à partir d'une matrice O/D, par l'utilisation d'un modèle d'affectation (cf. chapitre IV).

La charge du réseau est représentée sous forme de diagrammes de **lignes d'écoulement** (fig. 3.7) ou, plus simplement, sous forme de diagrammes **d'écoulement** (fig. 3.6), ces derniers se différenciant des premiers du fait qu'ils ne comportent pas d'indications sur la répartition des mouvements à l'intérieur des noeuds.

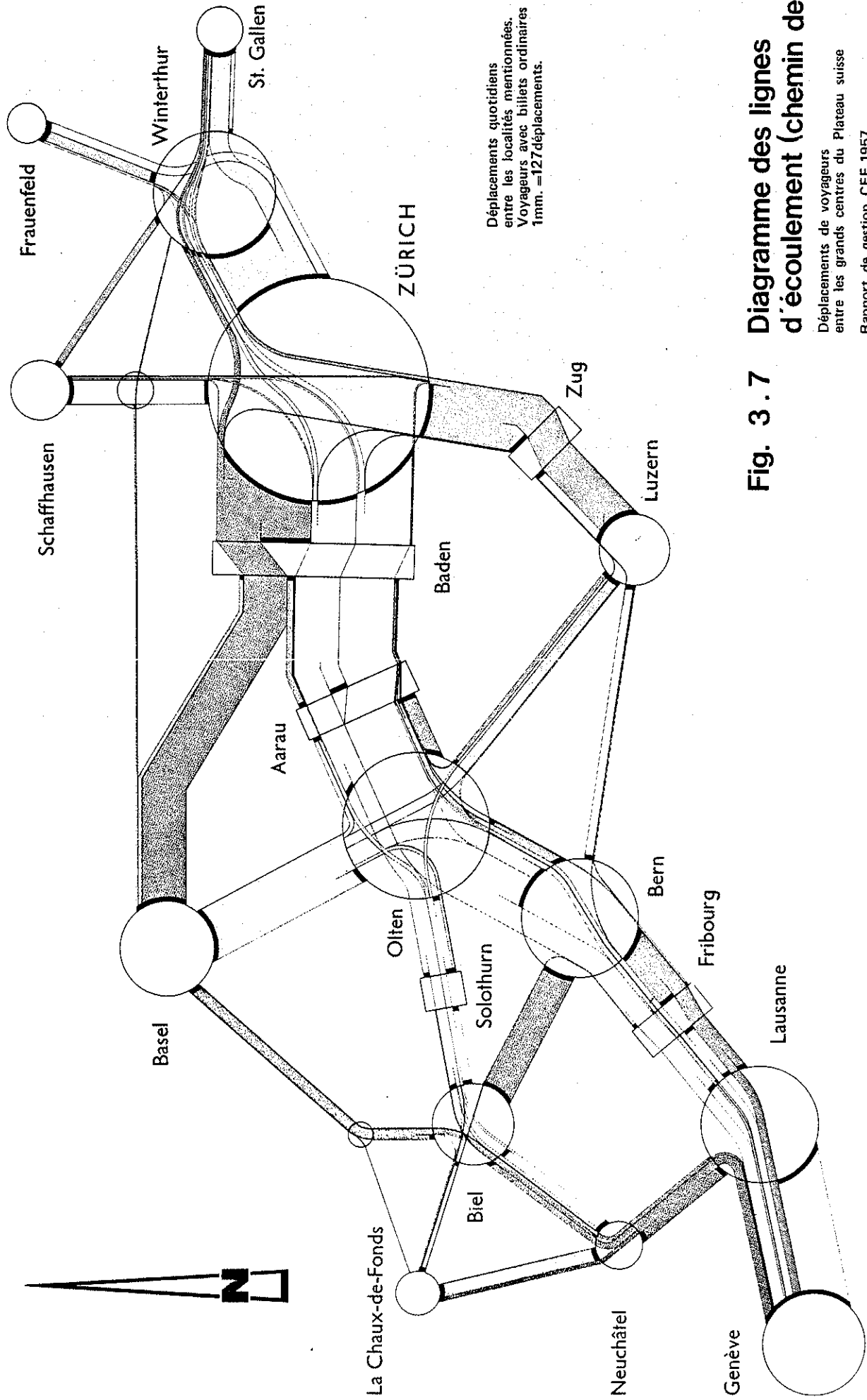


Fig. 3.7 Diagramme des lignes d'écoulement (chemin de fer)

Déplacements de voyageurs entre les grands centres du Plateau suisse
Rapport de gestion CFF 1957

L'ensemble des mesures de la demande qui viennent d'être présentées concernent des déplacements observés (ou estimés) dans un intervalle de temps donné (heure, jour, année). Or, la demande subit deux sortes de variations en fonction du temps :

- une évolution à long terme, exprimée en termes de croissance, décroissance ou stagnation
- des fluctuations périodiques à plus court terme; ces fluctuations s'exercent dans le cadre d'un jour de 24 heures avec des périodes de pointe et des heures creuses, dans le cadre de la semaine avec les jours ouvrables, les jours fériés et les jours semi-ouvrables, dans le cadre de l'année avec des variations cycliques saisonnières.

Ces fluctuations périodiques peuvent être prises en compte par l'établissement d'histogrammes en valeurs absolues ou relatives; la figure 2.2 présente l'exemple d'une telle variation. Ces fluctuations déterminent l'engagement dans le temps des moyens de production et du personnel et influencent donc directement la gestion courante de l'exploitation du système mais en sont également influencées (encore une boucle !).

Leur connaissance permet aussi la **conversion** ou l'établissement d'équivalences entre des mesures de la demande effectuées à des heures ou des époques différentes.

Dans les transports routiers et urbains, deux mesures synthétiques usuelles permettent en partie de s'affranchir de l'effet de ces variations cycliques. Il s'agit

- du débit journalier moyen (DJM ou Average Daily Traffic - ADT - en anglais)
- de la trentième heure de pointe.

Le **débit journalier moyen** est le débit usuellement utilisé dans le dimensionnement d'infrastructures de transports urbains. Il correspond au débit journalier moyen d'une année calculé sur les jours ouvrables et, éventuellement, en dehors des périodes habituelles des vacances.

La **trentième heure de pointe** est le débit utilisé dans le dimensionnement de routes nationales suisses. Il s'obtient par l'établissement d'une courbe de **débits classés**, représentant dans un ordre décroissant les débits horaires d'un axe durant une année; la trentième heure de point correspond au débit horaire qui n'est dépassé que durant 30 heures dans cette année (fig. 3.9).

Il est probablement superflu de préciser que l'utilisation de telles grandeurs synthétiques sans la connaissance des distributions des valeurs qui leur sont associées, comporte de graves risques d'erreur de sur- ou de sous-dimensionnement.

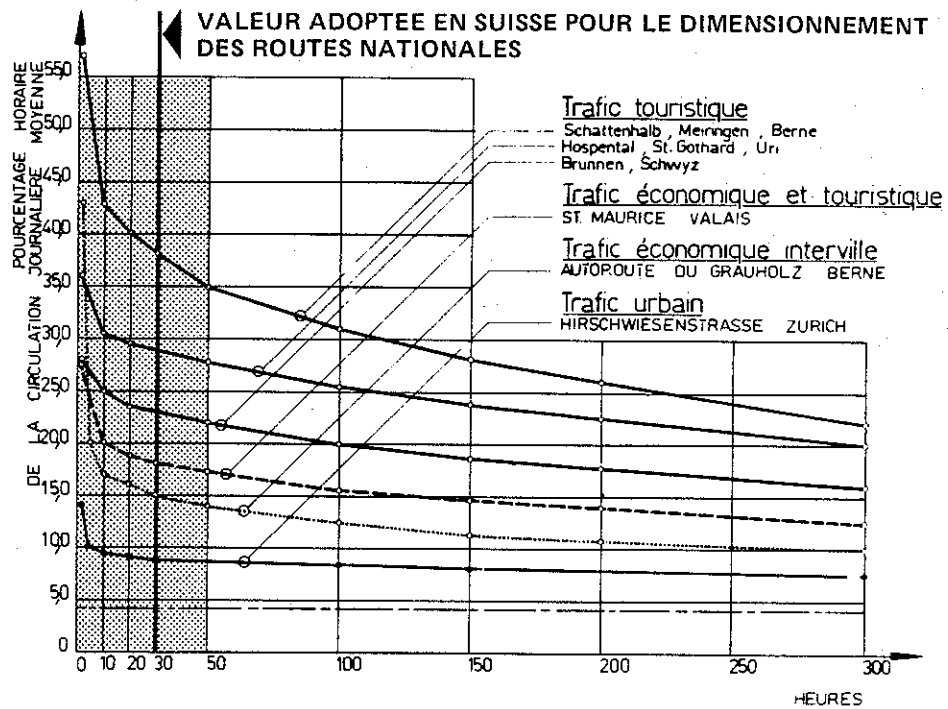
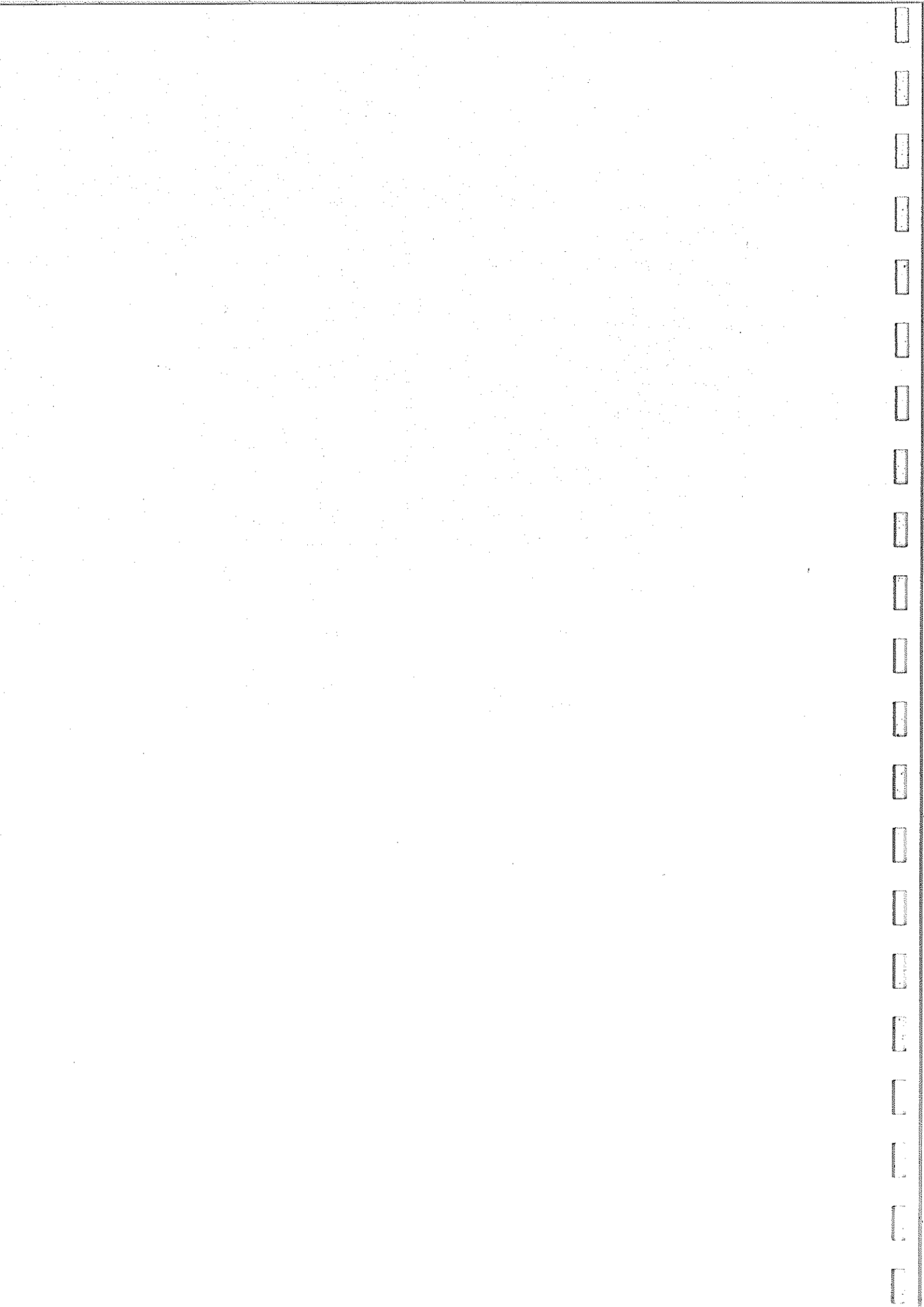


Figure 3.9 - Débits classés horaires durant une année

Source : Service fédéral des routes et des digues,
Comptages automatiques de la circulation routière,
rapport annuel, Berne, 1963



IV MODELES D'ANALYSE ET DE PREVISION DE LA DEMANDE

1. GENERALITES

L'étude quantitative de la demande de transport implique une formalisation mathématique complète de la fonction de la demande et, éventuellement, d'une partie du processus qui aboutit à l'équilibre entre les performances du système et la demande. Que cette formalisation se fasse sous la forme d'une fonction ou d'une famille de fonctions, ou sous la forme d'algorithmes (qui correspondent à une logique structurée de calcul comportant un ensemble de fonctions), le produit final peut être appelé un **modèle**.

Le processus de formation des déplacements est à ce point complexe que seul le recours à des modèles validés statistiquement permet une approche quantitative rigoureuse. L'élaboration de tels modèles a constitué une des phases clés, peut-être la phase clé, des études de planification des systèmes de transports; à telle enseigne qu'une confusion terminologique a fini par se créer, notamment en anglais, entre les termes "modélisation de la demande" et "planification". La compréhension de l'évolution des modèles de demande passe dès lors par l'examen de l'évolution de la planification des transports.

2. LES MODELES DITS "CONVENTIONNELS"

Les modèles de la première génération, appelés dans la suite "conventionnels", ont pour caractéristiques communes :

- d'être **séquentiels**; la fonction de la demande est divisée en quelques phases importantes telles que la génération, la distribution, la répartition modale et l'affectation des déplacements; les calculs se font en chaîne, les résultats obtenus dans une étape interviennent comme données d'entrée dans l'étape suivante;
- d'être **agrégés**, c'est-à-dire de traiter la formation de la demande au niveau de groupes de ménages (ou de personnes) dont, en général, la seule caractéristique commune est la proximité géographique, l'appartenance à une même zone (cf. fig. 3.2).

Les phases importantes dans le calcul de la demande consistent à calculer (fig. 4.1) :

- la **génération** des déplacements, c'est-à-dire le nombre de déplacements issus d'une zone;
- la **distribution** des déplacements, c'est-à-dire la répartition des déplacements issus de n'importe quelle zone vers les zones de destination possibles;
- la **répartition modale** des déplacements entre deux zones quelconques sur les différents modes de transport;
- l'**affectation** des déplacements entre deux zones quelconques et à l'aide d'un mode de transport quelconque sur les différents itinéraires assurant cette liaison.

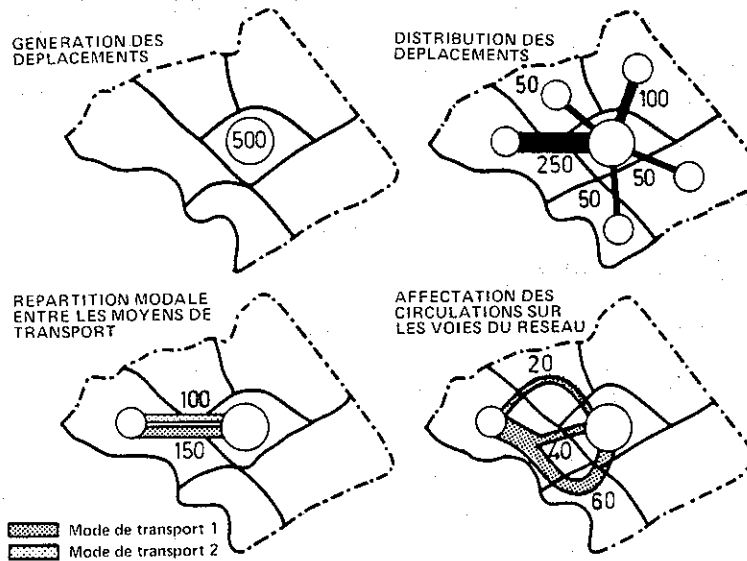


Figure 4.1 - Phases principales du calcul de la demande

Ces quatre phases correspondent à la détermination de quatre dimensions des déplacements (cf. chap. I, §3). Certains modèles conventionnels regroupent les phases de génération et de répartition modale en une phase unique; d'autres se distinguent par un ordre inverse de la succession des phases de la distribution et de la répartition modale (fig. 4.2).

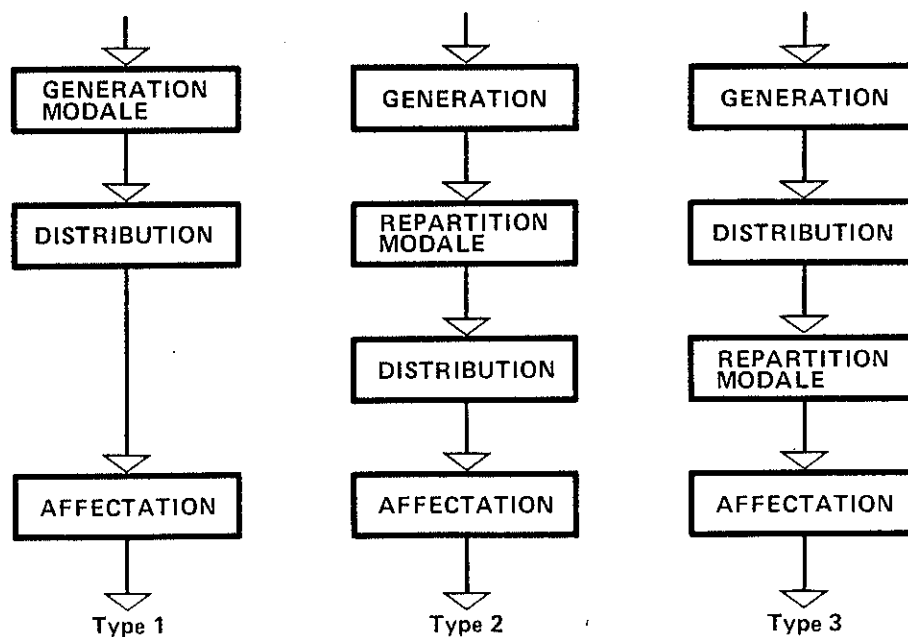


Figure 4.2 - Types de modèles conventionnels

GENERATION DES DEPLACEMENTS

La génération des déplacements peut être définie comme l'étude des relations entre le nombre des déplacements effectués dans une région et des caractéristiques de cette région telles que l'utilisation du sol, la population, le nombre d'emplois et d'autres mesures de l'activité économique. Elle consiste à estimer le nombre total de déplacements d'origine ou à destination d'une zone en fonction de ses caractéristiques socio-économiques, de sa localisation et du type d'occupation du sol.

Les variables indépendantes suivantes ont souvent été utilisées :

- motorisation
- distance au centre-ville
- revenu
- nombre de personnes disposant d'un permis de conduire
- profession du chef de ménage
- type de résidence
- taille du ménage
- nombre de personnes adultes dans le ménage
- âge du chef du ménage
- position du ménage dans le cycle de vie (jeune couple avec ou sans enfants, etc).

Les relations sont établies en général à l'aide de régressions linéaires.

DISTRIBUTION DES DEPLACEMENTS

L'objectif principal de cette phase de calcul est la distribution du nombre total des déplacements générés dans une zone, à toutes les zones de destination disponibles.

La distribution utilise comme données d'entrée :

- l'ensemble de déplacements générés par zone, calculés précédemment;
- des variables décrivant le niveau de service.

Trois catégories de modèles de distribution peuvent être définies :

- les modèles par facteurs de croissance,
- les modèles de gravitation,
- les modèles des possibilités d'activités (opportunity models).

Les modèles par facteurs de croissance représentent la forme la plus simple de modèles de distribution. Ils sont basés sur une simple expansion des déplacements existant entre les zones au moyen de facteurs multiplicatifs. Différentes méthodes peuvent être employées, dont la plus connue est la méthode FRATAR.

Les modèles de gravitation s'inspirent de la loi de gravité universelle. Ils correspondent à une formulation du type :

$$V_{ij} = k \cdot \frac{M_i^a \cdot M_j^b}{d_{ij}^c}$$

avec

- V_{ij} le nombre de déplacements entre les zones i et j
 M_n la "masse" de la zone n , en général égale à sa génération
 D_{ij} une mesure d'impédance (distance, temps, etc) entre i et j
 k, a, b, c des paramètres faisant intervenir les conditions locales

REPARTITION MODALE DES DEPLACEMENTS

Il existe un très grand nombre de modèles de répartition modale car, par opposition aux autres étapes, il n'y a pas de modèles communément admis ni de principes acceptés par plusieurs études à la fois. En règle générale, chaque étude a développé son propre modèle de répartition modale, spécifique à son contexte.

Les variables indépendantes utilisées peuvent être regroupées en trois catégories :

1. Caractéristiques du déplacement :

motif
 situation par rapport au centre-ville
 longueur
 moment dans la journée

2. Caractéristiques des usagers :

voitures/ménage
 revenu moyen
 densité de résidence
 densité des emplois
 voitures/personne
 nombre de voitures disponibles
 actifs/ménage
 distance au centre-ville

Caractéristiques du système de transport :

rapport des temps de déplacement
 différence des temps de déplacement
 rapport des accessibilités
 coût du stationnement
 rapport des coûts de déplacement
 différence des coûts de déplacement
 rapport des temps perdus
 différence des temps perdus
 indice d'accessibilité

Les relations sont établies également à l'aide de régressions simples, généralement.

AFFECTATION DES DEPLACEMENTS

L'affectation peut être définie comme l'opération qui consiste à diffuser un ensemble de déplacements de zone à zone dans un réseau de transports donné. Elle utilise en tant qu'entrées :

- une description complète du système de transports,
- un tableau contenant le nombre de mouvements entre toute paire de zones (la matrice O/D).

Elle produit :

- principalement, des charges sur chaque tronçon du réseau par 24 h, par heure de pointe, par année;
- les mouvements tournants dans les noeuds/les transbordements;
- des cheminements minima à travers le réseau et les valeurs de résistance qui y correspondent.

L'affectation sur un réseau ne doit pas, de ce fait, être considérée comme un modèle proprement dit, mais bien plus comme un algorithme de recherche de cheminements minima sur la base desquels les charges seront affectées au réseau.

Les techniques d'affectation sont au nombre de trois :

1. Affectation du tout ou rien : affectation de la totalité des mouvements entre une paire de zones sur le chemin minimum les reliant.
2. Affectation à capacité limitée : affectation des mouvements sur le chemin minimum jusqu'à une certaine limite; au-delà, affectation sur le chemin minimum parmi les chemins restant, etc.
3. Affectation multichemins.

L'hypothèse de base des deux premières techniques est que :

- l'utilisateur choisit le chemin minimum

tandis que l'hypothèse de base de la troisième est que :

- les usagers se distribuent proportionnellement à une fonction décroissante du temps de déplacement.

3. LES MODELES DESAGREGES

L'essentiel de l'effort de développement des modèles désagrégés a porté surtout sur la répartition modale. Il existe cependant quelques modèles désagrégés pour l'étude des trois autres phases de l'analyse de la demande : génération, distribution et affectation.

Les modèles désagrégés sont avant tout des modèles probabilistes du choix individuel. Ils expriment la probabilité qu'un individu

- défini par son profil socio-économique et
- se trouvant en face d'un choix précis entre un nombre fini de possibilités de choix

choisisse une solution donnée. Ces solutions ou possibilités de choix sont caractérisées par une série de variables, qui en définissent l'attractivité.

La fonction de demande utilisée par les modèles désagrégés représente en général un phénomène à allure sigmoïde et prend des valeurs contenues dans l'intervalle ouvert de 0 à 1.

Bien que tous les modèles désagrégés admettent les mêmes principes de base et aboutissent à des formulations mathématiques très proches (phénomène à allure sigmoïde), un certain nombre de différences entre eux peuvent être établies, portant notamment :

- sur la technique statistique utilisée pour l'estimation (calibrage) du modèle,
- sur la manière d'inclure les caractéristiques des individus.

Les techniques statistiques utilisées jusqu'à présent pour l'estimation des paramètres et qui seront décrites ci-dessous sont au nombre de trois :

- analyse discriminante,
- analyse probit,
- analyse logit, qui est la plus couramment utilisée.

Le modèle logistique (logit) linéaire

Soit un individu t confronté à un problème de choix déterminé par un ensemble de possibilités de choix A_t . Une possibilité de choix i , appartenant à cet ensemble, est caractérisée par une fonction d'utilité U_{it} . La fonction d'utilité constitue une mesure d'attractivité de la solution en question, c'est-à-dire du bénéfice que le décideur individuel t compte retirer de l'adoption de cette solution. L'utilité dépend, en principe

- de variables décrivant la possibilité de choix $X_k(i)$
- des caractéristiques socio-économiques du décideur (préférences, perception) $S_m(t)$.

Si l'on adopte une formulation linéaire pour la fonction d'utilité :

$$U_{it} = \alpha_0 + \sum_k \alpha_k X_k(i) + \sum_m \beta_m S_m(t)$$

Le modèle logistique prend la forme :

$$P(i \in A_t) = \frac{e^{U_{it}}}{\sum_{j \in A_t} e^{U_{jt}}}$$

où :

$P(i \in A_t)$ est la possibilité de choisir la solution i
 α_k, β_m sont des paramètres à estimer

En fait, l'adoption de la formulation du modèle logistique linéaire exige l'acceptation d'une série impressionnante d'hypothèses sur l'indépendance entre possibilités de choix, la manière dont les caractéristiques du décideur influencent le choix, la distribution statistique des erreurs de la fonction d'utilité, etc. Leur analyse détaillée sortirait du cadre strict de ce cours.

Pour conclure, il y a lieu de noter que le recours aux modèles désagrégés vise à surmonter les principales lacunes des modèles conventionnels; cette approche, issue du domaine de la répartition modale, est basée sur les théories du comportement individuel et aboutit à la création d'une famille de modèles connus sous le nom de modèles du comportement, désagrégés et probabilistes.

En réalité, parmi ces trois qualificatifs, seul celui de probabiliste est rigoureusement exact, mais l'ensemble sert à mettre en évidence les différences de principe entre cette approche et celle des modèles conventionnels :

- 1) Ces modèles sont appelés désagrégés, car l'unité de base des observations utilisées pour l'estimation n'est plus la zone mais l'individu ou le ménage.
- 2) Ils sont appelés de comportement, car
 - leurs bases théoriques proviennent de deux disciplines traitant du comportement humain : celle du comportement des consommateurs (économie) et celle de la théorie du choix (psychologie);
 - ils sont construits à partir d'hypothèses portant sur l'identification de variables de décision.
- 3) Ces modèles sont appelés probabilistes, car ils attribuent à chaque individu une probabilité de prendre une décision donnée en matière de transports.

4. LES MODELES DIRECTS OU SIMULTANES

Les modèles simultanés estiment le volume ou la probabilité de déplacements entre une origine et une destination au moyen d'un mode donné et sur un itinéraire donné, à l'aide d'une seule opération mathématique, en fonction des caractéristiques du système de transports et de l'utilisation du sol.

De point de vue du comportement, il semble plus correct d'utiliser des modèles simultanés dans toutes les situations où il n'existe pas a priori de raisons d'admettre une structure séquentielle précise du mécanisme de décision individuel; les hypothèses restrictives qui sont à l'origine des modèles simultanés sont, en effet, bien limitées, comparées aux hypothèses "héroïques" qu'exige l'utilisation de modèles adoptant un ordre particulier des séquences. Un modèle simultané peut cependant devenir très complexe, à cause de l'augmentation rapide du nombre des choix en fonction du nombre des dimensions du déplacement traitées.

Des modèles simultanés ont été développés en utilisant l'approche conventionnelle de l'analyse de la demande au niveau agrégé; la variable de demande est, dans ce cas, une variable continue. La technique des modèles désagrégés a également été utilisée dans la construction de modèles simultanés.

Parmi toutes les dimensions du déplacement, les modèles de demande s'occupent principalement de la fréquence de déplacement, de la destination, du mode, de l'heure et de l'itinéraire. D'autres décisions, telles que le choix du type et de l'emplacement du domicile, de la motorisation, etc, sont en général traitées par des modèles séparés (choix de mobilité). Ceci correspond à l'hypothèse qu'il s'agit de décisions plus stables pour lesquelles des options sont prises avant le choix des caractéristiques particulières d'un déplacement concret.

MODELES SIMULTANES AGREGES

La fonction de la demande, dans un cas très général, a été établie comme suit :

$$V_{kdmr} = D(S_k, A_d, X_{mr}) \quad \text{où}$$

S_k = description socio-économique des habitants d'une zone k (origine)
 A_d = description du niveau d'activités dans une zone d (destination)
 X_{mr} = niveau de service offert par le mode m sur un itinéraire r
 V_{kdmr} = volume des déplacements sur l'itinéraire r par le mode m dû aux déplacements ayant la zone k pour origine et la zone d pour destination.

Historiquement, cette fonction a été séparée en quatre composantes :

$$\begin{aligned}
 V_k &= f_1 (S_k, X_k) && \text{génération} \\
 V_{kd} &= f_2 (A_d, X_{kd}, V_k) && \text{distribution} \\
 V_{kdm} &= f_3 (X_{kdm}, V_{kd}) && \text{répartition modale} \\
 V_{kdmr} &= f_4 (X_{kdmr}, V_{kdm}) && \text{affectation.}
 \end{aligned}$$

Il n'y a cependant a priori aucune raison théorique de procéder à un tel morcellement et plusieurs études se sont attachées à l'estimation directe de la fonction V_{kdmr} . Ces modèles sont connus dans la littérature en tant que modèles directs, économétriques ou simultanés agrégés.

Plusieurs formulations mathématiques peuvent être utilisées pour expliciter la fonction de la demande; les formulations les plus courantes sont :

- la combinaison linéaire
- la fonction multiplicative
- la fonction exponentielle

Ce n'est pas parce que ces fonctions (fig. 4.3) sont le mieux adaptées à la description de la demande qu'elles sont couramment utilisées, mais plutôt pour des raisons de commodité de calcul. Elles correspondent cependant à des hypothèses bien déterminées sur le comportement des consommateurs.

Le produit multiple implique une élasticité constante de la demande par rapport à toute variable et quelle que soit la valeur de cette dernière. Il n'y a aucune raison a priori d'admettre une telle hypothèse. Elle conduit à des volumes de demande trop élevés pour des niveaux de service extrêmement favorables ainsi qu'à des volumes de demande non nuls pour des niveaux de service extrêmement bas. Cependant, malgré cette faiblesse aux limites, cette formulation peut se montrer très satisfaisante pour un éventail de valeurs intermédiaires du niveau de service.

La combinaison linéaire implique des valeurs d'élasticité variant de 0 à $-\infty$. L'hypothèse sur le comportement correspondante est que les consommateurs sont sensibles de la même façon à une différence en valeur absolue sur une variable, quelle que soit sa valeur (un gain de temps de 5 min. produit, par exemple, le même effet s'il est obtenu sur un trajet de 10 min. que sur un trajet de 60 min.). Il n'y a par ailleurs aucune justification a priori d'une telle hypothèse.

La fonction exponentielle produit des élasticités variables qui dépendent de la valeur de la variable indépendante; cette formulation a pris une importance particulière récemment, à cause du développement des modèles de comportement individuel.

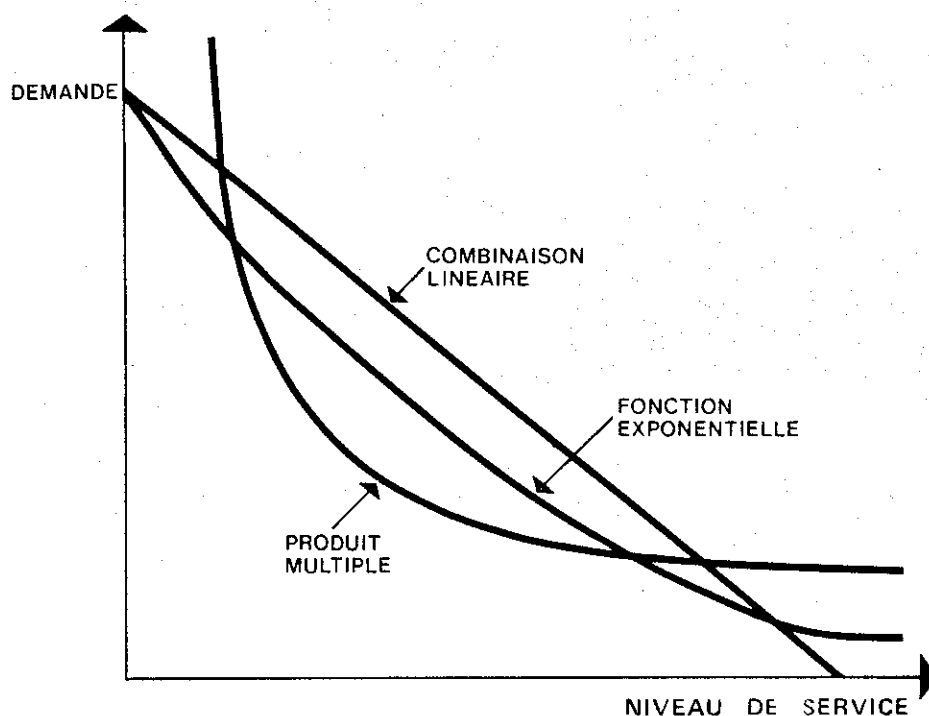


Figure 4.3 - Formulations mathématiques usuelles de la fonction de demande

Une des limites théoriques, inhérente à l'approche des modèles simultanés agrégés, est qu'aucun de ces modèles ne tient compte du fait que la demande de transports est une demande dérivée. Tous ces modèles transposent simplement la théorie classique de la demande dans le cas des transports. Ainsi, si une amélioration importante des niveaux de service a lieu, ces modèles estiment un accroissement substantiel de la demande sans examiner la question de l'opportunité de tous ces déplacements supplémentaires.

5. TYPES DE MODELES DE DEMANDE

Une classification fonctionnelle des modèles de demande de transport doit tenir compte de :

- l'option du modèle sur la simultanéité éventuelle de certaines décisions relatives à la réalisation d'un déplacement; un modèle peut être bâti à partir de l'hypothèse que toutes les décisions s'enchaînent, se succèdent dans le temps; c'est le cas des modèles dits séquentiels; il est par contre possible d'admettre que certaines au moins des décisions font l'objet d'un choix unique et global; c'est le cas des modèles dits simultanés; un modèle sera donc séquentiel ou - plus ou moins partiellement - simultané;

- l'option sur le degré de regroupement des données servant à l'estimation du modèle; les données peuvent se rapporter et décrire le comportement de l'unité de décision qui est, selon les cas, le ménage ou l'individu; les modèles construits de cette façon s'appellent désagrégés; les données peuvent, par contre, être composées de valeurs moyennes correspondant à un regroupement de plusieurs unités de décision; ce regroupement se fait en général sur une base de proximité géographique et n'est pas forcément homogène, ni socialement, ni économiquement; c'est le cas des modèles agrégés; un modèle sera donc agrégé ou - plus ou moins - désagrégé.

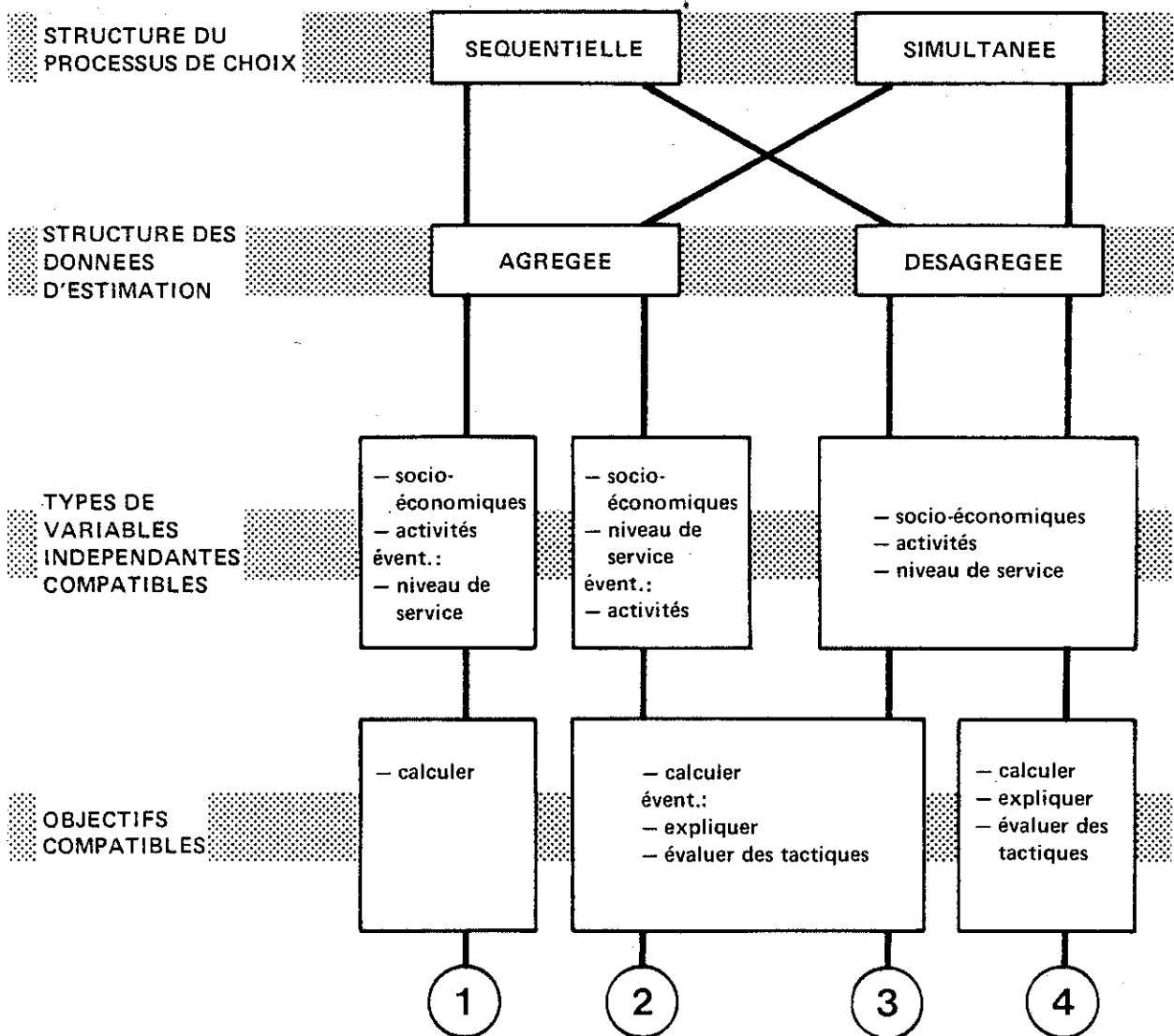


Figure 4.4 - Types de modèles de demande, variables et objectifs d'utilisation

Sur la base de ces critères, il est possible de définir les quatre types de modèles suivants :

- modèles séquentiels agrégés
- modèles simultanés agrégés
- modèles séquentiels désagrégés
- modèles simultanés désagrégés.

La différence parmi ces types de modèles n'est pas uniquement de nature technique. Le type de modèle détermine également en grande partie le type de variables susceptibles d'intervenir dans un modèle donné et, de ce fait, la nature des problèmes auxquels ce modèle est susceptible de fournir des réponses (fig. 4.4).

BIBLIOGRAPHIE

- ALONSO William (1968) "Predicting best with imperfect data", Journal of American Institute of Planners, juillet.
- ATKINS Stephen T. (1977) "Transportation planning : is there a road ahead ?" Traffic Engineering and Control, février.
- BEN-AKIVA Moshe Emanuel (1973) "Structure of passenger travel demand models", Thèse Ph.D., M.I.T., Cambridge Mass.
- BRAND Daniel (1973) "Travel demand forecasting : some foundations and a review", Highway Research Board, Special Report No 143, Washington D.C.
- BRAND Daniel (1976) "Approaches to travel behaviour research", Transportation Research Board, Record No 569, Washington D.C.
- BRÖG Warner, HEUWINKEL Dirk, NEUMANN Karl-Heinz (1977) "Motifs psychologiques qui guident les usagers", CEMT, Table Ronde No 34, Paris.
- DE NEUFVILLE Richard, STAFFORD Joseph H. (1971) "Systems analysis for engineers and managers", Mc Graw-Hill Book Co.
- DOMENCICH Thomas A., Mc FADDEN Daniel (1975) "Urban travel demand; a behavioral analysis", North Holland Publ. Co., Amsterdam.
- FLORIAN Michael, GAUDRY Marc (1980) "A conceptual framework for the "supply side" in transportation systems", Transportation Research, Vol. 14B, No 1/2 (Mars/Juin), Pergamon Press, Oxford - New York - Frankfurt.
- HARTGEN David T., WACHS Martin (1974) "Disaggregate travel demand models for special context planning : a dissenting view", Transportation Research Board, Special Report No 149, Washington D.C.
- HUTCHINSON B.G. (1974) "Principles of urban transport systems planning", Mc Graw-Hill/Scripta Book Co, Washington D.C.
- KANAFANI Adib K. (1983) "Transportation demand analysis", Mc Graw-Hill Book Co.
- KOPPELMAN Frank S. (1974) "Prediction with disaggregate models : the aggregation issue", Transportation Research Board, Record No 527, Washington D.C.
- LEE Douglas B.Jr. (1973) "Requiem for large-scale models", Journal of American Institute of Planners, mai.
- MANHEIM Marvin L. (1973) "Fundamentals of transportation systems analysis : Vol. 1, Basic Concepts", The MIT Press, Cambridge, Mass.
- QUANDT Richard E., éditeur (1970) "The demand for travel : theory and measurement" dans Mathematica, Vol. I, p. 4 à 31.

REICHMANN Shalom, STOPHER Peter R. (1971) "Disaggregate stochastic models of travel-mode choice", Highway Research Board, Record No 369, Washington D.C.

SCHULDINER Paul (1974) "Extension of present methodology", Transportation Research Board, Special Report No 149, Washington D.C.

STOPHER Peter R. MEYBURG Arnim H. (1975) "Urban Transportation modelling and planning", Lexington Books, Lexington Mass.

TZIEROPOULOS Panos (1977) "Les modèles d'analyse et de prévision de la demande de transport", ITEP/STUC, Rapport STUC No 1, Ecole Polytechnique Fédérale, Lausanne.

WATSON Peter L. (1974) "The value of time : behavioral models of modal choice", Lexington Books, Lexington Mass.

WEINER Edward (1969) "Modal split revisited", Traffic Quarterly.

WOHL Martin, MARTIN Brian V. (1967) "Traffic system analysis", Mc Graw-Hill.

Exercice n° 4 : Demande de transport

1. CADRE GENERAL

L'installation progressive des Hautes Ecoles dans le site de Dorigny-Ecublens modifie la structure des déplacements dans le Sud-Ouest Lausannois ainsi que les conditions de transport. Face aux bouleversements qui se produisent dans ce secteur, plusieurs actions ont été envisagées :

- renforcement des transports collectifs,
- réglementation et contrôle plus strict du stationnement,
- amélioration des accès routiers, etc.

Parmi les actions éventuelles tendant à renforcer les capacités des transports collectifs, il y a lieu de citer :

- le projet d'une nouvelle liaison ferroviaire en site propre (métro léger) entre la Place du Flon et la Gare de Renens, traversant le site des Hautes Ecoles,
- la possibilité d'arrêter certains trains directs à la gare de Renens, etc.

L'objet de cet exercice sera d'évaluer l'effet conjugué de certaines de ces actions sur la probabilité d'utiliser les transports collectifs pour un déplacement type, défini comme suit :

- origine : Meyrin dans la Région Genevoise
- destination : EPFL
- modes envisageables : voiture, transports publics
- itinéraires imposés pour chaque mode
- moment de la journée : matin (7h à 8h)

Le profil socio-économique individuel à prendre en considération est le suivant :

- étudiant, de 20 ans, de revenu moyen mensuel de Fr. 1'000,--, pouvant disposer d'une voiture, voyageant seul.

2. LES CAS DE FIGURE ANALYSES

L'exercice consiste à examiner, en partant de la situation actuelle (Etat 0), le scénario séquentiel suivant :

- mise en service de la liaison gare - aéroport à Genève et arrêt de certains trains directs à la Gare CFF de Renens (Etat 1),
- restrictions de stationnement (Etat 2),
- mise en service d'un métro léger Flon - Hautes Ecoles - Renens (Etat 3)

3. ITINERAIRES ET PERFORMANCES DU SYSTEME DE TRANSPORT

3.1 Etat 0

L'itinéraire du déplacement en voiture est actuellement le suivant :

- domicile - jonction d'accès à la N1a 10 min.
- trajet sur l'autoroute (N1a, N1) 30 min.
- trajet d'accès à l'EPFL 5 min.

L'itinéraire de déplacement en transports collectifs est le suivant :

- marche à pied du domicile à l'arrêt de bus et attente 10 min.
- trajet en bus TPG jusqu'à la gare de Genève 20 min.
- trajet d'accès à pied à la gare et attente 10 min.
- trajet en train jusqu'à Lausanne 33 min.
- trajet d'accès au bus direct et attente 5 min.
- trajet en bus direct jusqu'à l'EPFL 12 min.

3.2 Etat 1

Déplacement en voiture identique à celui de l'Etat 0

Déplacement en T.C.

- marche à pied du domicile à la Gare de Genève-Aéroport et attente 15 min.
- trajet en train jusqu'à la gare de Renens 38 min.
- attente pour le bus T.L. 11 5 min.
- trajet en bus jusqu'à l'EPFL 7 min.

3.3 Etat 2

Déplacements en voiture et en T.C. identiques à ceux de l'Etat 1.

Le degré de difficulté de stationner est cependant modifié (voir ci-après).

3.4 Etat 3

La dernière composante de l'itinéraire en voiture est modifiée comme suit :

- trajet d'accès de la N1 à l'EPFL 10 min.

En outre, la difficulté de stationner correspond à celle de l'Etat 2.

Déplacement en T.C. :

- marche à pied et attente initiales 15 min.
- trajet en train jusqu'à Renens 33 min.
- accès au métro léger et attente 3 min.
- trajet en métro léger jusqu'à l'EPFL 4 min.

4. LE MODELE A UTILISER

L'exercice fera appel à un modèle logistique linéaire de choix modal formulé comme suit :

$$p(t) = \frac{e^{U(t)}}{e^{U(t)} + e^{U(v)}}, \text{ avec}$$

$p(t)$: la probabilité d'utiliser les T.C.

$U(t)$: l'utilité (attractivité) des T.C.

$U(v)$: l'utilité de la voiture

Les fonctions d'utilité sont les suivantes :

$$U(t) = \alpha_1 T + \alpha_2 P$$

$$U(v) = \alpha_1 T + \alpha_3 D + \alpha_4 R \text{ avec}$$

- T : temps de parcours en véhicule (min)
- P : temps de marche à pied et d'attente (min)
- D : degré de difficulté de stationner
- R : revenu mensuel (en 1'000.- Fr.)

Les difficultés de stationner sont caractérisées par un "degré" D qui peut prendre les valeurs suivantes :

- D = 0 stationnement libre
- D = 1 stationnement facile mais réglementé
- D = 2 stationnement de durée restreinte et contrôlé
- D = 3 stationnement payant, légère pénurie
- D = 4 stationnement très difficile, cher, voire impossible.

Dans le cas examiné, il y a lieu d'admettre

- pour les Etats 0 et 1, D = 1
- pour les Etats 2 et 3, D = 3

Le modèle ainsi formulé a été estimé et ses performances du point de vue statistique et intuitive ont été jugées bonnes. Le processus d'estimation a permis d'obtenir les valeurs suivantes pour les paramètres α_i :

$$\alpha_1 = - 0,09$$

$$\alpha_2 = - 0,13$$

$$\alpha_3 = - 0,38$$

$$\alpha_4 = 0,26$$

5. LES QUESTIONS

- 5.1 Quelle est la probabilité d'utilisation des transports collectifs pour les quatre états de planification ?
- 5.2 Parmi l'ensemble des actions envisagées, quelle est celle dont l'impact sur l'utilisation des T.C. est le plus important ?
- 5.3 Après la fin de ses études, l'étudiant en question obtient un poste d'assistant à l'EPFL avec un salaire de Fr. 2'800,--/mois, ainsi que l'autorisation d'utiliser le parking du personnel de l'EPFL (D = 2). Comment ces changements se traduisent-ils en matière de choix modal ?

6. POUR FORMALISER LES CALCULS

Utiliser pour chaque état de planification des tableaux du type :

	Mode	
	T.C.	Voiture
Temps parcours
Accès + attente	...	—
Stationnement	—	...
Revenu	—	...
UTILITE

$p(t) = \dots$

Exercice n° 4 : Demande de transport

CORRECTION ET COMMENTAIRES1. LES CALCULS, D'ABORD !

	α	ETAT 0		ETAT 1		ETAT 2		ETAT 3		Changement de profession	
		TC	VT	TC	VT	TC	VT	TC	VT	TC	VT
T.P.	-0,09	65	45	45	45	45	45	37	50	37	50
A+A	-0,13	25	--	20	--	20	--	18	--	18	--
ST	-0,38	--	1	--	1	--	3	--	3	--	2
RV	0,26	--	1	--	1	--	1	--	1	--	2,8
U	×	-9,10	-4,17	-6,65	-4,17	-6,65	-4,93	-5,67	-5,38	-5,67	-4,53
P	×	1 %	99 %	8 %	92 %	15 %	85 %	43 %	57 %	24 %	76 %

2. LA REPONSE AUX QUESTIONSQuestion 1

La réponse à la question se trouve dans le tableau ci-dessus.

Il convient de constater le comportement très sensible du modèle autour du point d'indifférence (c'est-à-dire autour du point où les utilités des deux modes concurrents sont égales).

Question 3

Sa réponse figure aussi dans le même tableau.

En comparant les probabilités après changement de profession à celles de l'Etat de planification 3, il est possible de mettre en évidence l'effet non négligeable des caractéristiques socio-économiques en matière de choix modal.

Question 2

La question est stupidement posée dans le sens qu'elle n'appelle pas une réponse unique.

Du point de vue de **l'exploitant des T.C.** le changement le plus important est celui qui intervient entre les Etats 0 et 1, puisque la probabilité d'utiliser les TC s'est trouvée multipliée par 10. Ce résultat, extrapolé grossièrement (ce qui n'est pas inadmissible !) signifie que le volume des usagers sur cette liaison pourrait être multiplié par 10.

Du point de vue de **l'exploitation du site des Hautes Ecoles** par contre, le changement le plus marqué est celui qui intervient entre les Etats 2 et 3. Les changements entre l'état actuel (Etat 0) et l'Etat 2 ne provoquent en fait qu'une légère baisse des flux de circulation et de la demande en places de parc. Au contraire, la mise en place des éléments définissant l'Etat 3 (essentiellement le métro léger) a pour conséquence la réduction du flux des voitures aux $\frac{2}{3}$ de sa valeur antérieure !

CES RAISONNEMENTS NE S'APPLIQUENT, BIEN ENTENDU, QUE SUR LA LIAISON EXAMINEE ET NON PAS A L'ENSEMBLE DES DEPLACEMENTS A DESTINATION DES HAUTES ECOLES !!!

3. COMMENTAIRES

1. L'analyse de la valeur des paramètres du modèle permet d'établir les équivalences suivantes :

- 1 minute des temps d'accès ou d'attente correspond à environ 1,5 minute de temps de parcours;
- l'accroissement d'un degré des difficultés de stationner équivaut à prolonger d'environ 4 minutes le temps de parcours;
- 1000 francs de revenu mensuel supplémentaire équivalent à un "bonus" de 3 minutes de temps de parcours en faveur de la voiture.

Cette dernière équivalence pourrait en fait s'expliquer en raison

- de ce que le modèle ne contient pas les coûts de transport en tant que variable indépendante explicite,
- d'une certaine corrélation existante entre le besoin d'une voiture sur les lieux du travail et le revenu,
- d'effets éventuels de statut social, etc...

2. Les implications de ces équivalences en matière de politique de transport sont multiples :

- à réduction de temps égale, il est préférable de diminuer les durées d'accès et d'attente plutôt que les temps de parcours;

- dans l'absolu, les restrictions de stationnement ont peu d'effet sur le choix des usagers, si le trajet de ces derniers est relativement long et, surtout, si la différence de temps entre les deux modes concurrents est importante;
- l'effet des restrictions de stationnement peut cependant être critique dans des situations particulières (proches du point d'indifférence);
- l'effet conjugué sur plusieurs variables d'un changement de statut socio-économique (changement de profession, dans notre exemple) peut, dans une large mesure, modifier le comportement de l'usager.

