

Laboratoire d'Économie des Transports
Unité Mixte de Recherche du C.N.R.S. N° 5593
ENTPE - Université Lumière Lyon 2

La "Loi de Zahavi" :
quelle pertinence pour comprendre la contraction et la dilatation
des espaces-temps de la ville ?

Janvier 2002

Préparé pour le Plan Urbanisme Construction Architecture,
Pôle Sociétés Urbaines, Habitat et Territoires
Michel BONNET.

Rédigé par : Iragaël JOLY (LET)

Equipe de recherche :

Yves CROZET (LET)

Patrick BONNEL (LET)

Iragaël JOLY (LET)

Charles RAUX (LET)

Sommaire

INTRODUCTION.	3
LA DÉMARCHE DE ZAHAVI.	6
A. Introduction à la théorie du consommateur.	9
1. La représentation des choix du consommateur.	10
2. La valeur du temps.	17
3. La solution du consommateur : le choix optimal.	23
B. Le modèle UMOT.	25
1. La fonction d'utilité du transport.	25
2. Les variables du UMOT.	26
3. L'additivité de la fonction d'utilité du transport.	27
4. La spécification de la fonction d'utilité.	29
5. Détermination du niveau d'équipement du ménage.	34
C. Conclusion du UMOT.	44
MISE EN PRATIQUE DU UMOT.	47
A. Définitions des termes et mesures.	47
1. Le choix du ménage comme unité d'observation.	47
2. La mesure de la demande de transport, des budgets temps et des budgets monétaires de transport.	48
B. Le UMOT Process.	56
C. L'observation de la constance des budgets temps et monétaires.	62
1. La naissance de l'hypothèse de constance des budgets temps de transport.	62
2. L'analyse empirique des budgets temps et monétaires de transport par Zahavi.	62

CRITIQUE DE ZAHAVI AU TRAVERS DES CRITIQUES DE LA MÉTHODOLOGIE DE LA MODÉLISATION DES TRANSPORTS.	79
A. Débat sur la méthodologie de la modélisation dans le transport quotidien urbain.	80
1. La modélisation économique en transport.	80
2. Situation de Zahavi dans le débat.	84
B. Critique de Zahavi.	86
1. L'abstraction : Choix de la théorie de l'utilité - améliorabile par la demande dérivée et par l'utilité aléatoire.	86
2. La généralisation.	88
3. Conclusion des critiques théoriques.	93
CONCLUSION.	95
TABLE DES TABLEAUX ET DE ILLUSTRATIONS.	100
BIBLIOGRAPHIE.	101

INTRODUCTION.

A la fin de l'année 2000, les Transports en Commun Lyonnais adoptaient une nouvelle campagne publicitaire lors de l'ouverture de la nouvelle ligne de métro. L'affiche demandait aux usagers : « *Que ferez vous du temps gagné ?* » et proposait l'alternative : travail ou loisir. Cependant, l'alternative du transport est mise en avant par certains économistes du transport. En effet de nombreuses études, semblent indiquer que les gains obtenus grâce à l'amélioration des systèmes de transports (en terme de coûts et de vitesse) sont réinvestis dans du transport. Les budgets temps et le revenu libérés seraient donc directement réutilisés à des fins de déplacements.

Au cœur des comportements de mobilité, les budgets temps de transport, composante essentielle du coût généralisé de transport, permettent d'analyser une part des comportements de mobilité, ainsi que certaines dynamiques urbaines. Jusqu'à présent, les budgets temps de transport ont souvent été considérés (et observés) relativement constants dans le temps et similaires entre villes. Le concept des « *budgets temps de transport constants* » est répandu sous le nom de la *Loi de Zahavi*, du nom du chercheur pour la Banque Mondiale, qui, à la fin des années 1970, forge l'hypothèse de constance des budgets temps de transport et l'intègre dans un modèle d'économie des transports. Ce que nous préférons appeler ici la « *conjecture de Zahavi* » est composée des quatre éléments suivants :

1. Au niveau agrégé d'une ville, la constance des budgets temps de transport moyens est transférable dans le temps et l'espace. Ainsi, la moyenne des temps de déplacements effectués à l'échelle d'une agglomération semble constante sur une période d'une trentaine d'années et similaire entre villes de pays développés.
2. Les gains de temps réalisés grâce aux améliorations des vitesses moyennes de transport sont réinvestis, non pas dans d'autres activités mais dans du temps de transport. Ainsi l'accroissement des distances parcourues peut être analysée par la simple relation vitesse/temps/distance.
3. Les budgets monétaires de transport sont, de la même façon que les budgets temps de transport, constants dans le temps et l'espace lorsqu'ils sont examinés en part relative du revenu disponible.
4. Enfin, la modélisation du comportement de déplacement par un modèle micro-économique donne de bons espoirs quant à la représentation des décisions de transport

La "Loi de Zahavi".

par la maximisation d'une fonction d'utilité sous contraintes. En effet, Zahavi, se base sur la régularité des dépenses de transport (monétaires et temporelles) pour construire un modèle dans lequel la demande de transport est déterminée par la maximisation de la fonction d'utilité du transport sous les deux contraintes pesant sur l'unité décidante : la contrainte du temps disponible et la contrainte du revenu disponible.

Alors que les limites de l'interprétation de la conjecture de Zahavi résident essentiellement dans son caractère agrégé, elle n'en reste pas moins fort utile pour comprendre et analyser les phénomènes tels que l'étalement urbain, la pluri-centralité des villes, ou la généralisation de la journée continue. La constance des budgets temps de transport doit être comprise comme une régularité dans la moyenne d'une caractéristique du comportement d'un individu moyen représentatif de la population d'une ville. Cette moyenne dissimule en revanche des disparités, mais aussi d'autres régularités à des niveaux moins agrégés.

Les objectifs de la recherche proposée ici, sont structurés autour de trois axes :

- 1- Etablir une revue des discours scientifiques établis et basés sur la notion des budgets de transport, tant dans les voies théoriques qu'empiriques.
- 2- Une réactualisation des mesures des budgets de transport de plusieurs villes françaises et internationales, en fonction de la disponibilité des données.
- 3- La production d'analyses des budgets de transport à des niveaux d'agrégation différents, dans le but d'identifier les disparités et régularités à l'œuvre dans les populations et sous-populations.

Ces travaux devraient aboutir à la construction d'un cadre d'analyse permettant d'infirmer ou non la conjecture de Zahavi, de décomposer le processus de la mobilité afin d'éclairer les mécanismes actifs au sein de ce dernier. Ainsi il sera traité des questions relatives à la transférabilité temporelle et spatiale de la constance des budgets de transport (temporels et monétaires), de ses différents niveaux d'interprétation et d'application.

La "Loi de Zahavi".

Dans le cadre de ce premier rapport de recherche, le travail de Zahavi sera étudié afin d'énoncer clairement la conjecture de Zahavi, de comprendre les objectifs de son travail. Dans un second temps, le rapport tentera de construire un premier cadre de réflexion sur la signification et les interprétations d'une régularité de comportement. Enfin, quelques pistes de critiques seront apportées par le croisement du système de réflexion sur les régularités, les critiques théoriques établies sur le travail de Zahavi et d'autres travaux empiriques relatifs aux budgets de transport.

LA DEMARCHE DE ZAHAVI.

Dans son approche, Zahavi veut mettre en relation les trois dimensions du transport urbain quotidien, qui sont : la demande de transport, le système d'offre de transport, et la structure urbaine. L'étude de la demande de transport se concentrera sur l'explication des choix des individus, ou des ménages, en fonction de leurs caractéristiques (les caractéristiques sociales, comme le revenu, la taille du ménage, le niveau de motorisation, etc. ; les goûts, qui définissent les préférences) et en fonction des disponibilités ou des contraintes apportées par les deux autres dimensions. Le système d'offre repose essentiellement sur le niveau d'infrastructure disponible (la densité de routes, la vitesse du réseau). Enfin la structure urbaine considérera, par rapport à la distance au centre, les répartitions spatiales de la population, des ménages, des emplois et des revenus.

Dans cet objectif, Zahavi développe un modèle économique s'appuyant sur les fondements de la micro-économie, qui tente de formaliser les interactions existantes entre les trois dimensions du transport. Les choix individuels y sont représentés à l'aide du modèle économique du consommateur (ou théorie de l'utilité). Les décisions individuelles sont reconstituées au travers d'une formalisation mathématique de son comportement décisionnel. Même si l'application du modèle du consommateur comme outil de base pour l'analyse dans le secteur du transport est à l'origine de nombreux développements dans les années soixante et suivantes, elle n'en reste pas moins critiquée et à améliorer. Un apport considérable à cette approche est le passage à une approche stochastique, plutôt que déterministe (Ben Akiva, Lerman (1985, 1976) ; McFadden, Domencich (1975) ; Manheim (1984)). Cette transition est inspirée des travaux de psychologie, qui mettaient en évidence la non réflexivité et la non transitivité des choix. Ainsi, Ben Akiva (Ben Akiva, Lerman, 1985) ou McFadden (Prix Nobel 2000 pour ses travaux sur les choix discrets) (Domencich, McFadden, 1975) introduisent l'hypothèse du comportement probabiliste, qui traduit une connaissance insuffisante du processus de décision de l'individu, les variations non observées entre les décideurs ou entre les attributs des alternatives proposées.

Le modèle du consommateur a été fréquemment utilisé dans les modèles de prévision de demande des années 70 (Quandt et Baumol, 1966, Shunk et Bouchard, 1970, pour le choix modal ; Niedercorn et Bechdolt, 1969, Beckmann et Golob., 1972, Golob et al., 1973, pour la génération et la distribution des déplacements ; Beckmann et al., pour le niveau d'équipement

automobile). Zahavi s'inscrit donc dans un courant de recherche relativement novateur pour l'époque, en introduisant une légitimité théorique dans son approche au niveau de l'individu. Avec ces fondations théoriques fortes, la formalisation adoptée par Zahavi pourra se développer et répondre, au moins en partie, aux exigences de la modélisation. Comme nous le verrons plus en détail, Zahavi se positionne à l'intersection de deux voies de recherche : la première pourrait être qualifiée de voie du *praticien*, la seconde de voie du *scientifique*. Cette distinction dans les techniques de modélisation utilisée par Polak (1987) sous les termes de « *scientific* » et « *operational models* », constitue le conflit entre les deux objectifs des modèles :

- 1) Le premier est de représenter et de comprendre le phénomène analysé, en travaillant à un niveau d'abstraction et de généralisation le plus élevé possible.
- 2) Le second est d'aboutir à un outil de prévision du phénomène opérationnel.

Cet objectif d'applicabilité du modèle est en opposition avec certaines nécessités de la voie dite scientifique. Bien souvent, pour obtenir des résultats prévisionnels significatifs, le phénomène analysé reste dépendant de dimensions géographiques ou temporelles, et ne décrit pas forcément les liens de causalité tels qu'ils le sont dans la réalité. A l'inverse, le niveau d'abstraction requis pour construire un modèle explicatif, empêche ce modèle de constituer un bon outil de prévision, car il doit se détacher d'un cadre réel, et bien souvent il ne se concentre que sur l'un des aspects du phénomène.

Dans sa démarche, Zahavi tente de lier les deux objectifs (pratique et scientifique) en utilisant l'analyse de données pour mettre à jour une régularité de comportement dans le transport individuel urbain et quotidien et en construisant un modèle théorique de demande (modèle UMOT¹) autour de cette régularité. Les résultats de ce modèle théorique permettent ensuite d'établir un outil pratique : le *UMOT Process* qui reprend les principes et les relations mises en lumière dans le modèle théorique, pour lier les variables observées et déterminer les caractéristiques de la mobilité.

¹ Unified Mechanism Of Travel (1979).

La "Loi de Zahavi".

Afin de pouvoir analyser la démarche du modèle UMOT, ainsi que l'articulation entre l'observation de la constance des budgets de transport et le modèle théorique, une introduction des notions primaires de la théorie de l'utilité est nécessaire. Ensuite, nous verrons l'exposé du modèle en lui même. Ainsi, le lecteur rompu aux notions de l'analyse micro-économique pourra survoler la partie suivante jusqu'à la question de la valeur du temps (p.18), et sans plus tarder, porter son attention sur la partie deux du rapport présentant le modèle UMOT.

A. Introduction à la théorie du consommateur.

La micro-économie est la branche de l'économie qui étudie les actions économiques des individus ou des groupes d'individus. Elle se concentre notamment sur l'analyse des prix psychologiques individuels et de ceux du marché, ainsi que sur l'allocation de ressources spécifiques à des usages particuliers. Dans les théories micro-économiques, la richesse de l'individu résulte de l'échange ou de la vente sur le marché de ses facteurs de production. La confrontation sur le marché des offres et demandes de facteurs de production de l'ensemble des individus détermine un prix d'équilibre de marché. Enfin, c'est en fonction des prix d'équilibre et des préférences individuelles, que chaque individu choisira de vendre certaines quantités de facteurs de production. Le facteur de production dont dispose le plus souvent un individu est son travail, qui peut, par exemple être mesuré en temps de travail, en effort, en unités produites, etc. La vente de son travail apporte au consommateur les ressources nécessaires à la réalisation de ses autres choix sur le marché, dont essentiellement la consommation de biens et services. Ainsi en excluant tous les biens qui n'ont pas de prix sur le marché, nous pouvons considérer que le premier choix du consommateur est de déterminer son revenu, et donc la quantité de facteurs de production qu'il vend, en fonction de ses objectifs : comment il souhaite allouer son budget, dépenser son revenu et répartir ses consommations. Le facteur « travail » d'un individu peut être mesuré par le temps de travail. Il peut être considéré que le premier choix de consommation est l'allocation du temps au sein de l'arbitrage temps de travail et temps disponible pour d'autres activités. D'autres approches privilégieront l'aspect indirect de la consommation de temps pour les activités. Il est évident que les deux sont complémentaires. La première nous permet toutefois d'articuler les notions de revenu et de temps disponibles et de les déterminer dans cette première étape. La seconde étape considère alors le revenu et le temps comme exogènes dans le processus d'allocation de ressources aux consommations possibles, dont le temps.

Au terme d'une présentation introductive de principes de théorie micro-économique, un modèle simple d'allocation du temps de travail sera présenté afin d'illustrer ces notions de théorie du consommateur.

1. La représentation des choix du consommateur.

Le modèle économique du consommateur repose sur l'hypothèse que les individus choisissent ce qu'il y a de meilleur parmi ce qui leur est accessible, c'est-à-dire que les consommateurs ont des comportements de choix rationnels. Cela implique que chaque individu est pleinement informé des opportunités accessibles, et qu'il est capable de les évaluer. Le concept de choix de la meilleure alternative est représentable par un système de préférences, qui permet de classer ces opportunités en fonction de leur attrait respectif. Tout consommateur est donc doté d'un système de préférences permettant d'identifier ce qui le satisfait le plus.

Cependant un certain nombre d'hypothèses est nécessaire pour garantir la rationalité des préférences du consommateur. Ces hypothèses fondent la théorie du consommateur et ont pouvoir d'axiomes.

a) Axiomes de la théorie du consommateur ou rationalité du consommateur.

La rationalité du consommateur est l'hypothèse selon laquelle le consommateur est rationnel dans ses choix par rapport aux alternatives qui se présentent à lui. Ses classements font preuve d'une cohérence interne, ses préférences définissent alors un préordre complet sur l'ensemble des alternatives possibles. Afin de s'assurer de l'existence du meilleur choix d'un individu, ses préférences doivent vérifier trois des axiomes de la théorie du consommateur.

Axiome de complétude : cet axiome suppose que toutes les alternatives sont comparables, le consommateur est capable de faire un choix.

Axiome de réflexivité : toute alternative est au moins aussi désirable qu'elle-même. Sous cette hypothèse purement mathématique, le consommateur est indifférent entre une alternative et une copie d'elle-même.

Axiome de transitivité : si le consommateur estime que l'alternative $A1$ est au moins aussi désirable que l'alternative $A2$, et que $A2$ est au moins aussi désirable que $A3$, alors $A1$ est au moins aussi désirable que $A3$.

La "Loi de Zahavi".

Les deux premiers axiomes répondent à un simple besoin de logique. Le choix existe par la complétude. La réflexivité empêche un individu de différencier deux alternatives parfaitement identiques. Le dernier axiome assure, par constitution d'un ordre, l'existence du meilleur choix. Il exclut l'existence de situation cyclique, où $A1$ sera préférée à $A2$ qui sera préférée à $A3$, mais $A3$ sera préférée à $A1$. Ainsi sous ces trois axiomes, les préférences du consommateur seront rationnelles.

La rationalité des individus permet d'établir un ordre, propre à chaque consommateur, parmi l'ensemble des alternatives qui lui sont présentées. La théorie micro-économique suppose que cet ordre peut être représenté par une fonction mathématique : la fonction d'utilité du consommateur.

b) La fonction d'utilité comme représentation mathématique des préférences.

La fonction d'utilité est un outil mathématique permettant de reconstituer le classement des alternatives établi par un individu en fonction de ses préférences. Cette fonction attribue une valeur aux différentes alternatives, de telle sorte que les options les plus désirables reçoivent des valeurs supérieures à celles qui le sont moins. La représentation des préférences par une fonction numérique continue sera mathématiquement possible si ces préférences sont rationnelles et continues (axiomes de complétude, réflexivité, transitivité et continuité) (Debreux 1959).

Axiome de continuité : il signifie, que si une suite d'alternatives $(A_i, i \in \mathbb{N})$ est au moins aussi désirable que l'alternative A c'est-à-dire que chaque alternative A_i est au moins aussi désirable que A . Et si cette suite converge vers une alternative A^* (la séquence d'alternatives tend à ressembler, à se rapprocher par leurs caractéristiques de l'alternative A^*), alors l'alternative A^* est au moins aussi désirable que A . Ou plus simplement, si A^* est au moins aussi désirable que A , alors toute alternative suffisamment proche de A^* sera au moins aussi désirable que toute autre alternative suffisamment proche de A .

Sans cette hypothèse, si les préférences ne sont pas continues, la fonction d'utilité pourrait être indéterminée en certains points de l'ensemble des alternatives. La continuité du système de préférences assure la continuité de la fonction d'utilité, ainsi que sa dérivabilité.

La "Loi de Zahavi".

Le concept d'utilité est donc un concept ordinal, représentant l'ordre des alternatives. Il faut souligner le caractère relatif et non absolu de la représentation produite par la notion d'utilité. La fonction d'utilité reflète un classement et non un niveau de satisfaction. La valeur attribuée à une alternative ne signifie rien en elle-même, car c'est par comparaison entre les valeurs que la fonction d'utilité attribue aux alternatives que l'on peut situer ces dernières les unes par rapport aux autres dans l'échelle des préférences de l'individu. Ainsi toutes les fonctions mathématiques qui reproduiront l'ordre des préférences pourront être indifféremment utilisées. De fait, toute transformation monotone croissante d'une fonction d'utilité constitue une représentation équivalente du même système de préférences.

Les alternatives les plus fréquentes auxquelles le consommateur fait face sont des paniers de biens et de services. Une grande partie de ces alternatives sont supposées désirables, ce qui signifie que la satisfaction de l'individu lors de la consommation de tels biens, est croissante avec la quantité qu'il en consomme. Cela se traduit pour les préférences en l'axiome de monotonie :

Axiome de monotonie : la satisfaction d'un individu croît lorsque la quantité d'un bien qu'il consomme augmente. Cet axiome signifie aussi que le consommateur apprécie d'avoir une unité supplémentaire d'un bien, il s'agit là de la non-saturation des préférences.

Par opposition, les biens non-désirables sont ceux pour lesquels la non-saturation et la monotonie ne sont pas vérifiées comme par exemple la pollution, les nuisances, etc.

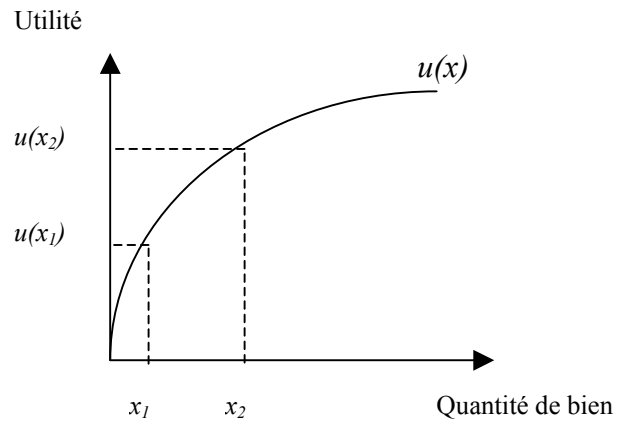
La monotonie implique aussi au niveau de la fonction d'utilité que sa dérivée partielle première par rapport à un bien désirable est positive, c'est-à-dire que l'utilité est croissante avec la quantité du bien consommée et que l'utilité marginale est positive. De plus, la théorie micro-économique se limite le plus souvent à des formes fonctionnelles aboutissant à une utilité marginale décroissante, c'est-à-dire que l'apport des unités supplémentaires diminue après chaque ajout. Ceci se traduit aussi par la convexité des préférences, qui représente le goût de l'individu pour la diversité, ainsi que par la concavité de la fonction d'utilité, puisque l'utilité marginale décroissante signifie que la dérivée seconde de la fonction d'utilité est négative.

Ainsi la fonction d'utilité est une fonction monotone croissante et concave de ses arguments.

La "Loi de Zahavi".

Graphiquement, une fonction d'utilité sur un espace de consommation réduit à un unique bien désirable est de la forme :

$u(x_2) > u(x_1)$
 \Leftrightarrow
 x_2 est strictement préféré à x_1



Enfin, une dernière hypothèse sur la forme fonctionnelle de la fonction d'utilité est souvent faite : l'homogénéité de degré 1. L'homogénéité de degré 1 d'une fonction f signifie que $f(tx) = tf(x)$, pour tout t positif. Il ne s'agit là que d'une transformation monotone d'une fonction, or les fonctions d'utilité sont définies à une transformation monotone près. Multiplier la fonction d'utilité par une constante positive, n'altère pas la représentation des préférences, ni le classement établi entre alternatives.

Afin de pouvoir construire un modèle économique permettant de représenter le comportement de choix d'un individu, la théorie micro-économique établit quatre hypothèses sur la rationalité de cet individu. Sous les hypothèses de complétude, de réflexivité, de transitivité, et de continuité des préférences de l'individu, il sera possible de représenter mathématiquement le préordre complet sur les différentes alternatives défini par les préférences de l'individu. Pour l'analyse du cas régulier où le bien consommé apporte une utilité positive à l'individu, la fonction d'utilité décrivant les préférences de l'individu doit satisfaire deux hypothèses : la monotonie et la concavité. Ainsi, à l'aide d'une fonction mathématique : la fonction d'utilité, une approximation des choix individuels pourra être conduite.

La "Loi de Zahavi".

c) La maximisation de l'utilité.

Le consommateur rationnel choisit l'alternative qu'il préfère. C'est donc l'alternative qui lui procure la plus grande satisfaction, la plus grande utilité. Et comme nous l'avons vu, le choix de l'individu est contraint par son ensemble de ressources disponibles.

Cette démarche peut être représentée mathématiquement par un programme de maximisation sous contraintes. La fonction d'utilité sera donc maximisée sous les contraintes de disponibilité des biens (quantités disponibles sur le marché) et de ressources de l'individu (quantités accessibles par le consommateur).

Afin d'illustrer ces théories, nous nous proposons d'étudier le choix d'allocation du consommateur que nous avons qualifié de « primaire » : l'arbitrage entre le temps de travail et donc le revenu, et le temps de loisirs.

d) L'exemple travail-loisir.

Dans cet exemple, très simplifié et simplificateur, les individus ont en général leur seule force de travail à vendre pour acheter des biens. L'individu alloue donc une part de son temps disponible à son travail et une autre part à ses loisirs. Sa satisfaction et par conséquent son utilité sont des fonctions du produit de son travail : le revenu y et de son temps de loisir L .

La fonction d'utilité est donc définie par :

$U = g(L, y)$, où g est la fonction mathématique qui attribue une valeur correspondant au niveau utilitaire des couples (L, y) .

L'individu doit donc réaliser un choix entre les deux biens L et y . Pour l'analyse de cet arbitrage, nous pouvons introduire les concepts d'utilité marginale et de taux marginal de substitution.

e) Utilité marginale et taux marginal de substitution.

L'utilité marginale est la satisfaction apportée par une unité supplémentaire de bien dans le panier de consommation du consommateur. La valeur de l'utilité marginale représente l'incrément d'utilité qu'obtient le consommateur lorsqu'à partir d'une situation donnée, d'un panier de biens donné, il reçoit « gratuitement » une unité supplémentaire d'un bien. Ce montant est déterminé par la valeur de la dérivée partielle de la fonction d'utilité par rapport au bien considéré, prise au point correspondant au panier de biens initial.

La "Loi de Zahavi".

Le taux marginal de substitution est par définition le prix subjectif ou prix psychologique que le consommateur attribue aux biens les uns par rapport aux autres. Si, à partir d'une situation initiale, le consommateur perd une unité de bien de son panier de consommation, son utilité sera réduite de l'utilité marginale de ce bien. Nous dirons que le consommateur est alors prêt à céder un certain montant de l'autre bien pour ne pas perdre cette unité. Et il acceptera l'échange tant que la perte d'utilité qui découlera de cette cession sera inférieure ou égale à la perte d'utilité encourue. Le consommateur compare donc les utilités marginales entre elles, pour échanger sur le marché et déterminer ses quantités consommées à l'équilibre.

Mathématiquement, l'utilité marginale du loisir est définie par la dérivée partielle de la fonction d'utilité par rapport à L : $Um_L = \frac{\partial U}{\partial L}$. Il en est de même pour l'utilité marginale du

revenu : $Um_y = \frac{\partial U}{\partial y}$

Le consommateur accepte tout échange dans la mesure où celui-ci n'aggrave pas sa situation, son utilité. Ainsi il accepte de céder une unité de bien contre une quantité d'un autre bien, définie par rapport aux utilités marginales de chacun des deux biens.

Pour que le niveau d'utilité du consommateur ne soit pas modifié, il faut résoudre l'équation :

$$dU = Um_L \cdot dL + Um_y \cdot dy = 0 \quad , \text{ où } dL \text{ et } dy \text{ sont les quantités de biens échangées.}$$

Le taux marginal de substitution est défini de la façon suivante : pour que l'individu accepte de céder une unité d'un bien, il faut le compenser de la perte d'utilité qui en résulte, en lui offrant en échange une quantité suffisante de l'autre bien. Dans notre exemple, la perte d'une unité de loisir ($dL = -1$) diminue l'utilité du consommateur d'un montant égal à Um_L . Mais il faut que son différentiel d'utilité entre les deux situations soit nul : $dU = 0$. Ainsi la résolution de $dU = Um_L \cdot dL + Um_y \cdot dy = 0$, nous indique que la quantité dy à offrir en échange d'une quantité dL , doit être telle que :

$$dy / dL = - \frac{Um_y}{Um_L} .$$

La "Loi de Zahavi".

Dans le cas où l'échange porte sur une unité de loisir à céder, ($dL = -1$), dy doit être égale au rapport des utilités marginales : Um_y / Um_L .

En définitive, la micro-économie représente mathématiquement le comportement du consommateur en supposant que ce dernier prend ses décisions dans le but d'obtenir la plus grande satisfaction possible à partir de son univers des choix possibles. Une fonction d'utilité représente les goûts des individus, leur satisfaction. L'univers des choix représenté en micro-économie admet essentiellement pour limites les contraintes qui pèsent sur les ressources de l'individu. Mais de plus en plus, la recherche y intègre des dimensions telles que l'organisation géographico-temporelle des activités, la structure du ménage et sa localisation résidentielle, ou encore le rôle de l'individu dans ce ménage. De plus, d'autres facteurs plus « subjectifs » peuvent être considérés parce qu'ils définissent une accessibilité « sociale » ou « psychologique », par opposition à l'accessibilité « physique »². Enfin, comme nous l'avons vu, les outils mathématiques permettent d'observer, mais aussi de quantifier les grandeurs en concurrence dans les mécanismes d'arbitrage du comportement décisionnel du consommateur.

Dans notre exemple travail-loisir, l'utilité du consommateur est fonction du temps de loisir (L) et du revenu (y) : $U = g(L, y)$. Et les limites de l'univers des choix du consommateur sont composées des seules contraintes qui pèsent sur la richesse du consommateur, à savoir son temps disponible pour son travail et la rémunération du travail.

C'est dans ce cadre que le consommateur va faire un choix d'allocation de son temps, en arbitrant entre temps de travail et temps de loisir. Cela est représenté dans la théorie micro-économique par un programme de maximisation de la fonction d'utilité sous les contraintes de temps et de revenu.

² BROG et al, (1977), TARRIUS, (1978), HANSON, (1979), cités ANDAN O et al, (1994), *Mouvements, déplacements, transport : la mobilité quotidienne*, dans « Encyclopédie d'Economie Spatiale », sous la direction de J.-P. AURAY et al, Economica.

La "Loi de Zahavi".

La valeur que l'individu attribue à son temps est donc centrale dans son choix, car elle est à la fois la variable contrainte, la ressource et la variable de choix. La place prépondérante du temps dans notre exemple primaire ainsi que le concept de budget temps de transport introduit par Zahavi, nécessitent d'éclairer le traitement économique de ces notions de temps et de valeur du temps.

L'introduction des mathématiques dans l'analyse économique des choix individuels permet d'apporter une dimension plus « scientifique », et de formaliser les raisonnements. Sous les hypothèses énoncées précédemment, les choix seront représentés par une fonction mathématique. Il sera alors possible à partir de l'étude de cette fonction de quantifier nombre des relations existantes entre les variables intervenant dans le processus décisionnel de l'individu. Enfin, à partir de l'exemple de l'allocation du temps entre les activités de travail et de loisir, la notion de la valeur du temps apparaît comme primordiale.

2. La valeur du temps.

Une première contrainte apparaît lors de la vente du facteur travail : la contrainte de temps, l'individu ne pouvant vendre plus de 24 heures par jour, ni même plus que le temps qu'il lui reste après avoir répondu à ses besoins primaires (sommeil, nourriture, etc.). Ainsi, le temps disponible (T) sera réparti entre le loisir (L) et le travail (W) : $T = L + W$. Le temps est ici, pour le consommateur, une ressource rare. Il vend son travail à un taux de r , soit : $y = r \cdot W$. La théorie micro-économique faisant ici l'hypothèse que le consommateur n'a pas de poids suffisant sur le marché pour pouvoir influencer le prix de vente du travail. C'est une des hypothèses qui forment la concurrence parfaite, selon laquelle tous les individus, producteurs comme consommateurs, présents sur le marché sont anonymes et égaux en terme d'entrée ou de sortie du marché, d'information, et de pouvoir de marché.

Le résultat dépendra de la valeur que le consommateur attache au loisir par rapport à celle qu'il attribue à son travail. Comme nous l'avons vu, le consommateur évalue la valeur

La "Loi de Zahavi".

d'une unité de bien en fonction de l'utilité, de la satisfaction que celle-ci peut lui apporter. Mais, comme nous l'avons expliqué, la valeur d'une unité d'un bien, l'utilité marginale, n'est pas fixe, et elle dépend de la situation du consommateur au moment où il évalue la valeur de cette unité. L'utilité marginale n'est que la valeur psychologique d'une unité de bien pour un individu donné, dépendante de la situation de l'individu et surtout de ses préférences. La comparaison des valeurs attribuées à une unité de bien par deux individus distincts n'est pas possible avec le concept d'utilité marginale, puisque chacun possède ses préférences propres, sa propre échelle de mesure. Il est nécessaire, pour effectuer une comparaison, de déterminer une unité de mesure pour l'évaluation d'une unité de bien. Le taux marginal de substitution, présenté plus haut permet d'exprimer les valeurs relatives des biens, et de les exprimer en terme d'unités de bien.

Dans notre exemple, l'individu fera ses choix en fonction de la valeur relative de son temps de loisir par rapport à son temps de travail.

La théorie micro-économique définit le concept de la valeur du temps comme la valeur personnelle d'une unité de temps pour un individu. Basée sur la notion de taux marginal de substitution, la valeur qu'un individu accorde au temps est en fait le montant minimum nécessaire pour que cet individu accepte d'échanger une unité de son temps contre un autre bien.

Dans notre exemple d'arbitrage travail-loisir, l'utilité est donnée par le bien « loisir » et le bien « revenu » : $U = g(L, y)$. En conséquence, la valeur d'une unité de temps de loisir est le rapport des utilités marginales vu précédemment : $\frac{Um_y}{Um_L}$. Ce rapport indique la quantité minimum de revenu qu'il faut offrir à l'individu pour qu'il accepte de perdre une unité de temps de loisir.

Une telle définition de la fonction d'utilité possède deux atouts :

- La comparaison du temps de loisir au niveau de revenu permet d'exprimer le taux marginal de substitution du loisir (la valeur du temps de loisir) en terme de revenu, donc en unité monétaire. Les comparaisons entre individus acquièrent alors un sens. A un instant donné, et donc à des situations individuelles définies, il est possible de déterminer quel individu valorise le plus son temps. Par exemple, cela peut permettre de déterminer qui est susceptible de tirer profit d'une infrastructure diminuant les temps de déplacements (par

La "Loi de Zahavi".

exemple une voie rapide ou une autoroute), ainsi que le nombre d'usagers, notamment en fonction du niveau de péage. Les comparaisons avec les résultats des autres méthodes d'approximation et d'estimation de cette valeur du temps sont également possibles.

- La comparaison du loisir au revenu, produit du travail, permet de détecter d'éventuels déséquilibres entre les rémunérations réelles du travail et la valeur psychologique du travail. Au travers du temps de travail, sa rémunération est mise en relation avec les autres activités. Il est alors possible, entre autre, de comparer la valeur comportementale du temps de travail, qui est déterminée avec l'utilité du consommateur, à la rémunération réelle du travail. Il s'agit en fait de comparer le taux marginal de substitution entre temps de travail et les autres activités au taux de rémunération du travail.

Les estimations de cette valeur du temps sont centrales dans les évaluations de projet. Notamment dans le domaine du transport où les projets ont essentiellement pour objectifs des améliorations de vitesse et donc des gains de temps. La rentabilité de ces projets est fortement tributaire du gain social apporté par ces économies de temps. Le niveau d'usage futur d'une infrastructure sera estimé par des modèles de prévision de demande d'où une valeur du temps peut être déduite.

Dans les modèles appliqués de prévision de la demande, tels que celui de Zahavi, la valeur du temps consiste en une « batterie de paramètres » dont la valeur est déterminée en ajustant les résultats du modèle à la situation constatée. Cependant ces résultats sont fortement dépendants des variables explicatives et des formes mathématiques utilisées. En plus de cette diversité de représentation, la diversité des marchés étudiés accroît la particularité de chaque résultat, ce qui réduit d'autant plus la transférabilité des paramètres des modèles. Dans le champ des modèles de transport, les cas particuliers sont nombreux en raison de la diversité de l'offre selon les caractéristiques des réseaux, de la diversité des comportements des usagers selon la période, le pays, la région, et de la diversité des modèles utilisés pour les reproduire. Enfin les sources d'erreurs sont nombreuses, pouvant être liées à l'incertitude même des hypothèses des modèles, mais aussi au problème apparaissant lorsqu'une variable est influente en terme de surplus (utilité) et d'évaluation de la valeur du temps, mais de peu d'importance vis-à-vis des objets estimés.

La "Loi de Zahavi".

Enfin, la valeur du temps peut être approchée par les méthodes de préférences déclarées. Ces méthodes permettent un meilleur contrôle des variables dont les effets peuvent être isolés. Mais elles font face à d'autres problèmes : les déclarations concernant les dispositions à payer ont un caractère fictif, les valeurs cherchées ne sont pas directement déterminées par les questionnaires, et même, les valeurs obtenues par des mises en situation d'arbitrage découlent de modèles interprétatifs.

Dans la pratique, les modèles utilisés sont très divers, avec des différences tant en fonction de la nature du problème traité que des données disponibles. Il en résulte des valeurs du temps tant agrégées que désagrégées, par mode ou par motif, dont les formulations mathématiques divergent.

Dans le rapport de juin 2001 du Commissariat Général au Plan, il est proposé pour les milieux urbains « une méthode d'évaluation de la rentabilité des projets qui, tout en se fondant sur les résultats des études de trafics en termes de gains de temps et de flux de trafics, met ensuite en jeu des valeurs du temps normalisées ». Basé sur la volonté d'intégrer les connaissances, accumulées par les modèles, sur le comportement des usagers et d'aboutir à une procédure unifiée de valorisation du temps, le barème, présenté dans le *tableau 1*, est proposé :

Tableau 1 : Valeur du temps proposée en milieu urbain par voyageur (euros 1998/h)

Motif de déplacement	% du coût salarial	% du salaire brut	France entière (euros 1998/h)	Ile-de-France (euros 1998/h)
Déplacement professionnel	61 %	85 %	10,5 €	13 €
Déplacement Domicile-travail	55 %	77 %	9,5 €	11,6 €
Autres déplacements (achat, loisir, tourisme, etc.)	30 %	42 %	5,2 €	6,4 €
Lorsqu'on ne dispose pas du détail des trafics par motifs, prendre une valeur moyenne pour tous les déplacements	42 %	59 %	7,2 €	8,8 €

(Source : étude du tunnel de Prado-Carénage dans le rapport du Commissariat au Plan (juin 2001))

Certaines des caractéristiques et tendances récurrentes dans les différentes études antérieures sont soulignées dans ce rapport. Les résultats les plus significatifs sont :

- L'analyse par motif indique que la valeur du temps des déplacements à motifs professionnels est proche du coût salarial, qu'elle est supérieure à celle pour motif « domicile-travail », qui est plus élevée que la valeur du temps de loisir. Les valeurs par mode de transport ont pour ordre : la valeur du temps par avion est supérieure à celle du

La "Loi de Zahavi".

« fer 1^{ère} classe », qui est supérieure à la valeur du « fer 2^{ème} classe », elle même supérieure à celle de la « route ». Enfin, pour les déplacements personnels, les valeurs retenues pour les routes et les chemins de fer sont similaires.

- L'élasticité revenu de la valeur du temps comprise entre 0,5 et 1 indique une croissance de la valeur du temps avec le revenu, mais à un rythme plus lent que ce dernier.
- Le temps passé dans les transports urbains est moins valorisé que celui dans les transports interurbains.
- La valeur du temps augmente avec la durée du déplacement.
- La valeur du temps croît avec l'inconfort et double pour les temps d'attente de correspondances ou les temps de marche (effets qualitatifs).

Cependant attacher une valeur à une notion si subjective que le temps reste une tâche difficile. Evans (1972) évoque le problème de la dépendance de la valeur du temps par rapport aux caractéristiques des activités personnelles. La diversité de façons de passer le temps multiplie les valeurs du temps. En effet, la valorisation du temps est dépendante de l'utilisation qu'en fera l'individu mais aussi de la perception qu'il en a.

L'échantillon des activités à comparer est grossi par leurs différences en termes de qualités telles que le confort, l'accessibilité, les contraintes qu'elles impliquent, etc. Cette multiplicité d'éléments pose essentiellement le problème de la mesure de tels facteurs, qui sont, pour la plupart d'ordre qualitatif.

Mais, il ne s'agit là que de la diversité de l'environnement dans lequel évolue un individu et de la quantité de cas possibles à prendre en compte lors d'étude de la valeur du temps. Cet environnement individuel a également un effet important sur la perception du temps par l'individu et donc sur la valorisation du temps. En effet, c'est à l'intérieur de ce cadre que l'individu constitue ses échelles de valeurs, ses préférences. De fait, les situations géographiques, temporelles et sociales affectent le jugement de valeur, tout comme les préférences de l'individu ou la formation historique de son jugement.

Par ses dimensions multiples (spatiales, temporelles, historiques, individuelles, sociales, etc.) la perception du temps par un individu interroge les multiples branches de la recherche scientifique.

Afin de réduire la subjectivité de cette notion, la théorie micro-économique tente de réduire le champ de son observation. L'étude de cas moins généraux permet de diminuer le

La "Loi de Zahavi".

nombre de variables pouvant biaiser les résultats. Ainsi, en se plaçant à un instant donné, l'économiste se déleste des possibles variations de la constitution de la valeur entre des individus à des périodes différentes, et des différences entre situations historiques. La réduction spatiale à un pays, une ville, efface au moins une partie, des influences culturelles nationales, régionales, etc. Enfin l'observation d'individus ayant des portraits sociaux proches (âge, statut social, etc. similaires) permet encore de réduire les différences dans la perception du temps. Mais est-ce que l'approximation de cette valeur est suffisamment proche de la réalité ? La dépendance aux caractéristiques individuelles en terme de préférences, de conditions sociales, de caractéristiques physiques et d'environnement n'est-elle pas trop importante et encore mal appréhendée ?

Il apparaît au regard de ces questionnements introductifs que l'hypothèse de constance des budgets temps de transport est très forte en conséquences, car comment des individus en des lieux différents, à des dates différentes, avec des cultures différentes, etc. peuvent avoir le même comportement moyen vis-à-vis du temps qu'ils consacrent à leurs déplacements quotidiens ? Au travers de cette durée dédiée au transport, l'économie tente de retrouver l'arbitrage réalisé par l'individu au moment de ses choix. C'est dans le but de reconstituer la comparaison des valeurs des biens et ressources, qui sont au centre des choix individuels, que l'économiste « monétarise » l'ensemble de ces variables. Ainsi, lors de la conversion de la durée dédiée au transport en terme monétaire, la stabilité apparente de cette durée, du budget temps de transport, peut s'interpréter comme une stabilité de la valeur du temps dédié au transport, valeur exprimée en terme monétaire. Il apparaît donc une distinction entre le budget temps de transport, qui est la durée dédiée au transport et la valeur du temps de transport, qui est la l'expression monétaire du budget temps de transport.

Dans le *UMOT project*, la forme mathématique retenue pour la fonction d'utilité des individus conduit à une valeur du temps proportionnelle au revenu disponible réduit des dépenses monétaires de transport et inversement proportionnelle au temps disponible après les dépenses temporelles de transport. Les coefficients de ces proportionnalités sont représentatifs des préférences des individus. Ainsi, la forme fonctionnelle du UMOT introduit une petite part de variabilité dans la valeur du temps par la prise en compte de la situation des ressources financières et temporelles de l'individu. Plusieurs des éléments affectant la notion de temps apparaissent au travers de la définition adoptée dans le UMOT : le caractère individuel (les préférences) apparaît dans les coefficients de proportionnalité ; la situation des richesses de l'individu (son revenu et son temps disponibles). De plus, d'après l'hypothèse de constance

La "Loi de Zahavi".

des budgets temps de transport et de sa transférabilité dans le temps et l'espace, les dimensions spatiales et historiques n'ont pas d'effet visible sur la valeur du temps.

3. La solution du consommateur : le choix optimal.

La théorie micro-économique utilise le formalisme mathématique dans le but de représenter le comportement, les décisions. Dans notre exemple, le programme de maximisation représentant le choix du consommateur est le suivant :

$$\begin{aligned} \underset{L,y}{\text{Max}} U = g(L, y) \quad & \text{sous les contraintes (s.c.) : } y = rW \\ & L, y \geq 0 \end{aligned}$$

La présence de la contrainte de positivité de L et y est nécessaire car, dans notre exemple il s'agit de biens réels qui n'admettent que des quantités positives. Cependant, pour ne pas alourdir les calculs de la résolution du programme de maximisation, il suffira de vérifier le signe des solutions analytiquement obtenues.

Par substitution, il est possible de réécrire la fonction d'utilité : $U = g(T - W, rW)$. Les contraintes sont intégrées dans la fonction et la seule variable de choix à déterminer est W , le temps de travail. En effet, en déterminant son temps de travail, l'individu choisit indirectement son revenu, par le biais de la rémunération de son temps de travail, mais aussi, il détermine son temps de loisir comme étant le temps restant, c'est-à-dire la différence entre le temps disponible (T) et le temps de travail (W). Le programme de maximisation est donc réduit à :

$$\underset{W}{\text{Max}} U = g(T - W, rW)$$

Le consommateur réalisera un choix optimum quand les conditions dites de premier et second ordre seront vérifiées. Ainsi, le maximum est atteint quand :

- **conditions de premier ordre :**

$$\left| \begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial W} = -g_1 + g_2 r < 0 \quad & \text{pour } W = 0. \\ \frac{\partial U}{\partial W} = -g_1 + g_2 r = 0 \quad & \text{pour } W > 0. \end{aligned} \right. \quad (\text{II.A.3-1})$$

où g_1 (g_2) indique la dérivée première de la fonction g par rapport à son premier argument (second argument). Ainsi nous nous assurons que, d'une part, si l'utilité

La "Loi de Zahavi".

marginal d'un bien est négative (ce bien est indésirable), alors ce bien n'est pas consommé. Il s'agit alors de ce qui est appelé une « solution en coin ». D'autre part, si le bien est consommé (son utilité marginale a été positive ou nulle pour au moins une unité), alors une unité supplémentaire n'apportera pas de satisfaction supplémentaire, sinon ce n'est pas un équilibre.

- **condition de second ordre** : la dérivée seconde de la fonction d'utilité par rapport à W est négative, ce qui signifie que le résultat est sur une partie concave de la courbe (et non convexe) et qu'il s'agit bien d'un maximum (et non d'un minimum) :

$$\frac{\partial^2 U}{\partial W^2} = g_{11} - 2g_{12}r + g_{22}r^2 < 0 \quad (\text{II.A.3-2})$$

Il apparaît dans l'expression de l'utilité marginale du travail (W), que ce dernier est à la fois désirable, il apporte une satisfaction au consommateur par le biais de la hausse de revenu, de ressources disponibles. Mais il est aussi indésirable car il diminue le temps de loisir de l'individu.

Le système d'équations défini par ces deux conditions fournira une expression des quantités offertes de travail en fonction du prix du travail sur le marché. Il s'agira de la fonction d'offre de travail d'où la fonction de demande de loisir pourra être déduite.

La théorie micro-économique met en place les concepts nécessaires à une analyse et à une représentation des choix des consommateurs. Elle repose sur des hypothèses relativement fortes (rationalité du consommateur, information parfaite, pouvoir de marché nul du consommateur) mais permet de conceptualiser une grande part des raisonnements en se concentrant sur une partie de la réalité. Le but est de représenter une situation sur le long terme. Les résultats proposés dans la théorie sont la résolution de l'équilibre de long terme, lorsque les individus se seront totalement adaptés à leur environnement et aboutiront à une situation qu'ils ne peuvent plus améliorer, une solution maximale. Evidemment, la réalité n'est pas aussi patiente...

La "Loi de Zahavi".

B. Le modèle UMOT.

Très fortement fondé sur la théorie du consommateur, le modèle UMOT de Zahavi est un modèle micro-économique de représentation des choix de transport (distances parcourues, modes utilisés, niveau d'équipement des ménages).

Zahavi définit tout d'abord une fonction d'utilité au niveau du ménage. Le choix du ménage comme unité d'observation se justifie par le besoin de travailler sur la même unité que celle utilisée dans ses analyses empiriques (voir les parties suivantes).

Avec une fonction d'utilité du ménage, il sera possible de représenter les préférences de l'ensemble des individus composant le ménage. Théoriquement, il existe une fonction mathématique qui représente les goûts de l'ensemble du ménage et dont les arguments sont les biens et les services que le ménage est susceptible de consommer.

Le lecteur averse au développement mathématique des modèles économiques, pourra directement se reporter à l'encart de fin de partie qui tentera d'exprimer les principales caractéristiques du modèle en un minimum d'équations.

1. La fonction d'utilité du transport.

Le plus fréquemment, la fonction d'utilité de l'ensemble des biens et des services, est supposée séparable et additive. Il est donc possible de décomposer cette fonction d'utilité générale en plusieurs fonctions. A chaque groupe de biens et services correspondra une fonction d'utilité, et la somme de toutes ces fonctions d'utilité égalera l'utilité totale.

$U = \sum_i u_i$ où les u_i sont les fonctions d'utilité de chacun des i groupes de biens. L'hypothèse théorique sous-jacente est que les individus (les ménages dans le UMOT) déterminent le montant de leurs dépenses dans chacun des groupes de biens et services en fonction des indices de prix de chacun d'eux et de façon à maximiser l'utilité totale sous les contraintes de budgets. Ensuite à l'intérieur de chaque groupe, la même logique de maximisation se répète : le consommateur alloue ses dépenses en chacun des biens composant le groupe de telle manière qu'il maximisera son utilité dans ce groupe, sous la contrainte de la dépense pour ce groupe, déterminée à l'étape précédente.

Il sera supposé que les variations des prix des biens et services sont suffisamment faibles pour ne pas affecter l'allocation de dépense effectuée en première étape.

La "Loi de Zahavi".

2. Les variables du UMOT.

Afin de modéliser le transport, Zahavi définit les groupes de biens suivants :

- la quantité de transport (x) ;
- la consommation de biens et services non-transport ou consommation résiduelle (c) ;
- le temps de loisir (t).

En introduisant les prix des deux biens : x et c , il apparaît que le ménage fait face à une contrainte de budget :

$$p_x \cdot x + p_c \cdot c \leq Y, \quad \text{où } Y \text{ est le revenu disponible du ménage.}$$

De façon similaire, les choix sont contraints par le temps disponible pour l'ensemble du ménage (T) dont les temps de repos et de génération de revenu sont déjà déduits :

$$t_x \cdot x + t \leq T, \quad \text{où } t_x \text{ est le temps par unité de distance parcourue.}$$

Enfin, comme il s'agit là de biens réels et physiques : $x \geq 0, c \geq 0, t \geq 0$.

Puisque les ressources, le revenu et le temps, n'apportent pas, de par leur nature, de satisfaction directe au ménage, ce dernier aura toujours intérêt à consommer l'intégralité de son revenu et de son temps. En fait, cela traduit l'hypothèse simplificatrice selon laquelle l'épargne de ressources n'a pas de valeur « utilitaire », dans la mesure où posséder du temps ou de l'argent n'apporte pas de satisfaction et que le transfert de richesses dans le temps est ici impossible.

Ainsi le ménage sature ses contraintes de ressources, il dépense l'intégralité de son revenu et de son temps. Pour cela, il est nécessaire de supposer en amont, une parfaite divisibilité des unités de biens. Ceci rejoint en quelque sorte l'hypothèse de continuité des préférences du consommateur mais du point de vue de l'offre de biens. La continuité de l'offre et de la demande assure l'existence d'un point d'équilibre des deux.

La somme des valeurs des consommations du ménage est égale à son revenu :

$$p_x \cdot x + p_c \cdot c = Y. \quad (\text{II.B.2-1})$$

Et la somme des durées des activités du ménage est égale à son temps total disponible :

$$t_x \cdot x + t = T. \quad (\text{II.B.2-2})$$

La "Loi de Zahavi".

De chacune de ces deux équations, (II.B.2-1) et (II.B.2-2), il est alors possible de déduire l'expression de la consommation non-transport (c) et du temps de loisir (t) en fonction de x :

$$c = \frac{Y}{p_c} - \frac{p_x}{p_c} x \quad \text{et} \quad t = T - t_x x \quad (\text{II.B.2-3}) \text{ et } (\text{II.B.2-4})$$

Cela signifie que les niveaux de consommation des trois biens sont liés, les proportions entre les quantités de chacun resteront inchangées à niveaux de ressources et de prix donnés (à Y, p_c, p_x et T donnés).

Nous trouvons là une première dimension de l'univers de choix du ménage. Le ménage doit résoudre ses choix dans un ensemble d'alternatives limité par les ressources du ménage. Nous verrons par la suite les autres dimensions, telles que la dimension des différentes alternatives existantes, celles des alternatives autorisées, celles des alternatives acceptées, etc. qui restreignent aussi cet univers de choix dans le modèle UMOT.

Le programme de maximisation que le ménage doit résoudre est donc devenu :

$$\text{Max}_x U = u\left(x, \frac{Y}{p_c} - \frac{p_x}{p_c} x, T - t_x x\right)$$

où les contraintes de temps et de revenu ((II.B.2-3) et (II.B.2-4)) sont intégrées.

3. L'additivité de la fonction d'utilité du transport.

Zahavi suppose que la fonction d'utilité u , est elle aussi séparable et additive en ses arguments. Il existerait donc une décomposition de cette fonction sous la forme :

$$u(x, c, t) = \phi(x) + \varphi(c) + \xi(t)$$

Les utilités du transport, de la consommation non-transport et du loisir sont représentées respectivement par les fonctions $\phi(x)$, $\varphi(c)$, $\xi(t)$. Chacune est la représentation des préférences que le ménage exprime face aux alternatives qui composent chacun des trois groupes (x, c, t). Ces fonctions sont par conséquent monotones, croissantes et concaves.

L'hypothèse d'additivité revient à dire que les taux marginaux de substitution à l'intérieur d'un des groupes de biens (x, c ou t), sont indépendants de ceux d'un autre groupe. Cependant, entre chaque groupe persiste une dépendance au travers de la répartition des ressources parmi les trois groupes (x, c, t), qui dépend des indices de prix généraux de chacun des groupes.

La "Loi de Zahavi".

Nous avons vu précédemment que le problème du ménage pouvait se résumer en un choix du niveau de x , ce qui conduit à un nouveau programme de maximisation :

$$\text{Max}_x U = u\left(x, \frac{Y}{p_c} - \frac{p_x}{p_c} x, T - t_x x\right) = \phi(x) + \varphi\left(\frac{Y}{p_c} - \frac{p_x}{p_c} x\right) + \xi(T - t_x x) \quad (\text{II.B.3-5})$$

L'optimum x^* vérifiera les conditions de premier et second ordre (équations (II.A.3-1) et (II.A.3-2)) énoncées dans notre présentation de la théorie du consommateur.

Il paraît raisonnable de supposer qu'une quantité positive de bien « transport » sera consommée à l'optimum, d'autant plus que la demande de transport est une demande induite par un grand nombre des autres activités. Ainsi les « solutions en coin », où le bien « transport » ne serait pas consommé, sont exclues³.

La quantité optimale : x^* sera telle que : $\frac{du}{dx} = 0$ et $\frac{d^2u}{dx^2} < 0$.

De l'étude des signes des dérivées premières et secondes et des différentielles totales de la fonction d'utilité (II.B.3-5), Zahavi déduit une série de propriétés et de relations théoriques de son modèle qui corroborent la théorie micro-économique :

- Le bien « transport » est un « bien supérieur », la quantité de transport consommée à l'optimum est croissante quand le revenu croît.

$$\frac{dx}{dY} > 0$$

- La quantité de transport consommée à l'optimum est croissante lorsque le temps total disponible croît.

$$\frac{dx}{dT} > 0$$

- La quantité de transport consommée à l'optimum est décroissante quand les coûts de transport augmentent.

$$\frac{dx}{dp_x} < 0$$

- La quantité de transport consommée à l'optimum est croissante en réponse à une amélioration de la vitesse.

$$\frac{dx}{dt_x} < 0$$

Avec cette dernière relation, nous voyons apparaître l'élément central de l'explication de l'accroissement des distances au fil des ans. Sous les hypothèses de ce modèle, les gains de temps qui résultent d'une amélioration des vitesses, « allègent » la contrainte de temps pesant

³ Comme il le sera présenté dans la suite du présent rapport, Zahavi a à sa disposition des données concernant en quasi-exclusivité des individus mobiles, voire même exclusivement motorisés pour certaines villes. De ce fait, l'hypothèse selon laquelle les individus réalisent une distance quotidienne positive peut paraître plus crédible, puisque les données excluent les personnes non-mobiles au moment des enquêtes (ces non-mobiles sont estimés dans les enquêtes ménage françaises à 10-15% de la population, au moment des enquêtes).

La "Loi de Zahavi".

sur la consommation de transport. Cependant, les gains de temps ne sont pas tous directement réinvestis dans du transport. Le consommateur réalise un arbitrage entre le transport et les autres postes de consommation afin d'allouer le gain de temps qui apparaît.

4. La spécification de la fonction d'utilité.

L'étape suivante consiste au choix de la forme fonctionnelle qui sera utilisée pour représenter la fonction d'utilité. Une spécification directe de la fonction peut être évitée si l'on considère que l'utilité est générée au travers de la séquence de choix réalisés parmi les alternatives discrètes possibles. La spécification des différences d'utilités procurées par chacune des alternatives permet alors de déterminer les choix des ménages. Les paramètres pourront être estimés après introduction de « perturbations statistiques » dans les différences d'utilité. Cependant, la modélisation de l'ensemble du comportement décisionnel du ménage nécessite une spécification complète qui permette de tenir compte de séquence (chronologie) dans les choix, ainsi que des combinaisons de choix possibles. De fait le UMOT, spécifiera entièrement une fonction d'utilité, mais utilisera cette technique de différence d'utilité pour déterminer l'équipement du ménage.

a) La forme logarithmique.

La forme fonctionnelle adoptée doit satisfaire des exigences théoriques et coïncider avec les observations empiriques. D'un point de vue théorique, la forme logarithmique, qui est monotone croissante, concave, et positive, constitue une forme adaptée pour une fonction d'utilité. D'autant plus qu'elle est une transformation de la forme Cobb-Douglas⁴, qui est le cas basique en micro-économie. De plus, la forme logarithmique appliquée à la fonction d'utilité du UMOT aboutit à des résultats concordant avec les observations de Zahavi⁵. En effet, il peut être démontré qu'en présence de la seule contrainte de revenu sur le ménage (et réciproquement avec la contrainte de temps), la dépense monétaire (temporelle) pour le transport du ménage sera une proportion fixe du revenu disponible (du temps disponible) du ménage.

⁴ La fonction u est de la forme Cobb-Douglas si : $u(x_1, x_2) = Ax_1^a x_2^b$

⁵ ZAHAVI Y. et TALVITIE A., (1980), *Regularities in travel time and money expenditures*, Transportation Research Record, 750, pp. 13-19.

La "Loi de Zahavi".

En spécifiant la quantité de transport à l'aide de la distance par mode, en utilisant l'homogénéité de degré 1 de la fonction $\varphi\left(\frac{Y}{p_c} - \frac{p_x}{p_c}x\right)$ pour la multiplier par p_c et en

appliquant la forme logarithmique aux fonctions composant la fonction d'utilité :

$u\left(x, \frac{Y}{p_c} - \frac{p_x}{p_c}x, T - t_x x\right) = \phi(x) + \varphi\left(\frac{Y}{p_c} - \frac{p_x}{p_c}x\right) + \xi(T - t_x x)$, le programme de maximisation

(II.B.3-5) devient :

$$\text{Max}_{x_i} u = \sum_{i=1}^m a_i \log x_i + b_1 \log\left(Y - \sum_{i=1}^m c_i x_i\right) + b_2 \log\left(T - \sum_{i=1}^m \frac{x_i}{v_i}\right) \quad (\text{II.B.4-1})$$

où x_i est la distance par mode i ($i=1, \dots, m$), c_i est le coût par unité de distance pour le mode i , v_i est la vitesse du mode i , Y est le revenu disponible pour le ménage, T est le temps total disponible du ménage, a_i est un coefficient d'attractivité du mode i , et enfin, b_1 et b_2 sont deux coefficients pondérant l'utilité pour la consommation et le loisir.

Sans perte de généralité, les a_i seront standardisés : $\sum_{i=1}^m a_i = 1$, ainsi les attractivités seront exprimées les unes relativement aux autres.

Mathématiquement, il est nécessaire d'imposer une limite inférieure aux arguments des logarithmes de la fonction. En effet, pour $x \in]0;1]$, $\log(x) \leq 0$ ⁶, et l'utilité devant être positive, les arguments doivent vérifier :

$$x_i \geq 1 \qquad Y - \sum_{i=1}^m c_i x_i \geq 1 \qquad T - \sum_{i=1}^m \frac{x_i}{v_i} \geq 1$$

Pour simplifier, Zahavi suppose ces trois contraintes vérifiées a priori.

La résolution de la maximisation de cette fonction d'utilité fournira, à partir de la condition de premier ordre, un système d'équations, d'où les quantités de transport, x_i , seront déduites pour chacun des modes de transport $i=1, \dots, m$.

Lorsque le problème est réduit à une seule contrainte affectant le choix de l'individu, les solutions du système d'équations révèlent des relations qui sont confirmées par les observations. En effet, la proportionnalité de la dépense (soit en temps, soit en argent) pour un

⁶ En raison du choix des logarithmes pour représenter la fonction d'utilité, une hypothèse forte pèse sur les arguments de cette fonction. En effet, du fait du comportement du logarithme sur l'intervalle $[0 ; 1]$, les arguments de la fonction sont contraints d'être supérieurs à 1, pour respecter les hypothèses micro-économiques. Ce qui signifie ici, que $x_i > 1$, donc que le ménage parcourra quotidiennement au moins un kilomètre (ou une unité de distance) avec chacun des modes i disponibles.

La "Loi de Zahavi".

mode par rapport au revenu net disponible (temporel ou monétaire) est retrouvée, et le coefficient de proportionnalité est le rapport de l'attractivité du mode et de l'attractivité de la consommation résiduelle. De plus, la distance totale pour un mode est inversement proportionnelle au coût (temporel ou monétaire) par unité de distance de ce mode. De ce fait, ce cas simplifié implique que la distance totale n'est pas affectée par une variation des coûts relatifs des différents modes, seule la répartition de cette distance totale change. Mais ce résultat n'est pas retrouvé dans le cas général à deux contraintes.

Enfin après introduction dans l'utilité des distances par modes obtenues, il apparaît que l'utilité sera croissante, mais de plus en plus faiblement, avec le temps disponible et avec la vitesse modale. L'effet d'une amélioration de vitesse est proportionnellement plus important quand elle a lieu pour un ménage qui a peu de temps disponible que pour un ménage ayant plus de temps. L'utilité supplémentaire pour un ménage qui résulte d'une hausse de vitesse est proportionnelle à l'attractivité du mode, et inversement proportionnelle à la vitesse initiale. Il semble alors que les améliorations de l'attractivité et les gains de vitesse agissent à l'opposé.

- En appliquant la seule contrainte de temps, le second terme de la somme dans l'équation (II.B.4-1) est éliminé, puisqu'il représente la contrainte budgétaire. Les solutions du programme de maximisation sont alors :

La demande de transport sous contrainte de temps seulement :

$$x_i = v_i \left(\frac{a_i}{b_2 + 1} \right) T \quad (\text{II.B.4-2})$$

L'utilité réalisée à partir de ce niveau de demande optimal est :

$$u^* = \sum_{i=1}^m a_i \log \left[v_i \left(\frac{a_i}{b_2 + 1} \right) T \right] + b_2 \log \left[T - \left(\frac{1}{b_2 + 1} \right) T \right]$$

Elle s'obtient en substituant l'expression de la demande (II.B.4-2) dans (II.B.4-1) et en utilisant l'hypothèse de la somme unitaire des a_i .

Qui peut aussi s'écrire :

$$u^* = \sum_{i=1}^m a_i \log a_i + \sum_{i=1}^m a_i \log v_i + (b_2 + 1) \log T - (b_2 + 1) \log (b_2 + 1) + b_2 \log b_2$$

La "Loi de Zahavi".

- Les solutions pour l'application de la seule contrainte de revenu sont :

La demande de transport sous contrainte de revenu seulement :

$$x_i = \frac{1}{c_i} \left(\frac{a_i}{b_1 + 1} \right) Y$$

D'où l'utilité obtenue :

$$u^* = \sum_{i=1}^m a_i \log a_i + \sum_{i=1}^m a_i \log c_i + (b_1 + 1) \log Y + \text{constante}$$

Cependant dans le cas où les deux contraintes pèsent sur le comportement de l'individu, ce qui correspond à la fonction d'utilité que nous avons présentée ci-dessus, le système d'équations est trop complexe pour permettre une simple déduction mathématique des solutions. Il est alors nécessaire d'utiliser un algorithme itératif qui calculera les gradients de chaque équation afin d'approcher numériquement les solutions d'optimalité.

L'ensemble de relations de proportionnalité déterminées dans le cas à une seule contrainte de budget est complexifié. Elles deviennent des relations concaves, ainsi le revenu, l'inverse des coûts, le temps disponible, et les vitesses ont une influence marginale décroissante sur la distance.

La demande sous les deux contraintes de temps et de revenu est :

$$x_i = \frac{a_i}{\left(\frac{b_1 c_i}{Y} \right) + \left(\frac{b_2}{v_i T} \right)}$$

L'usage du modèle à deux contraintes permet de déterminer l'expression du taux marginal de substitution entre le temps et l'argent, qui est donc la valeur du temps exprimée en unité monétaire. Ce taux marginal de substitution est le rapport des utilités marginales :

$$\frac{\frac{du}{dT}}{\frac{du}{dY}} = \frac{b_2 (Y - \sum c_i x_i)}{b_1 \left(T - \sum \frac{x_i}{v_i} \right)}$$

Le modèle à deux contraintes implique donc une proportionnalité directe de la valeur du temps par rapport au revenu disponible pour la consommation non-transport (*le numérateur*) et par rapport à l'inverse du temps disponible pour les activités hors-transport (*le dénominateur*).

La "Loi de Zahavi".

b) Le cas de court terme.

Enfin, la dernière étape du modèle est sa simplification au cas de court terme, pour lequel il est supposé que les budgets temps et budgets monétaires de transport sont fixés. Zahavi démontre qu'il est équivalent de maximiser une fonction d'utilité additive et séparable du transport et de la consommation ou de maximiser une fonction d'utilité du transport sous des contraintes monétaires et temporelles appropriées⁷. En définitive, le processus de maximisation développé précédemment, qui s'applique à un cas de long terme avec les deux contraintes de temps et d'argent, et où l'utilité est fonction de la consommation résiduelle, du transport et du loisir, est équivalent à la maximisation du cas de court terme suivant :

$$\text{Max}_{x_i} u = \sum_{i=1}^m a_i \log x_i \quad \text{sous les contraintes :} \quad \begin{cases} \sum_{i=1}^m x_i c_i \leq M^* \\ \sum_{i=1}^m x_i / v_i \leq T^* \end{cases}$$

Où la forme fonctionnelle de l'utilité du transport est une forme logarithmique composée des coefficients d'attractivité des modes (a_i) et des distances quotidiennes par mode (x_i). La somme des dépenses monétaires par mode est contrainte par le budget monétaire de transport : M^* et la somme des dépenses temporelles par mode est contrainte par le budget temporel de transport : T^* . A court terme les deux budgets sont fixés et jouent le rôle de plafond pour les dépenses. Par les théorèmes mathématiques du Lagrangien généralisé et de Kuhn et Tucker, la solution de ce programme est :

$$x_i = \frac{a_i}{\mu c_i + \lambda / v_i}$$

Où λ et μ sont les multiplicateurs de Lagrange associés à chacune des deux contraintes.

La question de la détermination du niveau des budgets de transport (M^* et T^*) apparaît donc comme une première étape dans l'enchaînement des décisions de l'individu, et elle peut être traitée en terme d'utilité par :

$$\text{Max}_{T^*, M^*} u = a \log \left(\sum x_i \right) + b_1 \log (Y - M^*) + b_2 \log (T - T^*)$$

La résolution de ce programme de calcul conduit à une relation linéaire entre le temps restant pour le loisir et le revenu disponible pour la consommation, après déduction des

⁷ ZAHAVI Y., *The UMOT Project*, Théorème 2.9-1, p. 39.

La "Loi de Zahavi".

dépenses pour le transport. Cette relation peut être exprimée sous la forme suivante, qui lie linéairement les deux budgets :

$T^* = (T - \gamma Y) + \gamma M^*$, où γ est un coefficient qui est fonction de la somme des coûts modaux et de la somme des inverses des vitesses modales⁸.

Les tests menés sur les données des villes de Munich (1976) et Nuremberg (1975)⁹, confirment l'existence d'une proportionnalité entre les budgets temps et budgets monétaires de transport, et apportent crédit aux capacités prédictives du modèle de court terme développé ci-dessus.

5. Détermination du niveau d'équipement du ménage.

Le modèle permet à tout individu de choisir parmi l'ensemble des modes possibles. Il est donc possible que la personne désire un certain niveau de transport en voiture particulière, soit en s'équipant, soit en partageant un véhicule. De fait, le degré d'accessibilité à une voiture particulière influe sur la répartition modale de la demande individuelle de transport.

L'existence de ce va-et-vient entre la demande de transport (décision de court terme) et la motorisation du ménage (décision de long terme) nécessite le développement d'un modèle d'équipement automobile des ménages à relier au modèle de court terme : le UMOT.

La modélisation de cette étape « aval » du comportement de transport peut utiliser une formulation utilitaire comme celle du UMOT. Pour illustrer cela, le modèle suivant est développé dans le *UMOT Process* :

Dans le cas où le ménage peut choisir entre deux modes, dont l'un est sa propre voiture particulière, il comparera l'utilité obtenue par l'usage de chacun des deux modes en tenant compte des coûts respectifs de chacun des deux. Ainsi, le niveau d'utilité optimal du ménage usant du mode i est donné par :

$$u_i^* = \phi(x_i^*) + \varphi(Y - c_i x_i^*) + \xi(T - x_i^* / v_i)$$

⁸ $\gamma = \left(b_2 \left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right) \right) / (b_1 (c_1 - c_2))$, ZAHAVI Y., *The UMOT Project*, p. 42.

⁹ ZAHAVI Y., *The UMOT Project*, p. 43.

La "Loi de Zahavi".

Où x_i^* sera x_1^* pour représenter le niveau optimal de distance parcourue en voiture privée et x_2^* pour désigner le niveau optimal de transport par l'autre mode disponible (par exemple, les transports en communs, une voiture particulière partagée, etc.).

Le coût par unité de distance c_1 de la voiture particulière privée, peut être décomposé entre un coût fixe repartit sur chaque unité de distance : p , et un coût variable \bar{c}_1 , qui s'applique à chaque unité de distance : $c_1 = p/v_1 + \bar{c}_1$.

Il s'agit alors pour le ménage de comparer les deux niveaux optimaux d'utilité suivant qu'il use d'un mode ou d'un autre.

Un premier cas simplifié permet de déduire certaines propriétés importantes du comportement du ménage face au choix de son équipement automobile. Dans ce cas simple, les attractivités de chaque mode sont supposées identiques, et les coûts relatifs et les vitesses relatives interagissent de façon à aboutir à des distances optimales pour chacun des modes telles que : $\phi(x_1^*) = \phi(x_2^*)$.

L'équipement sera choisi par le ménage si pour une distance x :

$$u_1(x) > u_2(x)$$

⇔

$$\phi(Y - p - \bar{c}_1 x) + \xi(T - x/v_1) > \phi(Y - c_2 x) + \xi(T - x/v_2) \quad (\text{II.B.5-1})$$

Ce qui permet de définir une frontière d'indifférence du ménage :

$$u_1(x) = u_2(x)$$

⇔

$$\phi(Y - p - \bar{c}_1 x) + \xi(T - x/v_1) - \phi(Y - c_2 x) - \xi(T - x/v_2) = 0$$

Qui sera notée :

$$H(x, Y, p, \bar{c}_1, v_1, v_2) = 0$$

Après avoir supposé que la voiture particulière est plus coûteuse, mais aussi plus rapide que le mode alternatif, l'étude des variations de cette fonction établit les propriétés suivantes :

- $\frac{dx}{dY} < 0$ et $\frac{dx}{dT} > 0$: le niveau de distance nécessaire à justifier l'acquisition d'une voiture particulière est décroissant avec le niveau de revenu, et croissant avec le temps

La "Loi de Zahavi".

disponible. La dépense que représente l'automobile est relativement moins lourde dans le budget monétaire du ménage quand celui-ci est plutôt aisé, et le besoin de gagner du temps se fait moins ressentir quand le ménage est moins pressé par la contrainte de temps.

- $\frac{dx}{dp} > 0$ et $\frac{dx}{d\bar{c}_1} > 0$, une hausse des coûts liés à l'acquisition d'une automobile nécessite une plus forte utilisation de celle-ci.
- $\frac{dx}{d\bar{c}_2} > 0$, $\frac{dx}{dv_1} < 0$ et $\frac{dx}{dv_2} > 0$, à l'inverse, une hausse du coût de l'alternative, ou une amélioration de la vitesse relative de l'automobile, rend la voiture particulière plus concurrentielle.
- $\frac{dY}{dp} > 0$, le niveau de revenu pour justifier de l'équipement automobile du ménage est plus important lorsque le coût fixe de l'automobile est croissant.

Enfin, d'après l'approximation de Taylor, il est possible d'approcher les petites différences entre les ordonnées de deux points d'une fonction, par la valeur du produit de la dérivée première de la fonction par la différence entre les abscisses des deux points.

Ainsi, pour la fonction d'utilité de la consommation résiduelle et la fonction d'utilité du temps de loisir, les approximations suivantes sont possibles :

Utilité de la consommation résiduelle :

$$\varphi(Y - p - \bar{c}_1 x) - \varphi(Y - c_2 x) \cong \varphi'(Y) \cdot [(c_2 - \bar{c}_1)x - p]$$

Utilité du temps de loisir :

$$\xi\left(T - \frac{x}{v_1}\right) - \xi\left(T - \frac{x}{v_2}\right) \cong \xi'(T) \cdot \left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1}\right)$$

Elles permettent d'écrire l'équation comparative des utilités des deux modes (II-B-5-1) sous la forme :

$$\begin{aligned} u_1(x) &> u_2(x) \\ &\Leftrightarrow \\ p &< x \cdot (c_2 - \bar{c}_1) + \frac{\xi'(T)}{\varphi'(Y)} \cdot x \cdot \left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1}\right) \end{aligned}$$

La "Loi de Zahavi".

Il apparaît que l'équipement automobile reste avantageux tant que le coût fixe de l'automobile est inférieur à la somme des différentiels, entre les modes, de coût et de temps, tous deux exprimés en terme monétaire. Le rapport des dérivées premières des fonctions d'utilité du temps et du revenu : $\frac{\xi'(T)}{\varphi'(Y)}$, est en fait le rapport des utilités marginales, il s'agit donc de la valeur du temps exprimée en terme monétaire.

Il est alors facile de déduire de (II-B-5-1) une expression de la valeur critique de la distance justifiant l'équipement : $x > \frac{p}{(c_2 - \bar{c}_1) + \frac{\xi'(T)}{\varphi'(Y)} \cdot \left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right)}$.

Cette valeur est donc directement proportionnelle au coût fixe de l'automobile, et inversement proportionnelle à une combinaison des gains nets en temps et en coûts. Le ménage choisit de s'équiper si la distance qu'il compte parcourir est supérieure au rapport du coût de l'investissement, aux gains nets permis par l'investissement.

Dans le but de déterminer le niveau de revenu permettant de justifier l'acquisition d'une automobile, il est nécessaire de préciser la forme mathématique de la fonction d'utilité. Une forme logarithmique, comme celle étudiée précédemment, pourra être appliquée ici, aussi. Ainsi, le gain utilitaire dû au différentiel de vitesse (θ) peut être exprimé sous la forme :

$$\theta = \xi(T - x/v_1) - \xi(T - x/v_2) = b_2 \log\left(\frac{T - x/v_1}{T - x/v_2}\right)$$

En utilisant cette dernière écriture, l'automobile est avantageuse tant que :

$$\begin{aligned} u_1(x) &> u_2(x) \\ &\Leftrightarrow \\ b_1 \log(Y - p - \bar{c}_1 x) + \theta &> b_1 \log(Y - c_2 x) \end{aligned}$$

Le niveau de revenu critique pour la motorisation du ménage peut s'approcher simplement, sous l'hypothèse que le revenu disponible (Y) est élevé par rapport aux dépenses de transport ($\bar{c}_1 x$ et $c_2 x$). Sous cette hypothèse, les dépenses sont négligeables par rapport au revenu, seul l'ordre de grandeur entre le revenu net du coût fixe de l'automobile et le revenu disponible doit dépasser une certaine valeur déterminée par le gain utilitaire du différentiel de vitesse et le coefficient d'attractivité de la consommation résiduelle :

$$\frac{Y - p - \bar{c}_1 x}{Y - c_2 x} > e^{-(\theta/b_1)} \Leftrightarrow Y \cong \frac{p}{1 - e^{-(\theta/b_1)}}$$

La "Loi de Zahavi".

Il apparaît que plus l'utilité du gain de temps est importante comparée à l'attractivité de la consommation résiduelle ($\theta/b_1 \rightarrow \infty \Rightarrow e^{-(\theta/b_1)} \rightarrow 0$), plus le revenu critique pour la motorisation diminue et s'approche du coût fixe de l'automobile.

Enfin dans le cas plus général, où la distance parcourue diffère suivant le mode utilisé, les utilités à comparer ont pour expressions :

$$u(x_1^*) > u(x_2^*)$$

$$\Leftrightarrow$$

$$\phi(x_1^*) + \phi(Y - p - \bar{c}_1 x_1^*) + \xi(T - x_1^*/v_1) > \phi(x_2^*) + \phi(Y - c_2 x_2^*) + \xi(T - x_2^*/v_2)$$

A l'aide de l'approximation de Taylor vue plus tôt, la motorisation est choisie par le ménage sous la condition :

$$\phi'(x_2^*)(x_1^* - x_2^*) + \phi'(Y)(c_2 x_2^* - c_1 x_1^* - p) + \xi'(T) \left(\frac{x_2^*}{v_2} - \frac{x_1^*}{v_1} \right) > 0$$

Et il est possible de donner une expression du différentiel d'utilité entre les deux modes :

$$\frac{\phi'(x_2^*)}{\phi'(Y)} \cdot \Delta x + \frac{\xi'(T)}{\phi'(Y)} \left[x_2^* \left(\frac{1}{v_2} - \frac{1}{v_1} \right) - \frac{\Delta x}{v_1} \right] - \Delta x \cdot c_1 + x_2^*(c_2 - \bar{c}_1) > p$$

Où $\Delta x = x_1^* - x_2^*$.

Dans cette expression, le terme de gauche est l'expression monétaire de la différence d'utilité de la distance exprimée en terme monétaire. Le second terme est le produit de la valeur du temps par le gain de temps acquis en utilisant l'automobile plutôt que son alternative, augmenté du temps supplémentaire découlant des différences de distances parcourues. Ce terme exprime donc la différence utilitaire du gain de temps exprimée en terme monétaire. Enfin le dernier terme est la différence monétaire de coûts.

Ainsi un modèle micro-économique permet de formaliser le raisonnement du ménage face à la question de son équipement automobile. Même si ce modèle ne prend en considération que l'acquisition d'une seule automobile, il apporte des résultats consistants avec les observations et la logique économique. Le ménage compare les gains et les pertes des

La "Loi de Zahavi".

différentes solutions envisagées, la motorisation est plus aisée lorsque le ménage est plus riche, etc. Cependant, il peut être avancé que seuls trois types de gains et de coûts (monétaires, temporels et utilitaires) sont considérés, alors qu'il existe d'autres critères de comparaison des modes (confort, accessibilité, liberté, etc.). Un modèle basé sur l'étude des différentiels d'utilité semble toutefois être adapté pour représenter les choix d'équipement automobile des ménages. La distance parcourue par le ménage est dans ce modèle aussi, le critère décisif.

Dans cet encart, nous nous efforcerons d'expliquer simplement, le processus mathématique utilisé dans le modèle micro-économique : UMOT, ainsi que d'éclairer les apports de cette méthode vis-à-vis de l'analyse des comportements de déplacement.

Que se passe-t-il mathématiquement ?

Afin de représenter le choix de consommation d'un individu, Zahavi construit une fonction d'utilité, qui, sous les hypothèses de la théorie micro-économique du consommateur est la représentation mathématique de la satisfaction de l'individu suivant le « triplet » composé des différents niveaux de consommation du bien transport, de consommation de l'ensemble des autres biens (consommation résiduelle) et du temps de loisir disponible. A chaque niveau de ses trois variables, la fonction associe un niveau de satisfaction du consommateur, qui peut être comparé à la satisfaction apportée par d'autres niveaux de consommation des trois variables. L'ordre ainsi créé entre les différents niveaux de consommation des trois variables reconstitue les préférences de l'individu. L'utilisation d'une fonction mathématique permet de quantifier les relations existantes entre les caractéristiques des trois variables : transport, consommation résiduelle et temps de loisir.

Le consommateur étant supposé rationnel, c'est-à-dire qu'il aura pour but d'être le plus satisfait possible par ses choix, il sera possible de représenter son comportement de choix de consommation par un programme de maximisation de la fonction d'utilité. Les limites portant sur les consommations de l'individu sont constituées de la contrainte de budget et de la contrainte de temps. Les deux ressources de l'individu : le revenu et le temps sont supposées représenter l'essentiel des contraintes qui pèsent sur l'individu au moment de ses choix de consommation. De ce programme mathématique, il est alors possible de déterminer une fonction de demande qui représente pour chaque niveau de prix des trois variables et chaque niveau de ressources (revenu et temps) les quantités que le consommateur consommera pour maximiser sa satisfaction.

A quoi servent ces mathématiques ?

A l'aide d'une représentation mathématique des préférences de l'individu et donc en quelques sortes de sa satisfaction, il est possible de représenter son comportement de consommation. L'étude de ces fonctions : la fonction d'utilité et les trois fonctions de demande (une pour chacune des variables de la fonction d'utilité), apporte les propriétés « classiques » du comportement de consommation d'un individu supposé rationnel. Pour la consommation de bien transport, il apparaît que le revenu disponible et le temps

disponible ont un effet positif sur la quantité de transport demandée à l'optimum. Et à l'inverse les coûts (monétaires et temporels) du transport ont un effet négatif sur le niveau optimum de transport.

Ces relations théoriques sont, à quelques nuances ou précisions près, acceptables pour le problème de la consommation de transport que nous étudions ici. En effet, dans le domaine du transport comme pour d'autres types de consommation, des niveaux de saturations, ou des irrégularités dans les tendances apparaissent dans les comportements. La prise en compte des particularités du domaine d'application constitue l'étape de « spécification » des fonctions utilisées. Afin de représenter au mieux les phénomènes réels, il est nécessaire de préciser les relations mathématiques liant les variables. Ainsi les niveaux de saturations physiques, ou psychologiques observés, ou encore, les relations à taux constants ou à taux décroissants observés seront introduits dans les fonctions mathématiques par le biais des formes et des paramètres utilisés dans ces fonctions.

Ainsi la théorie micro-économique fournit un système de réflexion sur le comportement de consommation des individus, dans lequel il reste à introduire les spécificités du domaine du transport.

Afin de permettre une résolution mathématique du programme de maximisation de l'individu, certaines hypothèses concernant les formes mathématiques utilisées sont encore nécessaires. Les relations obtenues entre les variables sont celles observées par Zahavi : existence d'une proportionnalité de la dépense monétaire ou temporelle pour un mode par rapport à la ressource nette disponible (temporelle ou monétaire) ; la distance totale pour un mode est inversement proportionnelle au coût (temporel ou monétaire) par unité de distance de ce mode. Ainsi, sous les hypothèses du modèle micro-économique, dont celle d'indépendance des prix relatifs de chaque groupe de consommation, une variation des prix relatifs des modes (à l'intérieur du groupe de consommation de transport) n'affecte pas la quantité totale de transport consommée, seulement sa répartition modale. Cependant, comme elles ne remettent pas en question les principes développés jusqu'à présent, nous préférons nous attarder sur la spécification des variables, c'est à dire, le contenu de la fonction d'utilité, qui est en fait le cœur du raisonnement. Dans sa fonction d'utilité, Zahavi choisit de faire apparaître la quantité de transport consommée au même niveau que les consommations des autres biens. Au côté de ces niveaux de consommation, apparaissent aussi les prix en termes monétaires et temporels de la consommation de transport. Comme cela sera détaillé dans la dernière partie du rapport, en faisant ce choix, Zahavi ne considère pas que la demande de transport est une demande indirecte dépendante des attractivités des destinations que l'individu désire atteindre. Toutefois, l'introduction de la quantité de transport dans la fonction d'utilité permet, en un sens, de représenter les opportunités socio-géographiques

que l'individu atteint grâce à son transport. Toutefois cela ne signifie pas que la quantité de transport demandée sera prédéterminée car elle affecte positivement l'utilité de l'individu. L'individu n'aura pas intérêt à maximiser les distances pour maximiser son utilité. Au contraire, la mise en concurrence du transport avec les autres biens ainsi qu'avec le temps de loisir dans la fonction d'utilité, permet un arbitrage entre les variables, ainsi que la déduction des valeurs relatives des variables, les unes par rapport aux autres, pour l'individu. Ainsi, la valeur du temps en terme monétaire peut être exprimée. Dans le modèle UMOT, cette valeur du temps est directement proportionnelle au revenu disponible pour la consommation non-transport et inversement proportionnelle au temps disponible pour les activités non-transport. De ce fait, une première discussion du modèle construit par Zahavi portera sur le choix de l'introduction du transport dans le problème du consommateur, tout d'abord sur cette notion de demande dérivée qui peut être perçue comme primordiale, alors que le modèle de Zahavi peut être considéré comme intégrant une part de cette notion. Ensuite sur la mesure de la quantité de transport qui sera introduite dans la fonction d'utilité. Zahavi, fait le choix de représenter la quantité de transport demandée par l'individu par la distance qu'il parcourt. La question de la définition de l'indicateur de la quantité de transport se pose alors. La distance parcourue est-elle un bon indicateur de l'utilité procurée par les opportunités atteintes ? La dernière partie du rapport traitera de ces deux notions : de la demande dérivée et de l'indicateur de l'utilité du transport.

Enfin, l'individu va déterminer la quantité de transport qu'il désire en fonction des coûts monétaires et temporels et de ses ressources. Une répartition modale de la demande de transport peut être effectuée suivant que l'individu a accès à plusieurs modes concurrents. Toutefois pour cela, il est nécessaire de considérer l'accès à la voiture particulière. La motorisation de l'individu sera donc fonction de l'utilité qu'il aura d'utiliser ce mode plutôt qu'un autre. L'introduction de la concurrence modale dans la fonction d'utilité passe par la présence dans la fonction des quantités de transport demandées pour chacun des modes. Avec une telle spécification de l'utilité, l'individu arbitre donc entre sa consommation résiduelle, son temps de loisir, et chacune des distances par mode. Compte tenu du coût de la motorisation, un niveau de distance critique en voiture particulière va être déterminant de l'accession à l'automobile. Cette distance minimale est sensible aux autres variables du modèle. Par exemple, elle sera d'autant plus faible que l'individu est aisé (revenu élevé) ou pressé (temps disponible faible). Les coûts de la motorisation affecte bien entendu ce niveau de distance critique, mais aussi les coûts (monétaires et temporels) des modes concurrents. Cette valeur critique est déterminée comme étant directement proportionnelle au coût fixe de la motorisation et inversement proportionnelle aux gains nets (temporels et monétaires) dus à la motorisation. En utilisant un raisonnement fondé sur le différentiel d'utilité, le ménage est représenté comme comparant les gains et les pertes des différentes solutions possibles pour son transport. Cependant, le modèle ne tient compte que de trois critères

La "Loi de Zahavi".

de différenciation modale : la vitesse, le coût monétaire et l'utilité de la différence de distance (les distances parcourues n'étant pas les mêmes suivant le mode). De plus, le modèle ne considère l'acquisition que d'une seule automobile. Malgré tout, les relations reproduites sont en accord avec les observations et la logique économique.

En résumé.

Le modèle de Zahavi, représente le comportement de l'individu par une maximisation de l'utilité que lui apporte la distance qu'il parcourt, la consommation des autres biens, et son temps de loisir. La distance permet de représenter la demande de l'individu en terme de quantité de transport, mais intègre aussi une part d'information sur l'utilité des destinations atteintes. L'utilité est croissante avec la distance parcourue, mais aussi décroissante avec le temps de transport induit. De fait, un arbitrage s'opère au sein de la fonction d'utilité pour déterminer une quantité de transport, de consommation résiduelle et de temps de loisir optimale. Enfin, la distance peut être répartie en fonction des modes. La quantité de transport pour chacun des modes est alors mise en concurrence avec la consommation résiduelle, le loisir et les autres modes. En comparant l'utilité d'un mode à l'utilité de l'automobile nette des coûts de motorisation, il est possible de déduire une distance critique à partir de laquelle l'individu s'équipera. La première étape du comportement du consommateur réside donc dans la détermination d'un niveau de distance critique pour sa motorisation, et c'est dans une seconde étape que l'individu décidera des distances qu'il parcourra et donc de sa motorisation effective.

C. Conclusion du UMOT.

Zahavi a donc développé deux modèles qui reposent sur des hypothèses fréquentes en micro-économie, et qui soutiennent les relations économiques traditionnelles, ainsi que les résultats des analyses empiriques effectuées en transport urbain. Avec ces deux modèles, Zahavi peut développer l'interaction entre la demande de transport et le système d'offre de transport. Le comportement de transport quotidien du ménage est représenté en deux étapes. La première est la question de la motorisation du ménage, qui se place dans le long terme, et qui constitue une contrainte pour la seconde étape du choix du ménage : la distance parcourue. Cette distance parcourue s'inscrit dans le court terme, et Zahavi suppose que son niveau demandé est contraint par le niveau de motorisation choisi dans la première étape et par les budgets temps et monétaires, qui sont fixes à court terme. Ces deux étapes sont interactives, même si elles ne sont pas toutes les deux sur la même échelle de temps. C'est le niveau de distance quotidienne demandé à court terme qui détermine le besoin quotidien de motorisation, ce besoin ne pouvant être satisfait que par un investissement de long terme. D'une part, la modélisation de la motorisation du ménage matérialise l'action de la distance quotidienne sur la motorisation en déterminant un niveau de distance quotidienne critique, qui est le résultat de la comparaison des utilités apportées par l'usage de la voiture particulière ou d'un autre mode pour effectuer cette distance demandée. D'autre part, le niveau de distance quotidienne demandé est déterminé dans le modèle par les caractéristiques du ménage, les contraintes de budgets auxquelles il fait face, et les caractéristiques du mode choisi ou disponible, dont la voiture particulière qu'il peut acquérir. Ainsi le modèle UMOT, de première étape, donne l'utilité en fonction des modes disponibles, et fournit les distances demandées pour chacun des modes. Et le modèle de motorisation compare les niveaux d'utilité : l'utilité avec ou sans équipement du ménage, pour déterminer un niveau critique de distance parcourue en voiture particulière, à partir duquel l'apport utilitaire de la motorisation justifiera ou non les coûts de l'acquisition d'une automobile. C'est donc le niveau de distance en voiture particulière demandé en cas d'équipement du ménage déterminé dans le UMOT qui sera comparé au niveau de distance critique du modèle de motorisation, pour décider de l'équipement automobile du ménage.

La théorie micro-économique permet la représentation mathématique de raisonnements économiques simples. Le ménage ne s'équipe que si l'utilité que cela lui apporte est supérieure au coût de l'équipement et supérieure à l'utilité procurée par les autres modes de

transport. Et le ménage, voulant profiter des opportunités spatiales qui lui sont offertes, maximise la distance qu'il parcourt dans l'ensemble de contraintes défini par ses budgets temps et monétaires, qui sont eux-mêmes déterminés par le système d'offre de transport (vitesses et coûts des modes disponibles).

Ce genre de modèle très théorique et souvent hypothétique, permettra de développer une statique comparative, c'est-à-dire d'observer comment se comportent certaines grandeurs, lorsqu'une variable du modèle est modifiée, sous l'effet par exemple d'un choc naturel, ou d'une décision politique. Le modèle UMOT touche aux questions du partage modal, de l'équipement automobile, du niveau de demande de transport, qui sont ici mises en relation avec les caractéristiques des ménages et celles du système d'offre de transport. Ainsi le modèle peut prévoir les conséquences sur les grandeurs modélisées, d'une action affectant ces caractéristiques. D'après les propriétés du modèle, la sensibilité de la demande de transport aux prix, aux vitesses et aux ressources laissent prévoir certains effets traditionnels des politiques révisant à la hausse le coût d'usage de la voiture particulière, comme par exemple l'internalisation des coûts externes. Il n'est donc pas étonnant que la demande pour le transport, défini comme un bien normal, diminue lorsque les coûts (temporels et monétaires) augmentent, ou qu'elle soit plus forte quand les ressources sont plus importantes. Le modèle permet la comparaison des quantités demandées à deux équilibres différents, ainsi que d'évaluer les différences utilitaires apparaissant. Ce type de modèle peut par conséquent être un outil de l'analyse coût-bénéfice, ou de monétarisation de variables qualitatives telles que la vitesse ou le temps. La qualité de cet outil variant en fonction de la qualité de l'ajustement du modèle.

L'estimation de ce type de modèle déterminera les paramètres des systèmes d'équations. Pour cette tâche, Zahavi propose une technique calculatoire souvent utilisée, consistant en un processus itératif permettant à chaque itération d'approcher le gradient de la fonction d'utilité à maximiser. Cependant, la spécification du modèle reste trop détaillée par rapport aux données disponibles, pour permettre une estimation des paramètres. En effet, les revenus par ménage, ne sont pas toujours disponibles, mais surtout les coefficients qui expriment les attractivités des modes et les préférences des individus posent un grave problème d'observation et de mesure. Si les critères de confort, de protection, etc. sont considérés comme les déterminants de l'attractivité du mode pour l'utilisateur, ces coefficients sont déterminés et devraient plutôt être mesurés au même titre que les prix ou les coûts. Les estimations de ses coefficients, qui sont faites par le modèle comportent une grande part

La "Loi de Zahavi".

d'erreur. D'après la spécification de la fonction d'utilité ce coefficient contient aussi une information non expliquée par les variables indépendantes utilisées dans le modèle.

Pour se soustraire à ces problèmes de mesure et d'estimation, Zahavi, se sert des études plus empiriques, qu'il a poursuivies auparavant, pour développer un modèle applicable appuyé sur les données et les relations mises à jour empiriquement, mais sans transformer les relations déduites du modèle théorique UMOT. Il reconstitue alors un système d'équations en appliquant le même principe que celui développé précédemment : les individus maximisent leurs opportunités spatiales, qui sont représentables par la distance parcourue, sous des contraintes de budgets temps et revenu.

Dans la partie suivante de ce rapport, nous aborderons ces questions de définitions et de mesures des variables en jeu dans le travail de Zahavi. Et nous détaillerons le modèle qui constitue son outil appliqué de prévision de demande de déplacement urbain quotidien.

MISE EN PRATIQUE DU UMOT.

Dans le UMOT, Zahavi, représente l'utilité d'un ménage de la population étudiée en fonction de la distance quotidienne qu'il parcourt, et ensuite il maximise cette utilité sous les contraintes de budgets monétaires et temporels du ménage. Il se pose alors naturellement, la question de la définition de chacune de ces grandeurs, et de leur mesure.

Nous nous efforcerons dans cette partie de présenter les choix effectués par Zahavi, puis d'apporter certaines critiques et mises en garde concernant la définition de ces concepts. Ainsi la définition de l'unité d'observation, de la mesure de la demande de transport, et des contraintes de temps et de revenu seront précisées.

A. Définitions des termes et mesures.

1. Le choix du ménage comme unité d'observation.

Il convient dans un premier temps de s'interroger sur l'unité d'observation employée dans le modèle. Parmi les possibilités existantes pour la représentation du comportement de transport, il est nécessaire de choisir l'unité d'observation dont le comportement sera le plus représentatif du comportement de la population étudiée. L'objectif de l'analyse est ici de représenter la demande de transport quotidien urbain. Quelle est l'unité décidant du montant de transport demandé ? S'agit-il de l'individu ou du ménage ? Et à l'intérieur du ménage, les interactions entre membres sont-elles possibles ? Isoler l'individu des autres membres du foyer, consiste à l'empêcher de bénéficier de leur aide, mais aussi à le libérer de certaines contraintes. Par exemple, isoler un parent de son enfant, ne permettrait pas d'envisager un accompagnement, l'enfant ne pourrait user d'une automobile, et le parent modifierait en conséquence son déplacement. Il est donc nécessaire de conserver le lien existant entre l'individu et le ménage dont il est membre. Ce lien est implicite quand on observe le ménage dans son ensemble. Mais en utilisant l'unité d'observation de l'individu la prise en compte de ce lien est aussi nécessaire. La connexion entre les membres du ménage peut être introduite au niveau de l'individu par l'usage de certaines techniques. Dans une logique de maximisation de l'utilité sous contrainte, il convient d'observer quel est le poids exercé par les contraintes sur les différentes unités d'observation possibles. Les deux contraintes auxquelles les

individus ont affaire concernent le temps et le revenu. Alors qu'il est clair que le temps n'est pas une ressource pouvant être transférée d'un individu à l'autre, le revenu est la ressource qui est partagée par les membres du ménage. Mais de façon plus générale, la distinction du niveau individuel et du niveau du ménage, n'est pas toujours aussi nette, notamment pour ce qui concerne des ressources qui sont difficilement partageables, comme par exemple, l'automobile du ménage. Dans le modèle théorique UMOT, le ménage est utilisé, car d'une part, les données ne sont disponibles qu'au niveau du ménage, comme c'est souvent le cas du revenu, de la motorisation, etc., et d'autre part, les contraintes pesant sur le décideur sont, à l'exception du temps, des contraintes sur l'ensemble des membres du ménage. L'usage du ménage comme unité d'observation ne pose « que » le problème de la représentation de la contrainte de temps au niveau du ménage, ce qui peut être considéré comme acceptable dans un modèle théorique. Mais il permet de considérer la motorisation et le budget monétaire de transport au niveau du ménage, ce qui correspond au processus réel¹⁰. Dans la partie appliquée du modèle : un va-et-vient entre l'individu et le ménage s'opère, jusqu'à obtention de l'équilibre, au travers de la phase de motorisation du ménage. Comme nous le verrons par la suite, Zahavi, parvient avec les données à déterminer les budgets temps et les budgets monétaires au niveau du ménage. Les budgets monétaires seront obtenus directement au niveau du ménage. Les budgets temps sont obtenus par rapport à la vitesse de transport d'un individu et du nombre d'individus par ménage.

2. La mesure de la demande de transport, des budgets temps et des budgets monétaires de transport.

La maximisation de l'utilité du transport sous contraintes est une simple transposition de la théorie micro-économique au problème du transport. Cependant nombre de modèles n'avaient jusque là utilisé que le nombre de déplacements effectués pour représenter les opportunités économiques et sociales de l'individu. Zahavi propose d'utiliser de la distance totale quotidienne comme d'un indicateur d'utilité du transport, d'une mesure de la distribution spatiale des opportunités économiques, que l'individu peut atteindre sous contraintes. Et les contraintes qu'il considère dans le programme de maximisation sont les contraintes de budget temps et de budget revenu. Les contraintes existantes sont plus

¹⁰ Cette correspondance est valide sous l'hypothèse que le résultat de la rationalité du ménage est équivalent au résultat des rationalités individuelles du ménage.

La "Loi de Zahavi".

nombreuses (préférences personnelles, handicap, une distance obligatoire au lieu de travail importante, etc.), mais celles de revenu et de temps, sont celles qui semblent peser le plus fortement sur les choix des individus.

Ainsi, dans le modèle UMOT, ce sont les distances totales quotidiennes qui sont produites, pour déterminer ensuite le nombre de déplacements effectués, en fonction des vitesses, des coûts et des budgets du ménage.

Dans un premier temps, nous présenterons les raisons pour lesquelles, Zahavi, propose l'usage de la distance quotidienne totale, plutôt que du nombre de déplacements. Dans un second, les notions de budgets temps et de budget revenu seront détaillées.

a) La demande de transport.

Jusqu'à présent la demande est représentée par le nombre de déplacements quotidiens, qui sert alors d'indicateur des opportunités que les individus tirent de leurs déplacements. En effet, si un déplacement est réalisé, cela suppose que l'individu retire une utilité de l'activité qu'il réalise à destination, qui couvre la désutilité qui apparaît (les coûts en temps, argent, etc.). Cependant, le nombre de déplacements n'est pas suffisant pour représenter la demande de transport d'un individu. Le contre-exemple classique est le suivant : si l'on considère un individu qui vit dans une « petite » ville réalise 6 déplacements quotidiens, et qu'après avoir déménagé vers une plus grande ville n'en réalise plus que 3, sa demande de transport a-t-elle diminué ? Est-ce que l'utilité de son transport dans une plus grande ville est plus faible que celle de la petite ville ? Il est tout à fait possible que la distance totale parcourue dans les deux cas soit la même. Dans des analyses antérieures conduites par Zahavi¹¹, ce phénomène est observé dans de nombreuses villes, aux Etats-Unis, dans des pays en voie de développement, mais aussi en Europe, comme le montre l'exemple britannique et américain du *tableau 2*.

¹¹ ZAHAVI Y., (1973), *The TT-relationship : a unified approach to transportation planning*, Traffic engineering and control, pp. 205-212.

La "Loi de Zahavi".

Tableau 2 : Caractéristiques des transports dans les villes de Kingston-upon-Hull et Londres (G.B.) et Knoxville et Baltimore (U.S.A.)

Caractéristiques	Kingston-upon-Hull	Londres	Knoxville	Baltimore
Pays	G.B.	G.B.	U.S.A.	U.S.A.
Année	1967	1962	1962	1962
Population	344890	8826620	241810	1607980
Surface en km²(*)	107	2450	-	-
Automobiles	43183	1249453	78374	437540
Automobiles pour 100 personnes	12,5	14,1	32,4	27,2
Déplacements en automobile	270000	4080400	418140	1537420
Nombre moyen de déplacements en automobile	6,25	3,27	5,34	3,60
Distance moyenne d'un déplacement en km(*)	4,15	7,18	-	-
Durée moyenne d'un déplacement en min	6,9	13,7	8,1	12,3
Distance quotidienne par automobile en km(*)	25,9	23,5	-	-
Temps quotidien par automobile en min	43,1	44,8	43,3	44,3

(Source : Y. ZAHAVI, The TT-relationship (1973). Et (*) données issues de : Y. ZAHAVI, The UMOT Project, (1979))

Malgré les différences significatives entre les deux villes, en terme de population et de surface, les moyennes quotidiennes par automobile sont sensiblement proches. Et la relation inverse entre le nombre de déplacements et la distance par déplacement ou la durée par déplacement apparaît clairement.

Sur l'ensemble des villes étudiées, il semble alors possible d'expliquer ces similarités par l'idée que les individus déterminent le niveau de leur demande de transport sous des contraintes de temps et de revenu qui sont relativement semblables. De fait, agissant dans un même univers de choix, les individus ont la même demande, qui s'exprime par la distance totale quotidienne. La distance totale quotidienne semble être plus adaptée pour représenter la demande de transport que le nombre de déplacements, car elle peut être considérée comme déterminée par des contraintes de temps et de revenu par l'individu et ainsi elle peut être transférée entre des villes de tailles différentes.

Le tableau (tableau 3) suivant montre qu'en effet, le nombre de déplacements ne peut être une bonne mesure de la demande de transport, car il semble interagir avec la distance moyenne par déplacement, pour que la distance totale quotidienne reste identique quelle que soit la ville.

**Tableau 3 : Caractéristiques de transport dans les villes de Washington,D.C.,
Nuremberg et Kuala Lumpur**

Caractéristiques	Washington	Nuremberg	Kuala Lumpur
Année	1968	1975	1973
Population	2558100	1160000	912490
Surface en km²	3410	3000	337
Automobiles	1018900	328000	65440
Automobiles pour 100 personnes	39,8	28,3	7,2
Déplacements en automobile	3342000	1007000	443950
Nombre moyen de déplacements en automobile	3,28	3,07	6,78
Distance moyenne d'un déplacement en km	10,59	11,20	5,36
Distance quotidienne par automobile en km	34,7	34,4	36,3

(Source : Y. ZAHAVI (1979), The UMOT Project)

Bien que la distance puisse être perçue comme une désutilité car elle sépare l'individu de sa destination et implique des coûts, il existe plusieurs indications suggérant que la distance totale quotidienne pour l'ensemble des destinations constituera un indicateur efficace de l'utilité quotidienne résultant du transport effectué sous contraintes.

Tout d'abord, d'après les résultats de Szalai (1972) qui seront présentés dans la partie III-C-1, concernant la naissance de l'hypothèse de constance des budgets temps de transport, la façon dont les gains de temps sont réinvestis dans du transport, indique que l'individu préfère faire des déplacements de plus longue portée, plutôt que faire plus de déplacements. Il préfère donc augmenter sa distance totale. Lorsque leur revenu augmente, les consommateurs ont tendance à investir dans des moyens de locomotion plus rapides, dans le but d'accroître les distances qu'ils parcourent dans un intervalle de temps relativement semblable.

De plus, la distance totale quotidienne permet une représentation de l'utilité qui n'est pas affectée par le chaînage des activités. Ainsi les trois composants de la maximisation de l'utilité du transport sous contraintes de temps et de revenu, sont indépendants de l'organisation des activités.

Enfin, la performance et la productivité du système d'offre de transport est mesurée en passager-kilomètre, tonne-kilomètre ou véhicule-kilomètre, à une certaine vitesse. Comme pour déterminer un équilibre entre offre et demande de transport, il est nécessaire d'utiliser la même unité de mesure. La distance totale quotidienne paraît donc être un dénominateur

La "Loi de Zahavi".

commun entre l'offre et la demande de transport suffisamment consistant pour étudier l'équilibre du marché de transport.

L'usage de la distance comme mesure des opportunités économiques et sociales de l'individu, permet d'interpréter les résultats directement, par exemple, en terme d'urbanisme, en terme environnementaux. Les réinvestissements des gains de vitesse et donc de temps en distance expliquent une part du phénomène de l'étalement urbain. L'accroissement des distances a des incidences directes en terme environnementaux par rapport aux émissions de polluants.

La distance totale quotidienne semble donc être un indicateur adapté de l'utilité des déplacements effectués par les usagers. Pour s'intégrer à l'ensemble du modèle, la demande sera divisée entre les différents modes, ce qui permettra de déterminer un niveau de motorisation en fonction de la distance totale quotidienne parcourue en automobile. Cette dernière sera déterminée à l'issue de la maximisation de l'utilité du transport du ménage sous ses contraintes de temps et de revenu, processus au travers duquel, l'automobile sera mise en concurrence avec les autres modes.

b) Les budgets de transport.

Les contraintes les plus fortes pour les individus, et donc les plus souvent utilisées dans les modèles de transport sont les ressources de temps et de revenu. Et il semble que les allocations de temps et d'argent entre les différentes activités font apparaître l'existence de budgets maximums. Nous allons voir, qu'il paraît possible de définir un budget (temporel ou monétaire) maximum que le ménage est prêt à consacrer à son transport, et dont le niveau est fonction de ses caractéristiques socio-économiques. Dans ses études des allocations de ressources au transport, Zahavi parvient à définir en fonction du type de ménage, des budgets maximums qui constituent les bornes supérieures des dépenses du ménage, et qui semblent être relativement constants dans le temps et dans l'espace.

Comme nous l'avons vu précédemment, la notion de budget monétaire de transport se rattache au ménage, tandis que le budget temps de transport a un caractère individuel. Cependant, l'étude de l'un comme de l'autre présente les mêmes types de perturbations. En effet, l'analyse du budget d'un ménage ou d'un individu est effectuée en regroupant les observations de ménages constituant des groupes sur plusieurs jours. De fait, à un tel niveau agrégé il peut apparaître plusieurs types de variations. Une variation entre les membres des

différents groupes est possible, elle peut être expliquée en partie, par des variations des caractéristiques socio-économiques entre membres d'un groupe. Même si les groupes sont définis de façon à être composés de ménages ou d'individus homogènes, il persiste des disparités entre les membres. Ensuite une variation entre les jours d'observation peut apparaître, les comportements n'étant pas parfaitement identiques de jours en jours, une certaine dispersion autour du comportement moyen observé sera perceptible chaque jour. En définitive, pour déterminer s'il existe une régularité dans l'allocation de temps ou de revenu, il est nécessaire de distinguer les variations de premier ordre qui affectent directement le processus d'allocation de l'ensemble du groupe étudié, des variations internes à ce groupe, comme les variations entre individus et les variations quotidiennes.

Enfin, l'hétérogénéité des sources de données, pose le problème de la comparabilité. En effet, pour le budget temps de transport par exemple, plusieurs échelles d'observation peuvent être disponibles. Cependant, si les budgets temps sont observés « par ménage », alors il est impératif de pouvoir les relier au nombre d'individus ou de voyageurs par ménage, afin de déterminer des budgets temps par individu. Les données « par personne » présentent l'avantage de se rapporter à l'ensemble de la population (personnes mobiles et immobiles le jour de l'enquête). Tout d'abord, des différences de définition de la « personne » existent entre les enquêtes. De plus, le budget temps obtenu sera une moyenne entre les mobiles et les immobiles, qui, de fait, sous-évaluera la contrainte de budget temps d'une personne qui doit déterminer les caractéristiques de son transport. La mesure du budget temps par personne mobile apporte une solution, car elle fournit l'information pour une personne potentiellement mobile. Mais dans le groupe de personnes mobiles observé, il persiste des disparités importantes entre, par exemple, les individus qui se déplacent, à l'occasion, à pied sur de courtes distances, et ceux qui quotidiennement effectuent un trajet en automobile et de longue durée. Une moyenne entre ces deux types extrêmes d'individus sera encore trop peu significative, c'est pourquoi une segmentation du groupe des personnes mobiles en fonction de leur mode de transport pourra être efficace. Enfin, il sera préférable d'utiliser cette mesure par personne mobile de façon à obtenir des moyennes pour une personne, sur plusieurs jours, plutôt que des moyennes quotidiennes des budgets temps de plusieurs personnes, car les variations de budgets temps apparaissant de jour en jour dans le comportement quotidien d'une seule personne sont plus importantes que les variations entre personnes sur une seule journée.

La "Loi de Zahavi".

Le budget temps par personne mobile semble être alors l'observation des dépenses de temps effectuées, qui peut servir d'indicateur de la contrainte de temps pour les personnes qui voudront se déplacer. Toutefois, après avoir défini le niveau pertinent de l'observation du budget temps de transport, d'autres problèmes peuvent encore apparaître, comme la perception inégale des durées par les individus interrogés, ou les arrondis de durées réalisés lors des réponses aux questionnaires.

C'est donc en alliant la connaissance des budgets temps de transport par personne mobile et du nombre de personnes mobiles par ménage que le budget temps de transport par ménage sera déduit des observations.

Malgré l'ensemble des perturbations existantes, la conjecture suivant laquelle les individus consacrent un temps relativement constant à leur transport, semble être consistante. En effet, comme nous l'approfondirons ultérieurement, les temps alloués au transport (comme ceux alloués au sommeil) représentent une proportion stable du temps de l'individu¹², et les variations autour du temps moyen observé sont similaires. Tout ceci conduit à suggérer que la stabilité des budget temps de transport quotidiens ne est pas une coïncidence.

Le niveau d'agrégation des données relatives au budget monétaire de transport est lui aussi sujet à discussion, d'autant plus que le revenu est, à l'inverse du temps, une ressource transférable dans le temps. A l'inverse du temps, les données relatives au revenu sont disponibles au niveau du ménage, une lecture directe des données fournira donc une mesure des budgets monétaires de transport. Seul persiste le problème des variations attribuables aux définitions de la durée de la période étudiée et des groupes constitués. Il convient donc d'étudier les budgets monétaires de transport, tout d'abord à un niveau très général (budgets monétaires annuels par pays), pour ensuite désagréger les données, segmenter la population et réduire la durée d'observation. De cette façon, Zahavi, parvient à retrouver les observations des variables utilisées dans le UMOT : les budgets monétaires de transport quotidiens par ménage, qui présentent eux aussi une forte tendance à la constance au cours du temps et entre les villes.

¹² SZALAI A., (1972), *The use of time : Daily activities of urban and suburban populations in twelve countries*, Mouton Publication.

La "Loi de Zahavi".

Il est donc possible à partir des données disponibles sur les caractéristiques de transport urbain quotidien de donner une valeur aux grandeurs utilisées dans le UMOT. La demande, représentée par la distance quotidienne du ménage représentera l'utilité économique atteinte. Les contraintes de budgets peuvent être évaluées par l'étude des dépenses de transport réalisées, qui, en raison de leur constance, sont représentatives des contraintes de budgets auxquelles fait face un ménage. Le budget temps de transport est recomposé à partir du budget temps de transport par personne mobile et du nombre de personnes mobiles par ménage. Et le budget monétaire est obtenu par l'étude des dépenses quotidiennes en revenu des ménages.

Ayant ces définitions des termes du *UMOT Process*, la partie suivante présentera le *UMOT Process* dans sa phase applicable, comme un outil de prévision de trafic.

La "Loi de Zahavi".

B. Le UMOT Process.

A partir des mesures de la demande, des budgets définis dans la partie précédente, et de l'expression des coûts (temporels et monétaires) par unité de distance, le comportement de transport des individus peut être approché. En se basant sur les observations des caractéristiques des acteurs de l'offre et de la demande de transport (les caractéristiques du réseau, des modes de transport, etc. pour l'offre et des caractéristiques socio-économiques des individus, pour la demande), le modèle reconstitue le comportement de demande de transport, en terme de distance parcourue et de mode choisi. Ainsi il doit être capable à partir des observations des acteurs du transport de retrouver les observations de leurs comportements. L'objectif est la construction d'un outil de prévision de demande de transport au niveau d'une ville. Cet instrument devant être transférable entre les périodes et entre les villes.

Sur le marché des transports urbains, la demande peut être simulée par une maximisation de l'utilité du transport sous contraintes. Ainsi, la distance quotidienne parcourue, mesure de l'utilité, sera maximisée sous les deux contraintes les plus pesantes sur les choix de déplacement des ménages :

- la contrainte de budget temps, mesurée par le produit de la dépense temporelle moyenne d'un individu et du nombre moyen de personne mobile par ménage. Sous l'hypothèse de rationalité de l'individu, les dépenses observées sont le niveau optimal de dépenses. L'individu sature donc sa contrainte de temps. Il est donc possible d'approcher la contrainte de budget temps par la dépense réalisée et observée.
- la contrainte de budget monétaire, évaluée par les dépenses monétaires moyennes des ménages.

Le ménage détermine sa distance quotidienne totale de telle sorte que la somme des dépenses monétaires pour chaque mode et la somme des dépenses temporelles pour chaque mode n'excèdent pas les budgets monétaire et temporel définis ci-dessus. Les indices de coûts temporels et monétaires du transport seront exprimés par unité de distance. Ces coûts sont déterminés par l'offre sur le marché et donc ici par les performances du système d'offre de transport. Il devient donc nécessaire de quantifier ces variables de coûts en fonction du niveau d'infrastructures disponible. Pour cela Zahavi se réfère à ses précédentes études, dont

La "Loi de Zahavi".

essentiellement « *the TT-relationship* » et « *the measurement of travel demand and mobility* »¹³.

Le processus de génération des déplacements est centré sur l'équilibre du marché. Sur celui-ci, la demande du ménage (la distance quotidienne totale parcourue avec chacun des modes) s'ajuste de telle sorte que les dépenses correspondant aux distances égalent le montant des budgets de transport. Mais cet équilibre se déduit par itération car la distance demandée en automobile intensifie le trafic sur le réseau et affecte donc les coûts, les prix proposés par l'offre sur le marché.

A partir d'un niveau de motorisation donné, la distance critique justifiant la motorisation est obtenue. Ainsi la demande s'ajuste à partir :

- des coûts définis par l'interaction entre le réseau et ce nombre maximum de véhicules.
- des budgets de transport temporels et monétaires de chaque ménage.

La comparaison de la demande de transport automobile à la distance critique justifiant la motorisation, fournit un nouveau taux d'équipement automobile des ménages et donc de nouveaux coûts temporels et monétaires, par interaction de la motorisation et des capacités du réseau.

Le processus UMOT se déroule alors de la façon suivante :

- 1- Les données de la taille du ménage et du niveau de motorisation du ménage détermine le nombre de personnes mobiles du ménage. La relation liant ces trois variables résulte d'une régression linéaire simple effectuée à partir des données. Or la motorisation du ménage étant déterminée par le modèle, la valeur qui sera introduite dans le processus à la première itération sera une valeur quelconque, qui s'ajustera au fur et à mesure des itérations.
- 2- Le temps quotidien de transport par personne mobile est déterminé à l'aide de la régression linéaire qui explique cette durée par une constante ajustée d'une fonction

¹³ ZAHAVI Y., (1973), *The TT-relationship : a unified approach to transportation planning*, Traffic engineering and control, pp.205-212.

ZAHAVI Y., (1978), *The measurement of travel demand and mobility*, presented at the Joint International Meeting on the Integration of Traffic and Transportation Engineering in Urban Area, Tel Aviv, Israel.

La "Loi de Zahavi".

inverse de la vitesse porte à porte¹⁴ moyenne du ménage (cette formalisation sera présentée dans l'analyse empirique des budgets temps de transport, p.72). Ainsi le budget temps de transport converge vers le terme constant de cette expression, lorsque la vitesse augmente. La vitesse porte à porte devra, de la même façon que le niveau de motorisation du ménage, être déduite du processus. La première valeur utilisée sera une composition de la vitesse sur le réseau de l'automobile et de la vitesse sur le réseau des transports en commun. Cette vitesse sera ajustée au cours des itérations successives.

Remarque : dans son modèle applicable, Zahavi utilise une régression linéaire pour modéliser le budget temps de transport, alors que jusqu'à présent il a été déclaré constant. Il s'agit en fait de la constance de la moyenne des budgets temps de transport. Par contre pour le modèle, le budget temps de transport est, comme nous le verrons dans une partie ultérieure du rapport, lié à la vitesse de transport de l'individu. Cette relation permet d'expliquer une part des variabilités existantes dans les budgets temps de transport observés.

- 3- Le produit du nombre de personnes mobiles par ménage, par le temps de déplacement par personne mobile fournit le premier budget : le budget temps de transport du ménage.
- 4- Le budget monétaire est, quant à lui déterminé comme une proportion fixe du revenu du ménage : 11%. Il est à noter que cette constance est à mettre au même plan que celle de la constance des budgets temps dans le modèle. En effet, c'est la présence simultanée des deux constances qui permet de résoudre le modèle.
- 5- Afin de déterminer les choix des ménages, il est nécessaire de connaître les vitesses et les coûts des différents modes de transport accessibles aux ménages. Ainsi, le coût kilométrique en automobile est déduit à partir d'indices de prix du carburant consommé, en fonction de la vitesse moyenne du réseau et du nombre d'occupants du véhicule. La vitesse moyenne sur le réseau est issue de la TT-relationship¹⁵, méthode d'analyse du trafic sur un réseau conçue par Y. Zahavi (1973). L'outil met en relation

¹⁴ La distinction est faite, dans le UMOT, entre la vitesse du réseau et la vitesse porte à porte. Les deux sont exprimées comme le quotient de la durée du déplacement sur la distance parcourue. Cependant, la vitesse porte à porte se base sur les durées perçues et déclarées par les sondés. Ainsi elle tient compte du temps d'accès, du temps d'attente, du temps de conduite et du temps de sortie du véhicule.

¹⁵ ZAHAVI Y., (1973), *The TT-relationship : a unified approach to transportation planning*, Traffic engineering and control, pp. 205-212.

La "Loi de Zahavi".

les mesures de l'intensité du trafic, de la vitesse moyenne du réseau, et de la densité de l'infrastructure routière. Ces mesures peuvent être exprimées à partir de la motorisation des ménages, du nombre de ménages, du temps quotidien d'usage par automobile, de la longueur, en kilomètre du réseau routier, afin d'exprimer la vitesse moyenne du réseau à partir des données disponibles. Enfin les vitesses particulières de chaque mode sont déterminées comme des proportions fixes de la vitesse moyenne du réseau (67% pour l'automobile et 33% pour les transports en commun).

- 6- Les données des vitesses, des coûts par modes, et des budgets temps et monétaires des ménages, permettent de représenter le système de choix du ménage comme un système d'équations. Dans le cas où deux modes sont concurrents (l'automobile (c) et les transports en commun (t)), ce système est :

$$D_c c_c + D_t c_t = M$$

$$D_c t_c + D_t t_t = T$$

où (D_i , c_i , t_i) sont les (distances, coûts kilométriques, durées par kilomètre) pour le mode i . M et T représentant les deux budgets monétaire (M) et temporel (T).

L'acheminement de la résolution de ce système est dépendant de la forme du système d'équations considéré. Cependant, la résolution de ce système fournit (sous certaines conditions mathématiques) les niveaux de distances demandées pour chaque mode.

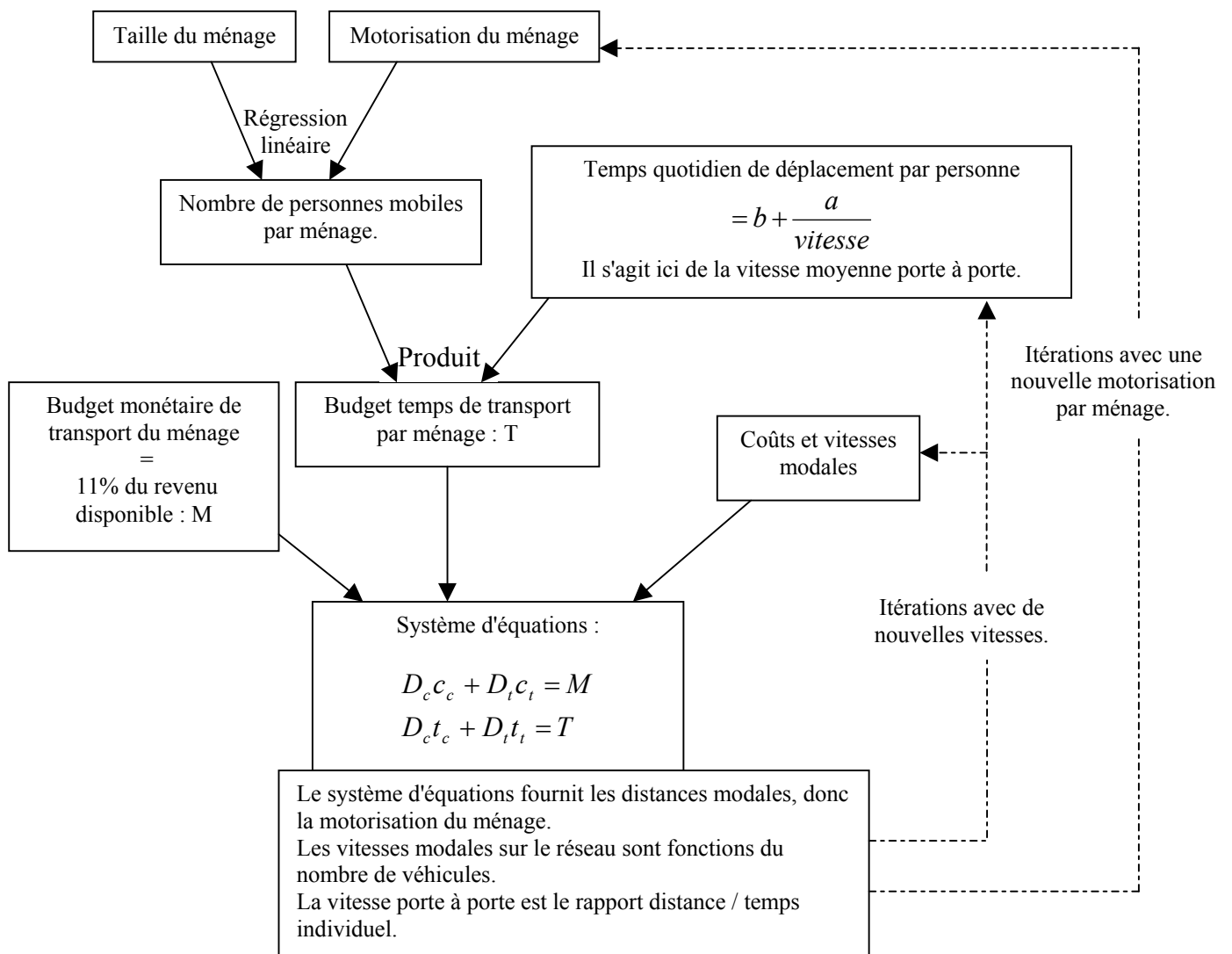
- 7- Il est alors possible de recalculer la vitesse moyenne porte à porte (comme le rapport des distances totales sur le temps total de transport), ainsi que le taux de motorisation. Le niveau de motorisation est déterminé par la distance demandée en automobile. Si cette dernière dépasse un seuil critique, l'équipement du ménage est réalisé. Mais afin de représenter la diversité de comportement des ménages et les erreurs de mesures possibles, une distribution statistique est introduite. Une loi normale représente alors la dispersion de la demande kilométrique en automobile autour de la moyenne observée. Ainsi, la probabilité qu'un ménage demande un certain niveau de distance en automobile peut être calculée, pour ensuite déterminer la probabilité que ce ménage se motorise.
- 8- Pour l'itération suivante, les niveaux de motorisation et les vitesses déterminés sont utilisés afin de réajuster le processus à chaque itération, le conduisant peu à peu vers la situation d'équilibre du marché de transport. Après les tests de convergence effectués

La "Loi de Zahavi".

par Zahavi, ce processus semble fonctionner et donner des résultats consistants rapidement, en peu d'itérations.

Un schéma simplifié du modèle itératif peut être :

Illustration 1 : Les interactions du modèle UMOT



La "Loi de Zahavi".

Conclusion du processus :

Le processus générateur des déplacements urbains proposé par Zahavi est basé sur l'hypothèse de la maximisation des distances sous les contraintes qui pèsent sur les individus au travers de leurs ressources et du système d'offre de transport. Comme nous le verrons dans la partie suivante, les résultats empiriques en matière de constances des budgets temps et monétaire de transport, hypothèses principales de ce processus, semblent relativement satisfaisantes. Et le fait que le modèle reproduise les relations observées indique que la mesure de la distance est une bonne approximation de la demande et que la maximisation de cette distance sous contrainte convient à représenter le comportement de transport des individus.

Dans la partie suivante, le rapport présentera les analyses de Zahavi sous leurs aspects empirique et statistique. Les travaux initiaux qui ont fait naître l'hypothèse de la constance des budgets temps de transport seront tout d'abord présentés. Ensuite, les analyses des budgets temps et monétaires de transport du UMOT seront étudiées.

Enfin dans une dernière partie, nous observerons les résultats du UMOT à la lumière des critiques qui ont été formulées sur ses aspects théoriques, ses choix méthodologiques et la consistance de ses résultats.

C. L'observation de la constance des budgets temps et monétaires.

1. La naissance de l'hypothèse de constance des budgets temps de transport.

Les travaux constituant la source de l'hypothèse sont des travaux de sociologie effectués par Szalai et al. en 1972, à partir d'observations internationales des usages du temps pour les activités quotidiennes sur la période 1965-66. A partir des 30000 emplois du temps quotidiens collectés, des durées moyennes consacrées à certaines activités sont calculées au niveau de pays (Belgique) ou de villes et groupes de villes (Kazanlik en Bulgarie, 6 villes en France, 44 villes aux Etats-Unis, etc.). De ces études, Szalai met en avant la stabilité de certains budgets temps tels ceux consacrés au sommeil ou au transport. Plus précisément pour ce dernier, les durées passées dans les transports pour le motif « travail » ne semble pas être liées à la performance du réseau de transport, contrairement aux distances parcourues. La conclusion est déjà que les gains de temps permis par les améliorations de vitesse semblent être réinvestis dans du transport afin d'accroître les distances parcourues. Et ni les différences de niveaux d'industrialisation, ni celles en terme de motorisation ne semblent avoir d'effet significatif sur les budgets temps de transport.

2. L'analyse empirique des budgets temps et monétaires de transport par Zahavi.

Dans le *UMOT Project*, Zahavi se propose de renouveler l'étude des budgets temps et monétaires de transport, afin de réactualiser les observations et de fonder les hypothèses nécessaires au développement du modèle UMOT : la régularité des dépenses de transport. Ainsi, il observe tour à tour différentes données des pays ou villes suivants : RFA, Munich et Nuremberg, UK, 7 villes françaises, Washington, Twin Cities, Saint Louis, 7 autres villes américaines, Bogota en Colombie, Santiago du Chili, Singapour, Salvador au Brésil. A l'aide des résultats chiffrés, l'ensemble des résultats obtenus par Zahavi seront décrits dans la section suivante.

a) *Les budgets temps de transport :*

Les tableaux suivants (*tableaux 4a, b, c*) synthétisent les données relatives aux différentes villes étudiées. Pour des raisons de disponibilité des données, seuls les déplacements en automobile effectués sur un jour de semaine sont pris en compte. Afin de permettre une comparaison internationale, les données par automobile sont reproduites ci-dessous. Elles permettent une première exploration des comportements de déplacement et d'approcher les données individuelles, qui sont difficilement comparables du fait de divergences importantes entre les pays dans les définitions et les méthodes utilisées. En effet, pour certains pays, seuls les déplacements motorisés sont comptabilisés, alors que d'autres détaillent la marche à pied. Les déplacements sortants de la zone d'étude ne sont pas toujours considérés, et de fait le problème de la définition de la zone d'étude se pose, etc.

Tableau 4a : Caractéristiques des transports dans les villes

Caractéristiques	Monroe	Orlando	Cincinnati	Knoxville	Baltimore	Twin Cities
Pays	Etats-Unis	Etats-Unis	Etats-Unis	Etats-Unis	Etats-Unis	Etats-Unis
Année	1965	1965	1965	1962	1962	1970
Population	96530	355620	1391870	241810	1607980	3812460
Surface en km²(*)	200	1400	3495	-	-	7680
Automobiles	31650	137260	484770	78374	437540	717000
Automobiles pour 100 personnes	32,8	38,6	34,8	32,4	27,2	38,3
Déplacements en automobile	183196	594230	1759080	418140	1537420	293870
Nombre moyen de déplacements en automobile	5,79	4,33	3,63	5,34	3,60	4,12
Distance moyenne d'un déplacement en km(*)	4,51	6,92	8,85	-	-	8,19
Durée moyenne d'un déplacement en min	7,3	9,7	13,7	8,1	12,3	12,5
Distance quotidienne par automobile en km(*)	26,1	30	32,1	-	-	33,7
Temps quotidien par automobile en min	42,6	42	49,8	43,3	44,3	48

Tableau 4b : Caractéristiques des transports dans les villes

Caractéristiques	Washington D.C.	Kingston-upon-Hull	Belfast	Nuremberg	Copenhague	Londres
Pays	Etats-Unis	Angleterre	Irlande	Allemagne	Danemark	Angleterre
Année	1968	1967	1966	1975	1967	1962
Population	2558100	344890	504620	1160000	1707000	8826620
Surface en km²(*)	3410	107	127	3000	2760	2450
Automobiles	1018900	43183	64250	328000	432950	1249453
Automobiles pour 100 personnes	39,8	12,5	12,8	28,3	20,1	14,1
Déplacements en automobile	3342000	270000	361430	1007000	1445300	4080400
Nombre moyen de déplacements en automobile	3,28	6,25	5,63	3,07	4,21	3,27
Distance moyenne d'un déplacement en km(*)	10,59	4,15	4,65	11,20	7,91	7,18
Durée moyenne d'un déplacement en min	15,6	6,9	8,6	17,2	10,5	13,7
Vitesse en km/h	40,7	36	32,4	39,2	45	31,3
Distance quotidienne par automobile en km(*)	34,7	25,9	26,2	34,4	33,3	23,5
Temps quotidien par automobile en min	51	43,2	48,6	52,8	44,4	45

Tableau 4c : Caractéristiques des transports dans les villes

Caractéristiques	Tel Aviv	Kuala Lumpur	Singapore	Bogota	Bangkok
Pays	Israël	Malaisie		Chili	Thaïlande
Année	1965	1973	1968	1969	1972
Population	817000	912490	1536000	2339600	4067000
Surface en km²(*)	190	337	518	2520	3100
Automobiles	39640	65440	62390	55000	175000
Automobiles pour 100 personnes	4,9	7,2	4,1	2,4	4,3
Déplacements en automobile	288580	443950	314000	250000	612500
Nombre moyen de déplacements en automobile	7,28	6,78	5,03	4,55	3,50
Distance moyenne d'un déplacement en km(*)	4,09	5,36	7,03	6,76	7,40
Durée moyenne d'un déplacement en min	9,1	12,4	12,7	18	22,8
Vitesse en km/h	27	25,9	33,2	22,5	19,5
Distance quotidienne par automobile en km(*)	29,8	36,3	35,4	30,8	25,9
Temps quotidien par automobile en min	66	84	63,6	82,2	79,8

(Source : Y. ZAHAVI, The TT relationship (1973) et The UMOT Project (1979))

La comparaison internationale utilise des données relativement comparables qui sont celles concernant le parc automobile des pays. Ainsi, à partir du nombre moyen de déplacements, de la distance et de la vitesse moyennes par déplacement, la durée moyenne d'utilisation par automobile est déduite. Une constatation intermédiaire à l'hypothèse plus générale de Zahavi est que les durées moyennes par automobile pour des villes américaines

La "Loi de Zahavi".

ou européennes sont très proches malgré les écarts existant dans l'ampleur de la population ou du parc automobile. Cette durée oscille aux alentours de 0,78h (47 min), plus ou moins 5 min.

Cependant cette stabilité internationale n'est valable que pour des pays industrialisés. Comme le montre le troisième tableau, la durée moyenne d'usage d'une automobile dans des villes de PVD est nettement supérieure à celles observées dans des pays développés, de plus la variabilité de ces durées est aussi beaucoup plus forte. La différence en terme de niveau de motorisation entre les PVD et les pays développés explique l'essentiel des divergences de durées.

Dans une étude antérieure¹⁶, Zahavi met en avant, à partir de données sur 18 villes hétérogènes¹⁷, l'existence d'un niveau de motorisation critique de la population, à partir duquel les durées quotidiennes par véhicule se concentrent autour d'une même moyenne : 0,8h par véhicule et par jour (*illustration 2*).

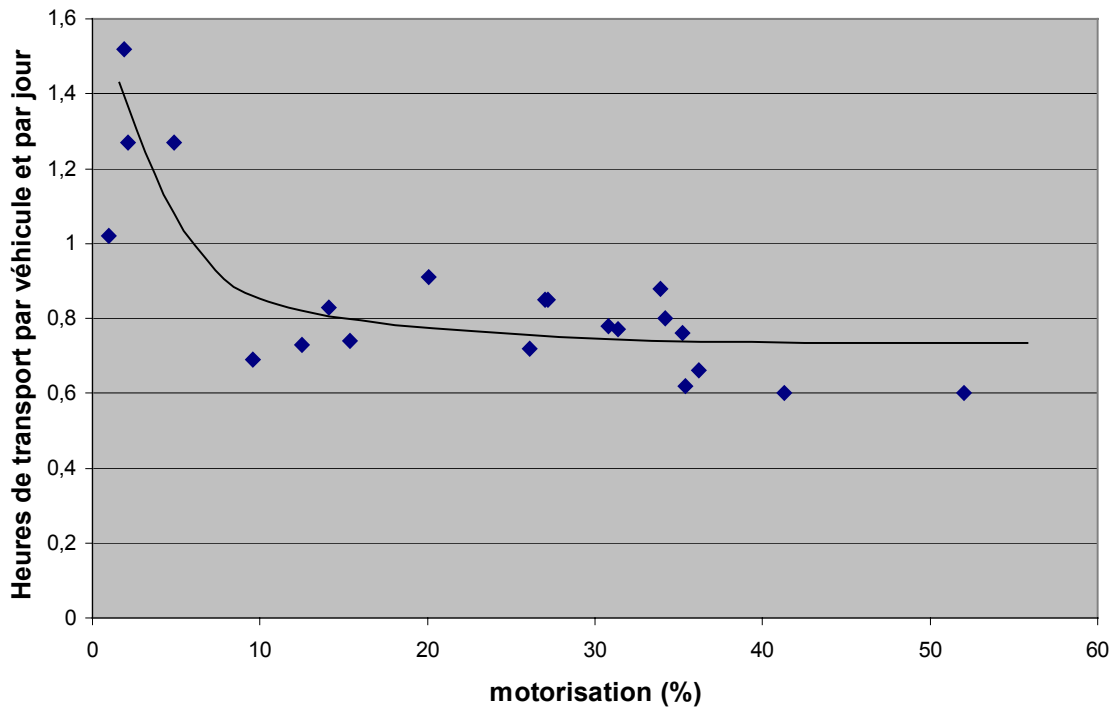
A partir de données relatives au véhicule, la constance des durées de transport par véhicule semble être approuvée. Les durées quotidiennes de déplacement par véhicule dans les villes de pays développés (villes dont le niveau de motorisation est supérieure à 10%, en voiture particulière par personne) sont comprises dans un intervalle étroit : [0,70h ; 0,88h] soit [42min ; 53min].

L'étude des durées par personne mobile est troublée par les différences internationales en terme de définition et de mesure des caractéristiques de transport. L'inclusion des caractéristiques de transport comme la marche à pied ou le vélo, des déplacements des enfants suivant un certain âge, ou encore la définition de l'aire urbaine ou de l'unité d'observation (budget temps par ménage, par personne mobile, ou par personne), diminuent la puissance des résultats de la comparaison des mesures internationales disponibles. Cependant, même si les budgets temps de transport par personne mobile des villes étudiées de par le monde, sont comprises dans un intervalle dont l'étendue peut être critiquable, il n'en reste pas moins des similitudes fortes entre villes au sein d'un pays.

¹⁶ ZAHAVI Y., (1973), *The TT-relationship : a unified approach to transportation planning*, Traffic engineering and control, pp. 205-212.

¹⁷ Athènes, Baltimore, Bâton Rouge, Bombay, Brisbane, Chicago, Columbia, Copenhague, Kansas City, Kingston, Knoxville, Londres, Meridian, Pulaski, Saint Louis, Tel-Aviv, Tucson, West Midlands.

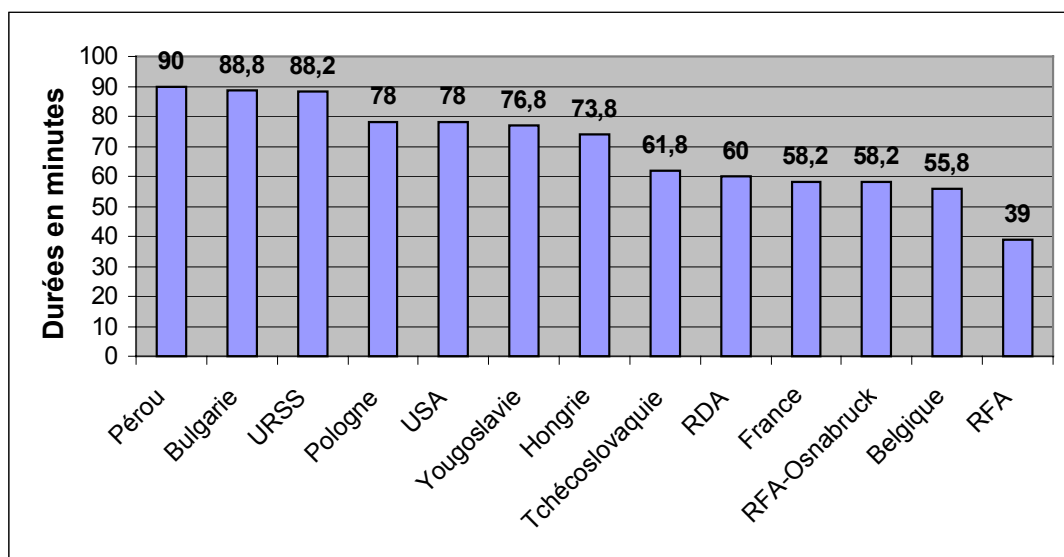
Illustration 2 : Heures quotidiennes de transport par véhicule



(Source : Y. ZAHAVI (1973), The TT-Relationship)

En effet, Szalai en 1972, obtenait des durées de transport par personne, variant entre 0,65 et 1,50 heures (soit 39 et 90 minutes) (*illustration 3*).

Illustration 3 : Durées de transport par personne de 12 pays



(Source SZALAI (1972) dans Y. ZAHAVI, The UMOT Project)

La "Loi de Zahavi".

L'essentiel des observations est dans l'intervalle [0,9 ; 1,3] (54 mn ; 78 min), la moyenne étant de 1,15h (69 min).

La comparaison des budgets temps de transport avec la performance des systèmes d'offre de transport des pays, permet d'avancer que le budget temps de transport n'est pas aussi sensible qu'on pourrait l'attendre aux améliorations des conditions de transport. Malgré une grande diversité des systèmes de transport, les budgets temps divergent relativement peu. Ceci est d'autant plus visible lorsque l'on observe les distances moyennes parcourues. Ces dernières sont plus importantes lorsque les systèmes de transport sont efficaces, jusqu'à quinze fois plus grandes, mais les budgets temps varient très peu, en comparaison. Alors que l'amélioration des distances et l'augmentation des distances sont significatives, les budgets temps de transport quant à eux fluctuent relativement peu. Il apparaît aussi que la différence de budget temps entre des personnes ayant accès à l'automobile et des personnes n'ayant pas accès, est de 6%.

Les travaux de Szalai puis de Zahavi font donc apparaître de forts signes révélant une constance et une transférabilité des budgets temps de transport entre pays.

La constance après segmentation de la population.

Cette constance a été étudiée, lorsque la population est segmentée par rapport à une de ses caractéristiques. Tout d'abord, les villes de pays développées sont observées dans le *UMOT Project*, puis les villes de PVD. Certains résultats sont donnés par personne, d'autres par personne mobile ou enfin, par automobile.

Les Pays Développés.

La Grande Bretagne, l'Allemagne, la France et les Etats-Unis sont étudiés, par Zahavi. Malgré la diversité des sources et des unités qu'elles emploient, certaines relations ont pu être identifiées :

- **Les relations générales.** La stabilité des durées moyennes quotidiennes de déplacement est vérifiée entre les villes d'un même pays, mais aussi entre villes de pays différents, l'intervalle des budgets temps étant relativement étroit autour d'1 heure (Allemagne : ~1,05h (63min) ; Etats-Unis : ~1,1h (66min)). Ces données ne sont que de simples approximations, qui restent ambiguës dans leur comparaison et interprétation du fait des différences de définitions et de mesures employées,

La "Loi de Zahavi".

notamment à cause de la disponibilité variable de données par personne ou par personne mobile (Grande Bretagne : ~45 min (0,7h) ; France : ~45 min (0,7h)). Cependant, pour les données se concentrant sur un seul pays, l'homogénéité des sources de données peut être considérées plus réaliste.

- **Les relations au niveau de l'aire urbaine étudiée.**

Les caractéristiques décrivant chaque aire urbaine peuvent être suspectées d'affecter les budgets temps. Ainsi la densité de population, l'étendue de l'aire, etc. sont étudiées.

- *La population et la taille de la ville* : La durée moyenne quotidienne de déplacement par personne semble croissante avec la population de la ville et la taille de l'aire urbaine (7 villes des Etats-Unis). Cependant le réajustement par la proportion de déplacements externes (déplacements dont l'origine ou la destination est extérieure à la zone) tend à stabiliser la durée par personne. En effet, lorsque la proportion des déplacements externes est importante, la durée moyenne quotidienne de déplacement par personne est plus grande. En tenant compte de cet effet, les petites villes, où la proportion de déplacements externes est plus élevée, voient leur durée moyenne de déplacements quotidienne ajustée à la baisse. L'effet taille de l'aire urbaine disparaît alors, ce qui rend les budgets temps de transport quotidiens stables entre les villes de tailles différentes.
- *La densité de population* : L'étude de la relation existante entre la densité de population et le temps de transport quotidien, appliquée aux villes de Grande Bretagne, indique une stabilité de l'allocation de temps au transport autour de 45 minutes par personne. Cependant, il apparaît que dans les zones les plus denses, les modes de transport collectifs et la marche à pied reprennent l'avantage sur les modes privés dans l'allocation du temps entre les modes.
- *Au fil du temps* : D'après l'étude des budgets temps de transport par personne mobile de Washington (1955-1968) et Twin Cities (1958-70), la durée quotidienne moyenne de déplacement par personne mobile est stable, autour de 1,10 h, pour les deux villes et dans le temps.
- *La vitesse par personne mobile* : Dans l'étude des villes de Washington et Twin Cities, la stabilité des budgets temps de transport par personne mobile semble

La "Loi de Zahavi".

acquise dès que le seuil des 10 km/h par personne est franchi. Jusque là, la durée de déplacement quotidien est plus importante. Cela vient au crédit de l'existence d'un niveau critique de motorisation de la population qui lui procure une vitesse moyenne plus élevée.

- **Les relations au niveau des individus.**

- *Le jour d'observation* : Grâce à un sondage effectué sur plusieurs jours ouvrables de la semaine (hors week-end), (400 ménages interrogés sur trois jours de semaine), il apparaît dans l'étude de la ville de Munich que le jour de collecte de données importe peu dans le budget temps de transport moyen. La durée moyenne des déplacements quotidiens est, quel que soit le jour de 1,16h (70min).

- *Les caractéristiques du ménage* : Les travaux de Zahavi sur les villes de Washington et Twin Cities, se tournent aussi sur l'analyse des effets de variables telles que la distance de la résidence au centre ville, l'accès à l'automobile, la taille du ménage, le nombre de personnes mobiles par ménage, etc. Les tests de stabilité des budgets temps de transport par rapport à la distance au centre et le nombre de personnes mobiles par ménage indiquent que ces deux variables ont des effets négligeables sur les budgets temps, pour les deux villes et les différentes périodes. Il en est de même pour les variables : taille du ménage et accès à l'automobile.

Malgré tout, ces variables ont un effet perceptible au travers de la segmentation de la population d'autres villes. En effet, en créant des groupes de revenu, où en distinguant les personnes ayant accès ou non à l'automobile ou encore en étudiant la structure du ménage, les budgets temps de déplacement ne sont pas identiques de classes en classes. Et les variables : niveaux d'équipement automobile et taille du ménage sont influentes dans l'analyse de variance appliquée aux villes de Munich et Nuremberg.

Alors que les budgets temps de transport semblent relativement constants à des niveaux agrégés tels que celui du pays ou de la ville, la décomposition de la population en sous groupes fait apparaître des résultats qui peuvent être contradictoires. Dans cet exercice de segmentation, les choix opérés en terme d'unités d'observation, de variables de regroupement, etc. sont primordiaux. Il n'est pas rare que des études de budgets temps de transport usant de stratifications différentes de la population ne confirment pas la constance des budgets temps de

La "Loi de Zahavi".

transport. Cet aspect des études de budgets temps de transport est une des grandes sources de critiques de l'hypothèse de Zahavi et sera traitée dans la dernière partie du rapport.

En définitive, Zahavi éclaire les variables : niveau de motorisation du ménage et taille du ménage, car elles sont les variables qui lui semblent avoir l'effet le plus significatif sur le budget temps de transport du ménage. De fait, ce sont ces mêmes variables que nous retrouvons dans le processus de prévision de la demande, le *UMOT Process*, dans les étapes de détermination du niveau de budget temps de transport.

- **Le cas français** : Zahavi s'appuie sur les travaux de X. Godard (1978) pour illustrer les effets de la taille de la ville et de l'usage d'un mode motorisé sur les budgets temps de transport par personne. Godard mettait en lumière, d'une part une relative stabilité des budgets temps de transport par personne à un niveau agrégé, nuancée toutefois par le manque de fiabilité et de comparabilité des données. Et d'autre part des variabilités fortement prononcées lors de segmentation de la population par rapport à des facteurs tels que l'âge, le sexe, ou la profession. L'étude de ces sept villes met en avant deux tendances qui ne vont pas dans le sens de l'hypothèse de Zahavi. En effet d'après le (*tableau 5*), le budget temps semble, tout d'abord croissant avec la taille de la ville, et aussi, croissant dans le temps.

Tableau 5 : Budgets temps de transport par personne (de plus de 5 ans) dans 7 villes françaises

Villes	Année	Population	Durées en heures	
			modes motorisés	tous modes confondus
Orléans	1969	160	0,53	0,73
	1976	200	0,56	0,81
Nancy	1965	220	0,44	0,79
	1976	230	0,5	0,78
Grenoble	1966	275	0,53	0,88
	1973	350	0,53	0,78
Nice	1966	310	0,6	1,06
	1973	350	0,58	0,97
Rouen	1968	350	0,46	0,7
	1973	400	0,5	0,77
Lyon	1965	850	0,59	0,91
	1976	1000	0,66	0,98
Marseille	1966	900	0,58	1,16
	1976	950	0,65	0,98

(Sources : X. GODARD dans, Y. ZAHAVI, The UMOT Project)

Cette particularité du cas français, vis-à-vis des autres villes étudiées par Zahavi peut s'expliquer de plusieurs façons. Tout d'abord, il s'agit de durées par personne et non pas par personne mobile, contrairement aux données utilisées pour Washington, Twin Cities, Munich, et Nuremberg. De fait, les durées présentées sont proches de celles déterminées en Grande Bretagne, (~0,7h soit 42 min) par l'étude de l'effet de la densité de population sur les budgets temps de transport. La prise en compte de la totalité de la population, dont les personnes non mobiles le jour du sondage, diminue les budgets temps de transport. Mais, les effets des caractéristiques des ménages telles que la taille, ou la motorisation peuvent être différents suivant que la définition de la population étudiée comprend exclusivement les personnes mobiles ou non. N'étant pas identiquement définies, chacune de ces deux populations peut avoir des caractéristiques différentes et se comporter différemment. La croissance des budgets temps de transport au fil du temps doit être ajustée de l'évolution de la part de personnes mobiles dans la population totale, dont la croissance gonflera le budget temps par personne sans que le budget temps par personne mobile ne soit affecté. De plus, comme nous l'avons vu, l'effet taille est réduit en l'ajustant de la proportion des déplacements externes (dont l'origine ou la destination est à l'extérieure de la zone étudiée).

La "Loi de Zahavi".

Les doutes émis par Godard quant à la fiabilité de ses données, et les possibilités d'ajustements mises à jour par Zahavi permettent de considérer cette étude française comme un cas particulier, se détachant de la tendance observée dans les autres pays. Depuis, l'étude des enquêtes ménage françaises n'a pu confirmer ou infirmer la constance des budgets temps de transport. Un regroupement est observé aux alentours de 50 minutes, mais les effets de la taille de l'agglomération, ou les tendances au fil du temps ne sont pas rejetés avec certitude.

- **L'étude des variations autour de la moyenne :**

Enfin, alors que les budgets temps de transport des villes d'un même pays, et des villes de différents pays semblent converger vers un montant d'une cinquantaine de minutes, de fortes variations sont observées autour de cette moyenne. Au niveau d'une ville, la dispersion autour de la moyenne de la ville atteint un coefficient de variation de 0,6. Mais au-delà de ce fort niveau de variation, l'intérêt réside dans la stabilité de ce coefficient de variation. En effet, pour la plupart des segmentations effectuées sur les populations des villes, les coefficients de variation observés autour du budgets temps moyen du groupe sont très proches. Dans une ville, chaque segment de population semble adopter le même « comportement de dispersion » que les autres segments de population de la ville, mais aussi que les segments des autres villes. Ainsi la dispersion autour de la moyenne des individus d'un groupe de revenu est similaire à la distribution des autres groupes de revenu de la ville ou des autres villes.

Les Pays en Voie de Développement.

Les études relatives à des villes de pays en voie de développement, révèlent d'autres types de régularités des budgets temps de déplacement. Les résultats dans ces pays ne mettent pas à jour de constance des budgets temps de transport, mais des régularités fortes. Tout d'abord, les budgets temps de déplacement observés dans les PVD sont plus élevés que ceux des villes de pays développés. Cette différence constatée dans les PVD s'explique certainement par le fait que dans ces pays, les taux de motorisation, les vitesses moyennes, et de façon plus générale, la performance globale des réseaux de transport n'ont pas atteint le niveau des pays développés. La population n'a pas accès à un système d'offre de transport

La "Loi de Zahavi".

équivalent à celui des pays développés, et elle ne peut donc adopter le même comportement de mobilité que les populations des pays développés.

L'observation des budgets temps dans ces villes met à jour des tendances régulières. Dans les cas de Bogota (Colombie), Santiago (Chili), Singapour, et Salvador (Brésil), les budgets temps ne sont pas de même niveau entre ces quatre villes. Mais pour chacune d'elles, les analyses démontrent des effets semblables pour les variables : revenu, motorisation, taille de ménage, profession.

Ainsi, la croissance du revenu du ménage avec la taille du ménage permet d'expliquer la diminution du budget temps de transport avec la taille du ménage et la motorisation du ménage. Le revenu semble permettre le transfert modal vers des modes plus rapides, ce qui permet une diminution du budget temps de transport, à distance constante. Le partage modal évolue en fonction du revenu, au profit de l'automobile qui se substitue aux transports en commun, mais sans affecter la marche à pied. Il apparaît alors un effet revenu qui au travers de l'accès aux vitesses diminue, ou possède le pouvoir de diminuer les budgets temps.

Cependant, l'apport de la vitesse peut être surpassé par celui de la distance. Le revenu peut aussi être le déterminant de la localisation résidentielle, et comme dans le cas de Salvador au Brésil la structure urbaine incite les ménages aisés à s'éloigner du centre ville.

Nous retrouvons là l'arbitrage autour de la vitesse, qui d'une part permet de diminuer la durée des déplacements à distance donnée, et d'autre part d'augmenter les distances à durée de déplacement donnée.

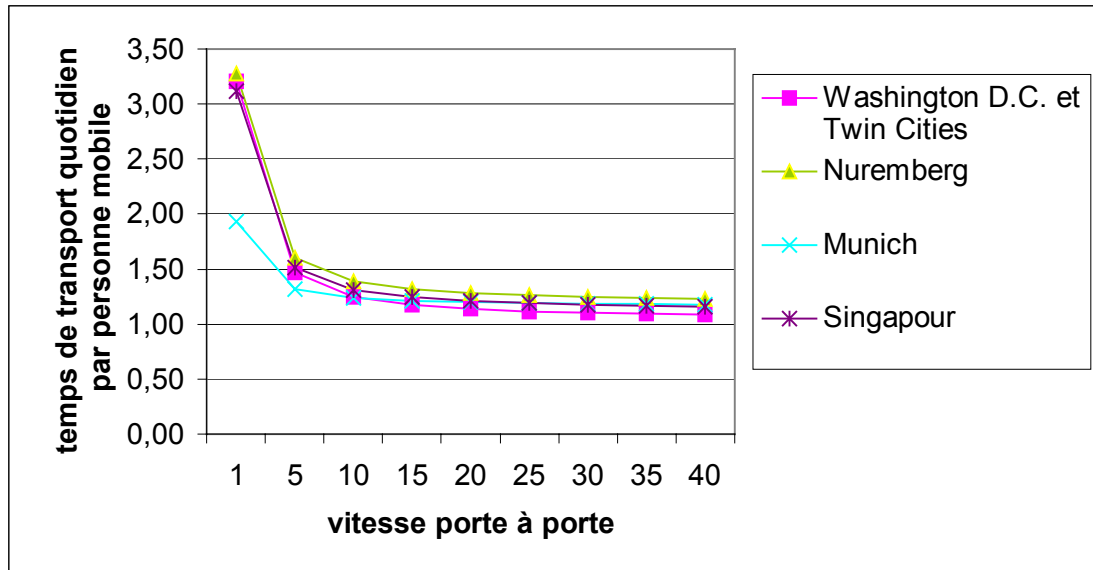
Il semble donc exister un niveau de vitesse critique au-delà duquel, à un niveau macro (celui d'une agglomération), les gains de temps obtenus grâce à la vitesse sont réinvestis dans du transport. Nous retrouvons l'analyse de Zahavi, dans *the TT-Relationship*, où le seuil semble être de 10% de motorisation de la population (en VP par personne).

De façon plus précise, Zahavi étudie la relation entre les budgets temps de transport et la vitesse porte à porte. A l'aide d'une régression linéaire, il établit la relation mathématique suivante :

$$T = b + \frac{a}{vitesse}$$

Où T est le temps de transport par personne mobile, *a* et *b* sont des coefficients à déterminer, et *b* peut être interprété comme le temps minimum qu'un individu allouera au transport.

Illustration 4 : Temps de transport par personne mobile et vitesse porte à porte



(Source : Y. ZAHAVI (1979), The UMOT Project)

Dès que les 10 km/h sont atteints, les budgets temps de transport se regroupent dans un intervalle relativement étroit. Les courbes admettent comme asymptotes les valeurs de b , qui sont pour ces villes relativement proches ($b \in [1,03 ; 1,18]$). Le coefficient a indique à quelle vitesse la convergence du budget temps de transport se fera. Plus a sera faible, plus rapidement le budget temps diminuera avec la vitesse ($a \in [2,01 ; 2,18]$, sauf Munich : $a = 0,77$). Et après multiplication de l'ensemble de la relation par la vitesse, le a pourrait être interprété, théoriquement, comme la distance parcourue pour une vitesse nulle, or la vitesse observée minimum est la vitesse de la marche à pied aux alentours de 4,7 km/h.

C'est donc à partir d'une régression linéaire que Zahavi détermine les valeurs de a et b , pour spécifier la relation liant la vitesse et les budgets temps de transport. Cette relation est cohérente et explique la constance observée ainsi que les variations autour d'elle. Les villes comparées offrent des vitesses relativement proches ce qui explique à la fois le rapprochement des budgets temps de transport et les variations autour de la moyenne.

b) Les budgets monétaires de transport.

Les données de référence doivent ici correspondre à des périodes suffisamment longues pour ne plus être lourdement affectées par la transférabilité de l'argent dans le temps. Ainsi, les analyses sont effectuées pour les mêmes pays que précédemment, à partir du revenu annuel. La relation de proportionnalité entre le revenu et les dépenses de transport est

La "Loi de Zahavi".

relativement semblable entre les pays et dans le temps quand ils sont observés à un niveau agrégé par pays :

Tableau6 : Budgets monétaires de transport en pourcentage du revenu disponible

Pays	Période	%	Variations
US	1963-1975	13,18	± 0,38
Canada	1963-1974	13,14	± 0,43
RFA	1971-1974	11,28	± 0,54
U.K.	1972	11,7	

(Source : Y. ZAHAVI (1979) The UMOT Project)

Sur la période étudiée par Zahavi, la part des dépenses de transport dans le budget reste stable au fil du temps, et ce malgré les changements majeurs dans les coûts, et notamment ceux de l'automobile. Ces derniers peuvent être répartis en deux groupes : les coûts fixes (dépréciation du capital, frais de permis, d'immatriculation, etc. et assurance) et les coûts variables ou opérationnels (carburant, entretien, péage, etc.). L'évolution comparée des deux catégories de coût révèle une évolution opposée, mais compensatrice. Ainsi durant la période de crise (1971-75), la part des coûts variables dans les dépenses de transport est croissante et surpasse peu à peu celles des coûts fixes. Ces derniers diminuant relativement aux coûts variables, de telle sorte que la part des dépenses de transport dans la consommation totale des ménages n'est pas affectée par la crise.

La stabilité du budget alloué au transport par le ménage suggère que le ménage veillera à conserver ce budget à un certain niveau au détriment (ou au profit) des autres postes de consommation. En comparant la part relative de chaque poste de dépenses dans les dépenses totales, un ordre entre les postes peut être établi. Mais l'observation de la répartition des dépenses entre différents pays et différents groupes de population ne fait pas apparaître le même ordre. En effet, dans la décennie 1963-73, le poste logement était le premier poste de dépense aux Etats-Unis, alors qu'en 1971 en Grande Bretagne, le premier poste était l'alimentation. Cependant, le poste transport est similaire pour ces deux pays autour de 12,5%. L'étude de la Grande Bretagne en 1971, était la seule étude disposant de données permettant de distinguer les dépenses des ménages motorisés des dépenses des ménages non motorisés. Elle révèle une grande disparité dans les positions du poste transport, selon que le ménage est motorisé ou non. Et alors que le budget monétaire pour les ménages motorisés semble constant quel que soit le revenu du ménage, le budget transport des ménages non motorisés est croissant avec le niveau de revenu du ménage. Toutefois, les niveaux de

La "Loi de Zahavi".

dépenses moyennes par ces deux groupes sont de l'ordre de 10-12% pour les ménages motorisés et de 3-5% pour les ménages non motorisés. Les mêmes ordres de grandeur sont retrouvés dans les analyses des villes de Washington, Twin Cities, Munich et Nuremberg, pour lesquelles il a été nécessaire de déduire indirectement le montant des dépenses de transport en fonction de la motorisation du ménage.

Ainsi la part relative moyenne du transport dans les dépenses totales d'un pays dépendra de la répartition des ménages motorisés et non motorisés à chaque niveau de revenu. De fait la croissance du budget monétaire de transport qui peut être observée dans certains pays peut être due à une croissance de la population des ménages motorisés par rapport aux ménages non motorisés.

c) Conclusion de Zahavi sur les budgets transport.

Après les études empiriques menées, Zahavi est en mesure d'énoncer les résultats suivants au sujet des dépenses de transport :

Le budget temps de transport :

- 1) le temps moyen consacré au transport par une personne mobile motorisée (automobile, transport collectif) est relativement stable entre les jours de la semaine, et est similaire au budget temps de transport observé dans d'autres villes de pays développés.
- 2) La variation des budgets temps de transport autour de la moyenne des individus de chaque segment de population d'une ville est similaire pour tous les segments de population et est proche de celle observée dans les autres villes et dans les autres pays (dont les pays en voie de développement). Le coefficient de variation est aux alentours de 0,6.
- 3) Le budget temps de transport moyen d'une personne mobile est une fonction inverse de la vitesse. Ainsi un gain de vitesse, a plus d'effet en terme de gain de temps lorsque les vitesses initiales sont faibles que lorsqu'elles sont élevées
- 4) Le budget temps de transport minimum pour une personne mobile motorisée dans une zone urbaine, à grande vitesse, est d'à peine plus de 1 heure par jour. Le budget temps de transport maximum d'une personne motorisée, à de faibles vitesses, est proche de 1,5 heures par jour dans les villes de pays développés.

La "Loi de Zahavi".

Le budget temps de transport moyen par personne mobile est donc dépendant des vitesses permises sur le système d'offre de transport et de la structure urbaine. De plus, les personnes aisées disposent plus facilement des vitesses les plus rapides, ce qui leur permet de parcourir plus de distance, en autant ou en moins de temps qu'il ne le faut pour les personnes moins aisées. Malgré tout, les budgets temps de transport moyens paraissent relativement constants dans le temps et proches entre les villes des pays développés.

Le budget monétaire de transport.

- 1) La dépense moyenne par ménage pour le transport semble être une proportion du revenu disponible relativement stable dans le temps et entre les villes d'un même pays. Les variations de cette proportion s'expliquent essentiellement par des divergences de définitions mais aussi par des différences de conjonctures entre les pays. La stabilité de chaque pays résiste même à la crise et la hausse des coûts du transport de la période 1973-75.
- 2) Le budget monétaire de transport par ménage est corrélé avec le niveau de revenu du ménage, ainsi qu'avec la motorisation du ménage. En effet, quel que soit le niveau de revenu du ménage étudié, 11 à 12% du revenu disponible des ménages motorisés sont alloués aux dépenses de transport, alors que les ménages non motorisés consacrent 3 à 5% de leur revenu disponible aux transports.
- 3) Cette différence de budget monétaire de transport entre les ménages motorisés et ceux qui ne le sont pas, indique que l'équipement du ménage fait partie de ses décisions majeures, telles que la localisation résidentielle. Cependant, la motorisation du ménage est positivement liée à son niveau de revenu.
- 4) Enfin, les variations quotidiennes autour de la moyenne des budgets monétaires de transport par ménage sont plus importantes que celles autour des budgets temps de transport (certainement en raison des facilités de transférabilité de l'argent dans le temps). Mais cette variation est similaire pour chacun des groupes de population constitués.

La "Loi de Zahavi".

La régularité constatée des deux budgets de transport, peut être interprétée comme un indicateur de l'existence de deux budgets de transport sous lesquels les choix de transport doivent être effectués. Ainsi les individus préfèrent consacrer certains montants de temps et d'argent à leurs transports, et la différence apparaissant entre leurs dépenses préférées et les dépenses réalisées sont explicables par les contraintes que la structure urbaine et le système d'offre de transport imposent. Sous les hypothèses du modèle micro-économique du consommateur, les dépenses qui sont observées sont la réalisation du choix des individus, qui étant supposés rationnels, maximisent leur utilité. Ainsi les dépenses constatées sont les solutions du programme de maximisation de l'utilité sous les contraintes de budgets. Au point de solution de la maximisation, les contraintes sont saturées, ce qui permet d'approcher le montant des contraintes qui pèsent sur l'individu par le montant observé de ses dépenses.

CRITIQUE DE ZAHAVI AU TRAVERS DES CRITIQUES DE LA METHODOLOGIE DE LA MODELISATION DES TRANSPORTS.

Le double aspect du travail de Zahavi a été présenté dans les deux parties précédentes. Tout d'abord un modèle théorique de demande de transport a été développé avec comme fondations, les concepts de micro-économie. En définissant une fonction d'utilité du ménage et deux contraintes de transport : contraintes de temps et de revenu, il est possible de représenter le comportement de déplacement, la demande de transport du ménage par l'outil micro-économique de la maximisation sous contraintes de l'utilité. Cette étape de modélisation très théorique permet de faire apparaître et de quantifier les relations économiques existantes entre les différents agents, et leurs diverses caractéristiques. Ainsi le modèle UMOT identifie les relations croissantes entre la distance quotidienne totale parcourue par le ménage et les budgets temps et budgets monétaires de transport. Et il éclaire aussi les effets négatifs de variations positives des coûts temporels et monétaires d'une unité de transport. C'est l'ensemble de ces relations théoriques qui permet d'établir un modèle de demande applicable et plus simplement quantifiable. Le *UMOT Process* peut alors, à l'aide des données observées représenter et quantifier le comportement des ménages. Le modèle micro-économique théorique apporte un fondement théorique à ce modèle appliqué. Et les résultats empiriques de ce dernier justifient les choix effectués dans le modèle théorique.

Dans un second temps, l'analyse de données crédibilise les hypothèses et les résultats des deux modèles. Tout particulièrement, l'étude des constances des budgets temps et monétaires tente de justifier l'hypothèse qui permet le passage de l'observation à l'application de la régularité des dépenses et des contraintes de temps et de revenu utile à l'application du *UMOT Process*.

Au cours de ce travail, Zahavi a dû choisir les définitions qu'il a utilisées dans ces modèles et analyses de données. Par exemple, à chaque étape une unité d'observation a été définie dans le but d'assurer une cohérence entre les étapes : études de données, modélisation micro-économique et application du modèle, tout en préservant la justification propre de chaque unité choisie. Mais aussi le choix des méthodes utilisées dans la phase micro-économique, ou les analyses de données sont sujettes à de nombreux choix (formes fonctionnelles, méthodes de mesures, etc.).

La "Loi de Zahavi".

L'objectif de cette troisième partie sera de produire un début d'éclairage, et d'apporter quelques notions de justification ou de critique aux divers choix effectués par Zahavi.

A. Débat sur la méthodologie de la modélisation dans le transport quotidien urbain.

L'ensemble des débats portant sur l'économie des transports se concentre à deux étapes distinctes dans le cheminement de l'analyse économique. La première étape est la phase de modélisation des comportements de transport des individus. Cette dernière est sujette à discussion car de nombreux choix en terme d'outils de formalisation économique, d'unité décisionnelle, de variables influentes, de méthodes de quantification sont à justifier. La seconde étape est celle de l'observation et de la détermination de régularités dans le comportement de transport. Les méthodes d'analyses de données, les choix des unités d'observation, des unités de mesure, des stratifications des populations observées, comportent un bon nombre d'atouts et de défauts qui rendent ambiguës les justifications de certains choix opérés. Ainsi, suivant les choix opérés, certaines comparaisons entre unités d'observation seront ou non possibles, et certaines conclusions ne seront pas toujours pertinentes selon les découpages de population effectués. Comme nous le verrons par la suite, l'ordre donné ici entre ces deux étapes est lui aussi discuté, la recherche avançant, tantôt grâce à une observation qui inspire la modélisation théorique, et tantôt une modélisation déductive découvrant des régularités théoriques qui seront par la suite confirmées empiriquement.

1. La modélisation économique en transport.

L'une des réponses les plus concrètes que la science économique peut apporter à une question est un modèle capable de simuler les mécanismes économiques réels à l'œuvre. Ce modèle a trois objectifs : la description, la compréhension de la réalité et la mise en pratique, cette dernière comprenant les aspects de l'aide à la décision, de la prévision, etc. D'ores et déjà, nous retrouvons l'opposition que nous évoquons entre le « praticien » et le « scientifique ». L'objectif recherché par chacun des deux profils est, pour le premier de construire un « modèle applicable » et répondant aux attentes d'un « commanditaire ». Alors que pour le second profil, l'objectif est la représentation de la réalité (et par conséquent sa compréhension) à l'aide d'un « modèle compréhensif ».

La "Loi de Zahavi".

a) Le modèle idéal.

En 1983, Supernak¹⁸ énonçait les dix qualités nécessaires au modèle idéal en transport :

- Le modèle est simple et utilise simplement les données disponibles.
- Il donne une représentation précise de la réalité et est utilisable et fiable dans la prévision.
- Il est transférable géographiquement et est adaptable.
- Il est flexible pour des niveaux d'agrégation et de zonage différents.
- Il reflète les interactions entre les étapes du processus.
- Il reflète les interactions entre l'offre et la demande.
- Il est composé de sous-modèles parfaitement compatibles entre eux, notamment par rapport à leurs unités d'observation.
- Il reflète les interactions entre le système de transport et l'aménagement du territoire.
- Il est dynamique et est capable de refléter les changements dynamiques dans les sous systèmes.
- Il est sensible à l'ensemble des politiques dont celles de transport.

En définitive, il apparaît que le modèle doit correctement définir et représenter les groupes d'agents et leurs interactions inter et intra-groupes. Pour être applicable, il doit être transférable dans l'espace, ce qui contraint à un usage de données relativement standardisées et à un pouvoir d'adaptabilité aux données. Il est aussi nécessaire qu'il puisse appréhender les aspects dynamiques des groupes et leurs interactions. Enfin, pour répondre aux attentes des autorités demandant un modèle, la fiabilité des prévisions, la simplicité des données utilisées et une sensibilité aux politiques seront requises.

b) Le débat Supernak-Polak.

Dans le même article, après avoir dressé un état des lieux de la recherche, en terme de modélisation économique, Supernak propose une série d'ajustements à mettre en œuvre afin d'améliorer les modèles. Cette prise de parti, très critique, a suscité un débat, qui se constitue essentiellement autour des articles de Supernak, Stevens, et Polak, entre 1983 et 1987. Plusieurs axes de discussion se dégagent au cours du débat.

¹⁸ SUPERNAK J., (1983), *Transportation modeling : Lessons from the past and tasks for the future*, *Transportation*, 12, pp. 79-90.

La "Loi de Zahavi".

- Un terrain d'entente est trouvé sur le thème du décalage existant entre le modèle idéal et ses qualités, et les modèles développés jusqu'en 1987. Il est nécessaire d'unifier les définitions utilisées, d'identifier les pouvoirs et les limites des différentes stratifications de populations appliquées. Et notamment, l'unité d'analyse doit permettre des comparaisons pertinentes dans un modèle et entre les modèles.
- La nécessité d'identifier les sous-modèles, leurs relations, leurs aspects dynamiques, et leurs sensibilités aux politiques, comme par exemple ceux qui composent la relation entre le système de transport et l'aménagement du territoire ou la relation entre l'offre et la demande, est aussi un point d'accord.
- Cependant, l'intérêt porté par chacun des deux auteurs au sujet de « l'inspiration » que peuvent apporter les **autres sciences** est mitigé. D'une part, Supernak voit dans les autres démarches scientifiques une inspiration, dans la mesure où elles tendent à révéler l'existence de lois de comportement équivalentes à des lois physiques. D'autre part, Polak met en garde contre un empressement abusif à adopter cette méthode, car les sciences sociales ne sont pas aussi régulières que les sciences physiques. Les individus observés en économie ont le pouvoir d'adapter leurs comportements à leur environnement, mais aussi ont l'inconvénient de ne pas toujours le percevoir fidèlement. La recherche de lois de comportement doit rester un moyen d'éclairer une des phases du comportement, mais avant d'être érigée en « lois physiques », les possibilités d'adaptation d'une régularité de comportement doivent être fortement étudiées.
- des ambiguïtés persistent sur le thème de **l'usage des régularités**, inspiré des sciences physiques. Les régularités de comportement sont pour Supernak, le moyen d'approcher les mécanismes à l'œuvre. Cependant, Polak voit dans cette approche un abandon de la compréhension du phénomène. En effet, la réduction d'un phénomène à une régularité généralisée est d'autant plus risquée en économie que les individus et les situations ne sont pas réguliers. De plus, l'usage des régularités dans les modèles de prévision élimine l'aspect compréhensif du processus ainsi représenté. La généralisation de la régularité observée est alors farouchement opposée au besoin d'abstraction initial d'un modèle, même restreint de la réalité. Comme le confirme Supernak, la régularité est un premier pas vers l'identification des relations fonctionnelles, sans avoir pour le moment à justifier leurs motivations. Cette justification pouvant alors apparaître dans une deuxième étape. Ainsi, la

La "Loi de Zahavi".

compréhension des liens entre les variables constitue une première approche de la compréhension des liens causaux existants, et elle est déjà utilisable dans des modèles de prévision. Toute la distinction reste donc à faire entre les régularités consistantes ou non. Nous développerons plus loin la question des régularités dans le transport, de leur découverte, de leur emploi et de leur justification.

- Une grande part du débat se concentre sur les concepts de **généralisation et d'abstraction** de la recherche. Comme nous venons de l'évoquer, cette distinction est le fondement de l'opposition méthodologique existant entre un modèle construit à partir de la généralisation d'un phénomène observé et l'abstraction nécessaire à un modèle compréhensif. L'opposition généralisation / abstraction différencie aussi les deux approches, déjà évoquées, celle du « praticien » et celle du « scientifique ». Les modèles de prévision sont la plupart du temps basés sur la généralisation de la régularité d'un phénomène. De même, les modèles désagrégés de demande appartiennent au concept de la généralisation. Le calibrage d'une fonction d'utilité pour expliquer des choix discrets est une méthode qui peut certes s'appliquer à un grand nombre de phénomènes réels, il n'en reste pas moins un processus d'identification de régularité généralisé et utilisé comme une loi de comportement. A l'opposé, l'abstraction est atteinte par les méthodes qui visent à comprendre un phénomène par l'isolation des variables et des relations significatives dans un cadre réduit de la réalité. L'objectif est de représenter le phénomène réel par une réduction de la réalité ne comprenant que l'essentiel, que les variables influentes du phénomène. Ainsi les modèles usent de représentations abstraites pour décrire le phénomène réel, et recherchent les propriétés qui découlent des liens établies entre ces variables abstraites. Cependant les deux approches restent complémentaires. La qualité d'une prédiction est dépendante du pouvoir explicatif du modèle. Et la concrétisation d'un modèle compréhensif réside dans son applicabilité.
- Enfin, sans véritablement apporter de solution, les auteurs rappellent que la demande de transport est une demande dérivée. La théorie de l'utilité semble être en accord avec les choix de transport, du fait de sa rationalité. Jamais une action n'est réalisée si son utilité réduite de l'effort correspondant est inférieure à l'utilité procurée par la non-action. Ainsi, la théorie de l'utilité est cohérente pour l'analyse du transport. Cependant le transport apparaît non pas comme la demande finale, comme l'action finale à réaliser, mais comme l'effort nécessaire à une action. Cependant, le concept de

La "Loi de Zahavi".

demande développé jusqu'à présent, reste inadapté pour traiter la demande de transport comme une demande dérivée. Le transport est généré par les autres activités, et en est donc fortement esclave. Tant que le lien entre la demande de transport et les autres demandes de biens et les autres activités n'aura pas été éclairci, les inadaptations et les erreurs dans les prévisions persisteront.

c) Conclusion partielle.

En définitive, les questions générales de choix de méthodes (généralisation/abstraction ou méthodes scientifique ou pratique) et de demande dérivée sont éclaircies par les exigences du modèle idéal (représentation fidèle de la réalité : ses agents et leurs interactions ; adaptation ou transférabilité dans l'espace et dans le temps ; satisfaction des attentes des demandeurs de modèles : applicabilité, fiabilité, simplicité, sensibilité aux politiques.). Cependant, pour atteindre ce modèle idéal, il est tout d'abord nécessaire de résoudre la question de l'uniformisation des définitions employées. Ensuite, les sous-modèles doivent être parfaitement compatibles et leurs relations internes comme leurs relations entre eux doivent être comprises. Enfin, l'adaptabilité du modèle face à l'environnement du phénomène étudié (l'espace, le temps, les politiques, etc.) doit être assurée.

2. Situation de Zahavi dans le débat.

A la vue de cette précision méthodologique, les travaux de Zahavi peuvent être resitués dans le débat, qui lui est postérieur et dont il est un appui important. Le *UMOT Project* présente trois facettes du travail de Zahavi. Le modèle théorique micro-économique met en place avec un fort niveau d'abstraction les propriétés théoriques de la demande de transport telle qu'elle est représentée par Zahavi. Le *UMOT Process* est l'outil de prévision de demande de transport qui en se basant sur les observations articulent les différentes relations et régularités du comportement de transport. Enfin, les analyses de données effectuées sur plusieurs villes du monde tendent à créditer l'hypothèse forte de constance des budgets temps et des budgets monétaires qui fondent le modèle de prévision.

Avec le *UMOT Project*, Zahavi produit à la fois un modèle compréhensif et un modèle de prévision applicable. De fait, il utilise chacune des deux méthodes : « du scientifique » et

« du praticien »¹⁹, et s'inscrit dans les deux « courants » de recherche : la généralisation et l'abstraction. Il entremêle les deux logiques : d'une part le modèle théorique micro-économique formalise la demande de transport avec un fort niveau d'abstraction ; d'autre part, la détermination empirique des régularités constituées des constances des budgets temps et monétaires de transport, mais aussi de *l'alpha-relationship* représentant le système d'offre de transport sert d'appui au développement du modèle applicable : le *UMOT Process*. Le lien entre les deux logiques est assuré par la justification réciproque qu'elles constituent. Zahavi se sert de la complémentarité des deux méthodes pour crédibiliser son travail. Le modèle théorique justifie chacun des mécanismes du modèle de prévision. Et les résultats de ce modèle pratique confirment les hypothèses du modèle micro-économique.

Les objectifs des modèles de Zahavi sont en grande partie semblables à ceux du modèle idéal développé par Supernak. L'applicabilité du *UMOT Process* nécessite l'utilisation de données relativement simples et courantes. La volonté de pouvoir appliquer son modèle à un grand nombre de villes, oblige Zahavi à développer l'aspect transférable de son modèle. Du point de vue de la demande de transport la dynamique est simplifiée par l'hypothèse de constance des budgets transport. Mais du point de vue de l'offre de transport, les coûts monétaires et les vitesses subissent directement les effets des marchés, et sont donc sensibles aux effets du temps et aux différences entre les zones géographiques étudiées. Grâce à cette capacité d'adaptation le modèle de Zahavi arrive à intégrer les influences des politiques de transport. Le modèle théorique micro-économique permet de donner une justification aux outils du *UMOT Process*. Il tente aussi d'intégrer l'ensemble des trois dimensions du domaine du transport (le système d'offre de transport, la demande de transport, et environnement urbain).

¹⁹ SUPERNAK J., (1983), *Transportation modeling : Lessons from the past and tasks for the future*, *Transportation*, 12, pp. 79-90.

POLAK J., (1987), *A comment on Supernak's critique of transport modelling*, *Transportation*, 14, pp. 63-72.

La "Loi de Zahavi".

B. Critique de Zahavi.

C'est en se positionnant sur les deux courants à la fois que Zahavi donne une cohérence à son travail, chacune des deux parties allant au crédit de l'autre. Alors que la démarche de Zahavi correspond aux attentes de l'époque et semble guider chaque étape du *UMOT Project*, certaines critiques sont à formuler dans l'application de cette méthodologie. La critique la plus fréquente à l'époque sur les travaux de Zahavi et plus généralement sur ceux basés sur le concept des budgets de transport est un manque de vérifications empiriques et de précision des concepts et de leur mesure ²⁰.

En reprenant l'ordre d'exposition de la démarche du *UMOT Project*, nous allons présenter quelques éléments de critiques sur chacune des trois étapes suivantes. Tout d'abord, le modèle théorique qui s'inscrit dans la démarche qualifiée précédemment « d'abstraction » sera traité. Ensuite les deux composants de la démarche de « généralisation » : la construction du modèle et l'analyse de données seront abordées.

1. L'abstraction : Choix de la théorie de l'utilité - améliorabile par la demande dérivée et par l'utilité aléatoire.

Pour la représentation des comportements des individus, Zahavi utilise la théorie micro-économique qui nécessite l'hypothèse de rationalité de l'individu. Comme nous l'avons déjà évoqué, la formalisation du comportement à l'aide d'une fonction d'utilité semble adaptée, mais il s'agit de l'utilité de l'activité qui est ici considérée. Le transport n'apporte généralement pas d'utilité aux individus, au contraire il est souvent perçu comme un effort dans la réalisation d'une activité. Ainsi, dans un cas général, il est possible de considérer que le transport n'existe qu'au travers de la réalisation d'autres activités, et que sans elles aucune demande de transport ne s'exprimerait.

Ce concept de demande dérivée n'est cependant pas pris en compte dans la plupart des modèles de demande de transport développés, ni dans le modèle UMOT, où le transport apparaît directement dans la fonction d'utilité, et devient par conséquent un bien consommé pour l'utilité directe qu'il procure.

²⁰ SUPERNAK J., (1983), *Transportation modeling: Lessons from the past and tasks for the future*, Transportation, 12, pp. 79-90.

L'approche utilisée par Zahavi est qualifiée de déterministe et donc différente des approches stochastiques par le caractère certain des relations la composant. La fonction d'utilité est jusqu'à présent une fonction déterminée en totalité par les variables et les coefficients qui la composent. L'ensemble de la relation est supposée exactement connue. Cependant, deux arguments tendent à l'introduction d'un aléa dans cette approche, et ainsi définir une fonction d'utilité aléatoire (Random Utility Model (RUM)). Le premier élément remettant en cause cette certitude est l'aspect probabiliste du comportement. En effet, les variations dans les observations des comportements ne peuvent être en totalité expliquées. Les processus décisionnels ne sont pas suffisamment compris pour déterminer entièrement et de façon certaine les relations analysées. L'introduction d'un terme aléatoire permettra de représenter le manque de connaissance du processus décisionnel. Le second élément, est le caractère probabiliste du comportement de choix des décideurs, ainsi que des attributs des alternatives auxquelles ils font face. Ainsi, les inconsistances observées dans la réalisation des choix des individus, qui dans des situations identiques ne choisissent pas toujours la même alternative, violant ainsi l'hypothèse de réflexivité, peuvent être appréhendées statistiquement. De la même façon, les attributs des alternatives ou la perception de ces attributs qui peuvent être aléatoires, pourront être intégrés dans les modèles. En définitive, le terme aléatoire qui sera introduit permettra de tenir compte des différents types d'erreurs possibles²¹ :

- erreurs relatives à la construction théorique du modèle : hypothèses sous-jacentes (notamment celles concernant la rationalité du consommateur) et choix du cadre d'analyse et donc des variables utilisées.
- erreurs relatives à la spécification des relations : tant les formes fonctionnelles du modèle que la fonction de distribution des résidus ne décrivent pas parfaitement les relations réelles.
- erreurs relatives à la production des données : erreurs d'échantillonnage, erreurs de mesures.
- erreurs de calage : elles apparaissent dans les procédures statistiques lorsque certaines hypothèses statistiques ne sont pas vérifiées.

²¹ BONNEL P., (2002), *Prévision de la demande de transport*, document pour l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Lumière Lyon 2.

2. La généralisation.

a) l'unité d'observation et la stratification

Zahavi a choisi le ménage pour représenter le décideur de la demande de transport. Ce choix implique la « conversion » de toutes les mesures en quantités par ménage. Ainsi les dépenses, la demande, la motorisation, doivent être déterminées pour l'ensemble des membres des ménages. D'autres unités d'observation sont bien sûr possibles (la personne, le voyageur, etc.), chacune possédant ses atouts et ses défauts. Après avoir rappelé brièvement la justification du choix de Zahavi, nous présenterons certaines des critiques qui peuvent en être faites.

De façon générale, dans l'approche agrégée, un individu représentatif est défini pour un groupe et sur une période donnée. Mais les comportements ne sont pas identiques entre les personnes du groupe, ni entre les périodes. L'objectif est alors de construire un individu fictif qui représente au mieux le comportement de l'ensemble du groupe. Il est nécessaire que les variations observées dans le groupe autour de ce comportement soit les plus réduites possibles. En conséquence, le découpage de la population en groupes d'individus, dont on définira un représentant fictif, devra être effectué dans le souci de minimiser les variations à l'intérieur de chacun des groupes, et de maximiser les variations entre les groupes d'individus. Dans le cas des dépenses et de la demande de transport, nombre de variables peuvent être utiles pour guider la segmentation de la population (personne mobile, ménage, groupe de revenu, groupe d'âge, etc.). C'est donc à partir des données que pourront être identifiées les variables permettant une stratification de la population significative. Cependant certains problèmes dans la démarche persistent :

- Dans certains cas, l'hétérogénéité des populations peut laisser supposer que l'usage d'un sous-groupe le plus homogène possible sera préférable afin de construire des modèles agrégés catégoriels.
- Après avoir constitué des groupes, si la structure de la population est susceptible de changer dans le temps et l'espace, alors la stabilité temporelle et géographique des caractéristiques du transport de chaque groupe n'est peut être pas assurée.

La "Loi de Zahavi".

- Les changements dans la structure de la population peuvent modifier la validité des effets attendus de phénomènes tels que les chocs du marché ou certaines politiques de transport qui s'appliquent à des groupes particuliers dans la population.

Il apparaît que même une stratification idéale de la population, comporte des faiblesses, essentiellement d'un point de vue de son adaptabilité aux changements de cadres spatiaux et temporels.

b) Le choix du ménage : justification et critique de Supernak.

Comme nous l'avons vu dans la partie II, l'unité d'observation choisie par Zahavi se justifie d'une part, par rapport à la disponibilité des données, et d'autre part par le fait que la plupart des contraintes pesant sur la détermination du niveau de transport sont des contraintes visant l'ensemble du ménage (à l'exception de la contrainte de temps).

Cependant, le sens de cette segmentation de la population reste à étudier. Le ménage a certes un fort potentiel pratique, il a tout de même des défauts :

1. Dans la réflexion portant sur le décideur de la quantité de transport, le ménage intervient relativement peu, et seulement au travers des contraintes qui en pesant sur lui, pèsent aussi sur les membres du ménage. De plus ces contraintes pèsent différemment sur chacun des membres.
2. Les individus composant le ménage font preuve de comportements fortement hétérogènes. L'individu représentatif construit ne possède que peu de pouvoir de représentation des membres du groupe. Il en est de même pour un individu construit comme le représentant d'un groupe homogène de ménages, car même si la dispersion des ménages est réduite, l'hétérogénéité entre membres persiste.

De plus, il est possible d'introduire la dimension de l'environnement du ménage dans l'analyse individuelle. Les variables les plus significatives, telles la motorisation peuvent être individualisées. Et les effets des caractéristiques du ménage peuvent être perçus par l'introduction de ces variables dans les modèles individuels.

L'usage du ménage comme unité d'observation se justifie essentiellement par les avantages pratiques qu'il comporte, notamment vis-à-vis des données disponibles. Cependant les adaptations qui peuvent être faites pour étudier les comportements individuels,

La "Loi de Zahavi".

réintroduiront de nouvelles disparités, hétérogénéités et erreurs. Le ménage devient alors plus une contrainte qu'un choix délibéré. Il est certainement l'unité qui permet un travail fiable, vis-à-vis des données, mais l'interprétation des résultats doit être faite avec précaution, puisque l'usage du ménage comporte un grand nombre de limites.

Il est à noter que la dimension individuelle de l'analyse n'est pas plus facile à définir. Au niveau de l'individu, le choix entre l'individu mobile ou l'individu quelconque (sans aucun critère de sélection) comporte lui aussi des difficultés. Chaque individu est potentiellement un individu mobile. Ainsi l'observation des comportements de transport effectuée un jour pris au hasard peut être considérée comme statistiquement correcte, c'est-à-dire que le choix du jour de sondage n'aura pas statistiquement d'influence sur le résultat. (Il s'agit là des jours de semaine). Les comportements observés le jour de l'enquête concernent donc les personnes mobiles ce jour là, ce qui définit la population des personnes mobiles. Cependant, la personne mobile définie de cette façon ne fait pas de distinction de personnes par rapport aux fréquences de déplacements des individus. La confusion des groupes peut avoir une incidence importante si les comportements ne sont pas similaires entre les groupes. Une trop forte disparités de comportements entre groupes (déplacements quotidiens réguliers, déplacements occasionnels, etc.) peut conduire à des interprétations et conclusions erronées, car une fois de plus l'individu moyen qui sera défini possédera un pouvoir de représentation trop faible en raison de l'hétérogénéité des populations. De même, de nombreux travaux basés uniquement sur les déplacements motorisés ont une interprétation ambiguë, car les déplacements non-motorisés ne présentent pas les mêmes caractéristiques de transport, mais constituent une part significative des déplacements, surtout dans les grandes villes.

En définitive, le pouvoir de représentation d'un individu moyen réside dans la segmentation de la population qu'il représente. C'est pourquoi, il est nécessaire de trouver l'équilibre entre l'opérationnalité d'une définition et sa pertinence. Idéalement, la segmentation devrait être basée sur le principe de la minimisation de la dispersion à l'intérieur d'un groupe, et de la maximisation de la dispersion entre groupes. La segmentation idéale doit distinguer des groupes fortement hétérogènes, composés de populations fortement homogènes. C'est à cette condition que les régularités découvertes pourront être généralisées sur de plus longues périodes, que les analyses comprendront les arbitrages temporels réalisés

La "Loi de Zahavi".

entre les périodes, et ainsi remplacer des régularités partielles illustrant les comportements de déplacements par une simple régularité individuelle²².

c) Définition de la dépense de transport : les multiples définitions et le choix de Zahavi.

Aux difficultés venant du choix de l'unité d'observation, s'ajoutent la diversité des définitions de la dépense existantes. La définition des dépenses de transport prises en compte dans la détermination du transport du décideur suscite de nombreuses interrogations :

- les dépenses de transport sont le plus souvent définies par les dépenses monétaires et temporelles nécessaires à la réalisation d'une certaine quantité de transport. Mais dans le cadre d'une approche utilitaire du comportement de déplacement, l'hypothèse de l'existence de critères plus qualitatifs est à considérer. En effet, les décisions des individus ne sont pas toujours simplement déterminées par des ressources mesurables comme le temps et le revenu. L'individu est supposé être constitué d'une part de subjectivité. Ses goûts interfèrent dans la logique de comparaison des coûts et des bénéfices du transport. Comme des études micro-économiques ont pu montrer que l'argent, le temps et la distance parcourue n'avaient pas la même valeur pour chaque individu, les modes de transport, leur confort, leur image sociale, ne sont pas valorisés de la même façon pour chaque voyageur. Le plus souvent, les caractéristiques jugées significatives dans le transport sont les dépenses en temps, en argent et en kilomètres, mais il peut être aisément imaginé que des variables plus qualitatives entrent en jeu dans les choix de transport. Un « budget pollution » ou un « budget confort » pourraient être envisagés. Et de la même façon qu'un budget monétaire pourrait être accepté par un individu, un individu n'acceptera qu'un certain niveau d'inconfort et d'émissions polluantes. Un exemple simple est la probabilité d'être assis dans le mode de transport envisagé. Les dépenses qualitatives restent cependant difficiles à utiliser tant leur quantification et leur significativité sont floues.

- les dépenses de transport posent le problème de leur mesure. La mesure des dépenses qualitatives est de par leur nature complexe. Mais les dépenses monétaires et temporelles sont elles mesurables de plusieurs façons. Tout d'abord, les budgets temps et monétaires peuvent être séparés ou regroupés sous un terme de budget généralisé. Ce budget généralisé est une

²² SUPERNAK J., (1984), *Travel regularities and their interpretations : A discussion Paper*, Transportation Research Record, 987, pp. 48-57.

La "Loi de Zahavi".

notion économique qui représente ici l'ensemble des coûts nécessaires à la réalisation du transport. Par définition il doit tenir compte aussi bien des dépenses temporelles et monétaires que des coûts qualitatifs qui seront perçus par l'individu. Ensuite, les budgets temps et monétaires peuvent être envisagés comme des valeurs absolues (dépenses totales de transport) ou en parts relatives (par exemple pour le budget monétaire : part du revenu total, part du revenu disponible, etc.).

- Enfin la dépendance des dépenses à l'unité d'observation définie auparavant influera fortement sur le choix de la définition et de la mesure des dépenses de transport. Il est difficile d'envisager certaines dépenses au niveau du ménage, comme c'est le cas pour le temps, ou les autres variables qualitatives qui peuvent être considérées. De plus, le lien entre la définition des dépenses et l'unité d'observation déterminée n'est pas unilatéral. Les exigences en terme de données disponibles imposées par les unités d'observation choisies sont parfois trop lourdes, et incitent donc à certaines concessions afin de pouvoir mener les analyses.

d) Construction de la régularité : constance des BTT et BMT.

Une régularité dans le comportement d'un individu est une relation stable entre plusieurs variables, ou caractéristiques de transport. De telles relations n'ont de valeur que si elles permettent d'améliorer la compréhension d'un phénomène général, voire d'établir une régularité de plus grande envergure. Ainsi, bon nombre de régularités peuvent être qualifiées de régularités partielles, car elles ne constituent qu'une étape vers la compréhension d'un phénomène. Par exemple, la relation fonctionnelle établie par Zahavi, dans le *UMOT Project*, qui lie le temps de transport par personne mobile à la vitesse moyenne du mode de déplacement, est une régularité, qui après les tests semble consistante. Cependant, la compréhension du temps de transport total d'une population ne peut simplement se fonder sur cette régularité. En effet, le produit du nombre de personnes mobiles par le temps moyen de déplacement par personne mobile ne suffit pas. Le nombre de personnes mobiles peut être déduit ou expliqué par le produit du nombre de ménages mobiles et du nombre moyen de personnes mobiles par ménage mobile. Une écriture possible du temps total de déplacement d'une population (T) peut être :

$$T = \frac{\text{population}}{\text{taille moyenne d'un ménage}} \cdot \beta^{HH} \cdot (\text{TR} / \text{HH}) \cdot (\text{TT} / \text{TR})$$

La "Loi de Zahavi".

Où β^{HH} est le pourcentage de ménages mobiles ; TR/HH est le nombre moyen de personnes mobiles par ménage mobile ; TT/TR est le temps moyen de déplacement par personne mobile.

Ainsi pour être en mesure d'estimer T, la relation entre TT/TR et la vitesse du mode, la relation entre β^{HH} et les caractéristiques du ménage, et la relation entre TR/HH et les caractéristiques du ménage doivent être transférables. La transférabilité des trois relations dans l'espace et le temps permet d'estimer T dans des environnements différents. C'est la transférabilité de l'ensemble des trois régularités qui assure une régularité sur le temps total T. Ainsi, à partir des trois régularités partielles, il est possible d'estimer un concept plus général, et d'en établir une régularité. Cependant, une régularité partielle n'a d'utilité qu'à la condition de l'existence des autres régularités. De fait, la stabilité des budgets temps dans cet exemple n'a de sens que sous la condition de la transférabilité des deux autres relations. En elle même cette régularité n'apporte rien si les deux relations portant sur le pourcentage de ménages mobiles (β^{HH}) et sur le nombre moyen de personnes mobiles par ménage (TR/HH) ne sont pas consistantes, car le temps total (T) reste alors indéterminé.

Ce problème de sens d'une régularité, souligné par Supernak²³ n'a pas été développé dans la plupart des recherches sur les régularités de transport. Dans le cas du temps de transport par personne mobile, il est nécessaire d'expliquer le nombre de personnes mobiles. La décomposition du nombre de personnes mobiles présentée ci-dessus peut permettre de le lier aux caractéristiques des ménages. En étant capable d'appréhender le nombre de personnes mobiles, le temps de transport par personne mobile acquiert un sens.

3. Conclusion des critiques théoriques.

Dans le *UMOT Project*, la constance des dépenses de déplacement est établie par rapport aux données par personne mobile et par ménage. L'hétérogénéité des données disponibles et donc des résultats obtenus complexifient les analyses des régularités présentes dans les temps de déplacements, ainsi que le travail nécessaire exposé ci-dessus, sur le sens de ces régularités.

²³ SUPERNAK J., (1984), *Travel regularities and their interpretations : A discussion Paper*, Transportation Research Record, 987, pp. 48-57.

La "Loi de Zahavi".

Comme nous le verrons par quelques exemples, les résultats concernant les régularités des temps de déplacement sont dépendants des choix en terme d'unité d'observation, de segmentation de la population, de mesures et des données disponibles. Les choix de Zahavi peuvent être discutés sous de nombreux angles. Le ménage comme unité d'observation n'a qu'un faible pouvoir de représentation, même s'il possède des avantages (discutables eux aussi) pour ce qui est des interactions entre membres du ménage et de l'effet taille du ménage. Nous verrons par la suite que les segmentations opérées par Zahavi (par rapport au revenu, au niveau de motorisation, etc.) sont remises en question par les résultats obtenus selon d'autres stratifications. Les mesures utilisées sont aussi discutées, car elles n'intègrent pas la totalité des dimensions à l'œuvre, notamment le qualitatif, et sont contraintes par le choix de l'unité d'observation réduisant certaines fois leur sens, comme par exemple le budget temps du ménage.

Cependant, le travail de Zahavi constitue un compromis entre les exigences requises pour une analyse des budgets temps et les contraintes pratiques qui résultent essentiellement de la disponibilité des données. L'adaptation des données dont disposait Zahavi, afin de satisfaire exactement aux exigences d'un tel travail risquait d'introduire des erreurs et des incertitudes trop grandes pour que les résultats puissent être utilisables dans un outil de prévision de demande de transport.

CONCLUSION.

L'analyse des budgets temps de transport est un sujet de recherche relativement neuf. Il souffre, comme nous l'avons exposé dans les parties précédentes, d'un manque d'uniformisation des méthodes et des définitions employées. De fait, deux niveaux d'ambiguïté semblent apparaître relativement à la conjecture formulée par Zahavi. A un premier niveau, les résultats qu'il produit font apparaître une étonnante tendance à la stabilité des budgets temps de transport quotidiens moyens, ou plus exactement, une convergence des budgets temps moyens vers une asymptote, une limite de une heure. Mais, alors que ce résultat est persistant entre les villes et entre les périodes au fil des travaux de Zahavi et qu'il semble, comme nous le verrons, l'être encore de nos jours, la variation observée autour de cette moyenne est à prendre en considération avant toute conclusion. En effet, la variabilité est en définitive d'environ plus ou moins trente minutes autour de la moyenne d'une heure de temps de transport quotidien en zone urbaine. L'étendue de l'intervalle décrit est importante en comparaison avec le niveau de la moyenne. On constate une variation relative de 50%. De plus, cette variabilité peut être mise en parallèle avec le temps total disponible d'un individu. La variation observée ne résulte-t-elle pas alors du fait que l'individu ne possède qu'une faible marge de maîtrise et d'adaptation de son emploi du temps. Cette marge de manœuvre étant encore plus réduite si l'on tient compte des temps consacrés aux activités obligatoires comme le travail et le sommeil. Les budgets temps observés ne seraient alors que la réalisation de choix fortement contraints, qui ne pourraient pas, pour des raisons psychologiques et techniques s'étendre de plus de 50% autour d'une moyenne d'une heure. La stabilité observée serait alors une stabilité « obligatoire », et les variations autour de la moyenne devraient alors être interprétées avec une plus grande attention.

Le second niveau d'ambiguïté apparaît lorsque l'on rapporte les travaux de Zahavi à des travaux d'autres auteurs. En effet, tant dans les travaux qui infirment, que dans ceux qui confirment le résultat de Zahavi, certaines nuances ou réserves apparaissent vis-à-vis de la stabilité des budgets temps de transport. Par exemple, dans l'étude menée sur la baie de San Francisco par Purvis à partir de données recueillies sur la période 1960-1990, les auteurs confirment la stabilité sur la période des budgets temps moyens de transport autour de la moyenne d'une heure. Cependant, ils soulignent aussi deux phénomènes. Tout d'abord, sur la période, la baisse du nombre de déplacements est compensée par une augmentation de la durée moyenne d'un déplacement, ce qui conserve un budget temps moyen de transport par

La "Loi de Zahavi".

personne et par ménage stable. Il apparaît alors nécessaire d'établir le lien existant entre la stabilité du budget temps de transport et l'arbitrage effectué entre le nombre de déplacements quotidiens et la durée moyenne, et donc la vitesse moyenne d'un déplacement, pour pouvoir affirmer que la stabilité des budgets temps est bel et bien une contrainte pesant sur les choix individuels ou si elle est le résultat plus ou moins hasardeux d'autres mécanismes. De plus, la décomposition de la population en sous groupes déstabilise la stabilité des budgets temps de transport. Les auteurs font apparaître nettement les effets de certaines caractéristiques des ménages comme la taille du ménage ou l'accès à la voiture particulière, alors que Zahavi préfère travailler à un niveau plus agrégé pour atténuer ces effets « perturbateurs ».

Comme le rappelle Purvis, la première limite à la comparaison des études sur les budgets temps de transport réside dans la définition du transport. Zahavi disposait de données sur les déplacements par véhicule et sur les déplacements motorisés (en tant que passager, ou conducteur de voiture particulière, ainsi que les transports en commun). Les données sur la baie de San Francisco tiennent compte des modes : marche à pied et vélo, mais sans affecter toutefois le résultat de constance des budgets temps de transport. A l'inverse, Goodwin en 1976, ne soutient pas l'hypothèse de budgets temps constants. Bien qu'il se base sur des données concernant tous les individus du ménage (Zahavi n'étudie qu'un individu représentatif du ménage), et comprenant tous les modes de transport, Goodwin montre dans un modèle de fondements statistiques que les budgets temps de transport ne sont pas identiques, et que les variables telles que l'âge, le revenu et la motorisation sont influentes. Une fois de plus apparaît le fait que la constance est déstabilisée par la désagrégation de la population. De plus, Goodwin, introduit dans son modèle la relation entre la densité de l'aire étudiée, la vitesse moyenne de transport et la durée de déplacements. Ainsi sans avoir imposé de contrainte sur le temps total disponible de l'individu, il parvient à décrire la relation entre le budget temps de transport et la vitesse, affectée par le revenu, la motorisation, etc. par une forme asymptotique. Il apparaît, d'une part, que pour Zahavi, le budget temps de déplacement admet une relation asymptotique, et très rapidement convergente avec la vitesse moyenne porte à porte (tous modes confondus) du ménage. Et d'autre part, pour Goodwin, il s'agit de la motorisation et du revenu : des caractéristiques de l'individu. Le lien entre les deux réside dans le fait que selon le modèle de Zahavi, le revenu, par la motorisation du ménage affecte, au cours des itérations du modèle, la vitesse moyenne porte à porte du ménage, relaxant ainsi la contrainte de budget temps.

La "Loi de Zahavi".

Il semble donc, que plusieurs avis (Y. Zahavi (1979), P.B. Goodwin (1976), J. Supernak (1982)) convergent vers l'existence d'un budget temps de transport convergeant asymptotiquement vers un niveau stable. Cependant, l'essentiel des critiques portent sur l'application des budgets temps de transport dans les modèles économiques. En effet, Supernak (1982) souligne les différences de budgets temps de transport qui apparaissent lorsque la population est segmentée et étudiée d'une façon différente de celle utilisée par Zahavi. Au cours du *UMOT Process*, Zahavi s'efforce de démontrer que le concept des budgets temps de transport peut être appliqué dans son modèle car, en moyenne les budgets temps de transport de la population d'une ville peuvent être décrits par la relation asymptotique que nous avons vue. En effet, d'après ses résultats, le budget temps moyen a bien une forme asymptotique, mais de plus, suivant la segmentation qu'il utilise pour étudier la population, Zahavi fait apparaître que chacun des groupes formés a des budgets temps de transport relativement similaires à ceux des autres groupes et donc proches de la moyenne. Supernak, et Goodwin, quant eux, utilisent des segmentations de leurs échantillons différentes et font alors ressortir les effets significatifs sur les budgets temps de transport de certaines variables telles que, au niveau du ménage : le revenu, la motorisation, la localisation du domicile, la taille du ménage, etc., ou au niveau individuel : le statut professionnel, l'âge, etc.

L'objectif du *UMOT Project*, n'est pas de décrire précisément le comportement individuel de transport, mais plutôt de décrire le processus de mobilité de la population d'une ville à un niveau agrégé. Ainsi sans avoir à tenir compte des spécificités socio-économiques de chaque individu, le modèle UMOT décrit le comportement moyen de mobilité de la population visée. Cependant, autour de ce comportement moyen, existe une certaine dispersion. C'est donc par une étude des variations autour de la moyenne que peut être appréhender la désagrégation de la population étudiée. Notamment, une étude des segments de la population devrait permettre de faire ressortir les tendances d'un groupe, sa variance, vis-à-vis du comportement moyen décrit par le modèle de Zahavi.

Enfin, ce dernier encart visera à faire un point rapide²⁴ sur la situation française en terme de budgets temps de transport. Tout d'abord nous distinguons le cas francilien du cas de la province. En 1997, chaque francilien consacre en moyenne 1h24 de son temps total quotidien au transport. Ce niveau revient à celui de 1983, après une légère pointe en 1991. Alors qu'en moyenne le budget temps moyen pour l'ensemble des autres villes françaises est de 49,3 minutes, pour les dernières enquêtes ménages déplacements, avec un écart type de 6 minutes.

Comme l'indique le graphique ci-dessous (*illustration 5*), les durées moyennes de déplacements quotidiens en province s'étendent dans un intervalle de 40 à 60 minutes avec une forte concentration autour de 50 minutes.

Sur une période de près de 25 ans, l'intervalle des budgets temps de déplacements semble relativement stable, et les moyennes en elles même varient relativement peu. En regard des critiques formulées notamment par X. Godard, sur les données et les méthodologies employées (erreurs sur les données, surestimation de temps déclarés, etc...) la question de la significativité des variations observées dans le temps apparaît justifiée. Peut-on parler de non-constance des budgets temps alors que l'intervalle de variation de la durée moyenne de déplacement est relativement étroit ?

Cependant, certaines variables, tant parmi les caractéristiques des villes, que parmi les caractéristiques socio-économiques des individus semblent influencer sur les budgets temps de transport. Tout d'abord à partir du même graphique, un effet taille de l'agglomération paraît perceptible. Il sera intéressant de tester, à un instant t , le lien entre la taille de l'agglomération et le budget temps de transport, mais aussi d'observer l'évolution de ce lien dans une analyse dynamique de la croissance des villes.

Les variations du budget temps moyen de certaines villes pourront peut être s'expliquer par l'évolution de la taille de la ville. Suivant la ville, la contrainte de budget temps des individus pourra être fonction de la taille de la ville ou d'un autre indicateur des opportunités socio-économiques de la ville. Les individus étant alors prêts à passer plus de temps dans les transports dans les villes offrant plus d'opportunités spatiales.

Des deux études, les caractéristiques personnelles suivantes : sexe, âge, situation professionnelle, niveau d'étude, position dans le ménage, motorisation possession du permis, semblent être discriminantes, tout en laissant après agrégation le budget temps de transport relativement constant.

²⁴ Ce point est réalisé à partir des résultats des études menées par le CETE Nord-Picardie et de la DRE d'Ile-de-France.

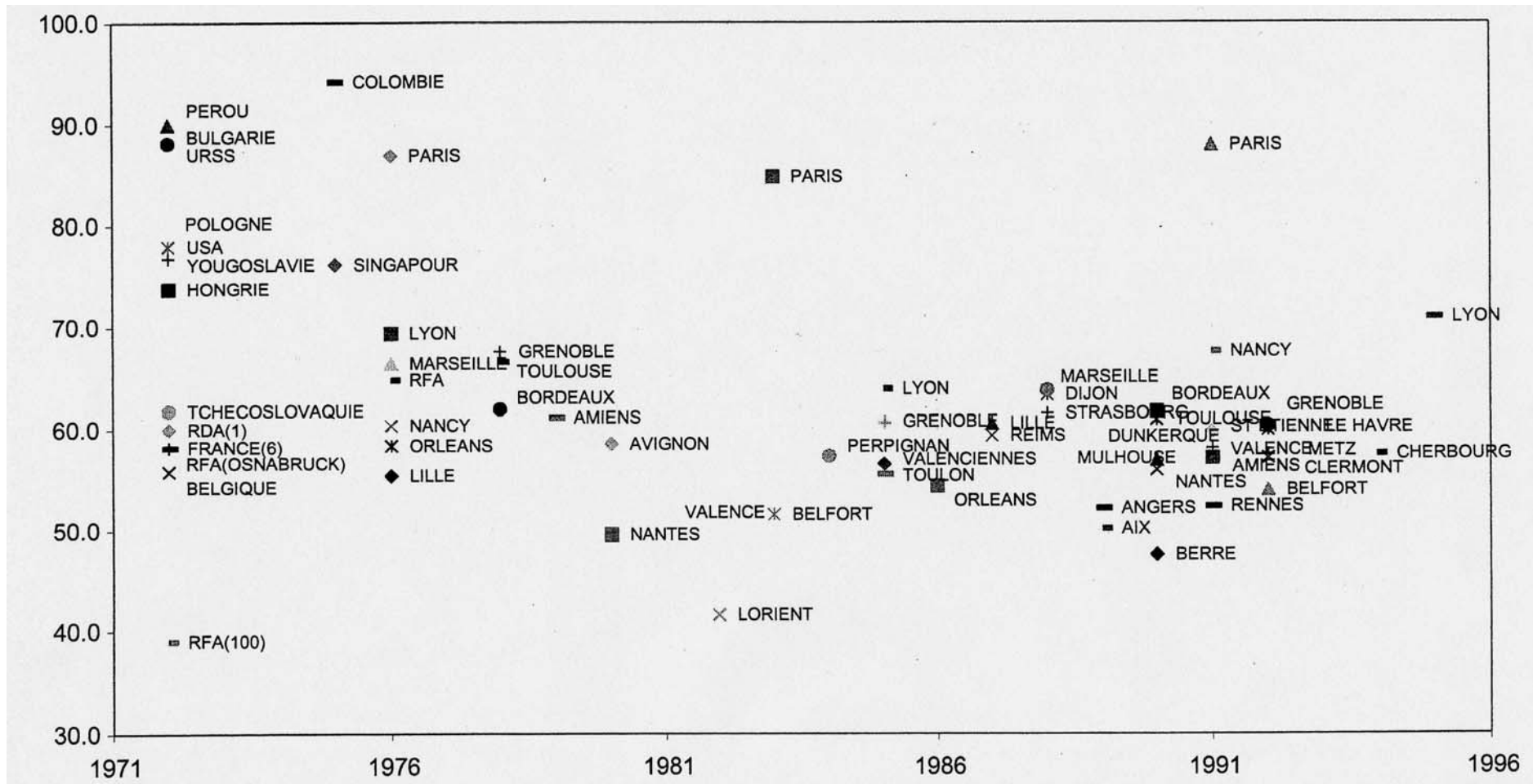


Illustration 5 : Budget temps de déplacements par personne mobile et par jour

Source : CETE Nord Picardie 1998

TABLE DES TABLEAUX ET DES ILLUSTRATIONS.

Tableau 1 : Valeur du temps proposée en milieu urbain par voyageur (<i>euros 1998/h</i>)	p.20
Tableau 2 : Caractéristiques des transports dans les villes de Kingston-upon-Hull et Londres (G.B.) et Knoxville et Baltimore (U.S.A.)	p.50
Tableau 3 : Caractéristiques de transport dans les villes de Washington,D.C., Nuremberg et Kuala Lumpur	p.51
Tableau 4a, b, c : Caractéristiques des transports dans les villes	p.63, 64
Tableau 5 : Budgets temps de transport par personne (de plus de 5 ans) dans 7 villes françaises	p.71
Tableau 6 : Budgets monétaires de transport en pourcentage du revenu disponible	p.75
Illustration 1 : Les interactions du modèle UMOT	p.60
Illustration 2 : Heures quotidiennes de transport par véhicule	p.66
Illustration 3 : Durées de transport par personne de 12 pays	p.66
Illustration 4 : Temps de transport par personne mobile et vitesse porte à porte	p.74
Illustration 5 : Budget temps de déplacements par personne mobile et par jour	p.99

BIBLIOGRAPHIE.

- ANDAN O., FAIVRE D'ARCIER B. ET RAUX C.,** (1994), *Mouvements, déplacements, transport : la mobilité quotidienne*, dans « Encyclopédie d'Economie Spatiale », sous la direction de J.-P. Auray, A. Bailly, P.-H. Derycke, J.-M. Huriot, Economica, pp. 247-254.
- BECKMANN M.J. ET GOLOB T.F.,** (1972), *A critique of entropy and gravity in travel forecasting*, in Traffic flow and transportation, Edited by Newell G.F., American Elsevier.
- BECKMANN M.J., GUSTAFSON R.L. ET GOLOB T.F.,** (1973), Locational factors in automobile ownership decisions, *Annals of regional science*, 7, pp. 1-12.
- BEN-AKIVA M.E. ET LERMAN S.R.,** (1976), *A behavioral analysis of automobile ownership and modes of travel*, Prepared by Cambridge Systematics, Inc. For the U.S. DOT.
- BEN-AKIVA M.E. ET LERMAN S.R.,** (1985), *Discrete choice analysis, theory and application to travel demand*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 4ème édition, 390p.
- BONNEL P.,** (2002), *Prévision de la demande de transport*, document pour l'Habilitation à Diriger des Recherches, Université Lumière Lyon 2.
- COMMISSARIAT GENERAL DU PLAN,** (2001), *Transport : choix des investissements et coût des nuisances*, présidé par Marcel Boiteux.
- DEBREUX G.,** (1959), *Theory of value*, New York ; Wiley.
- DOMENCICH T.A. ET MCFADDEN D.,** (1975), *Urban travel demand : a behavioural analysis*, North-Holland, Elsevier, Amsterdam.
- EVANS A. W.,** (1972), *On the theory of the valuation and allocation of time*, *Scottish Journal of Political Economy*, 19, pp. 1-17.
- GODARD X.,** (1980), *Recherche sur la mobilité des personnes en zone urbaine (exploitation de l'enquête Dijon)*, Rapport de recherche I.R.T., 38 (Tome IV), Institut de recherche des transports.
- GOLOB T.F., GUSTAFSON R.L. ET BECKMANN M.J.,** (1973), *An economic utility theory approach to spatial interaction*, *Papers of the regional science association*, 30, pp. 159-182.
- GOODWIN P.B.,** (1976), *Travel Choice and time budgets*, PTRC Summer annual meeting.

La "Loi de Zahavi".

- HENDERSON J. M. ET QUANDT R. E.**, (1980), *Microeconomic Theory, A Mathematical Approach*, Third Edition, McGRAW-HILL International Editions, Economics Series.
- MCFADDEN D.**, (1978), *Modelling the choice of residential location*, Transportation Research Record, 672, pp. 72-77.
- MCFADDEN D.**, (2000), *Disaggregate behavioral travel demand's RUM side, a 30-year retrospective*, in actes 9th International Association for Travel Behaviour research Conference, Gold Coast, Queensland, Australia, 2-7 July 2000, volume 1, 38 p.
- MANHEIM M.L.**, (1984), *Fundamentals of transportation systems analysis, volume 1 : basic concepts*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts, USA, 658p.
- NIEDERCORN J.H. ET BECHDOLT B.V. JR.**, (1969), *An economic derivation of the « gravity law » of spatial interaction*, Journal of regional science, 10, pp. 407-410.
- POLAK J.**, (1987), *A comment on Supernak's critique of transport modelling*, Transportation, 14, pp. 63-72.
- PURVIS C.L.**, (1994), *Changes in regional travel characteristics and travel time expenditures in the San Francisco Bay area : 196-1990*, Transportation Research Record, 1466, pp. 99-109.
- QUANDT R.E. ET BAUMOL W.V.**, (1966), *The demand for abstract modes : theory and measurement*, Journal of Regional Science, 6.
- SHUNK G.A. ET BOUCHARD R.J.**, (1970), *An application of marginal utility to travel mode choice*, Presented at annual meeting of highway research board, Washington, D.C.
- SUPERNAK J.**, (1982), *Travel time budget : A critique*, Transportation Research Record, 879, pp. 15-25.
- SUPERNAK J.**, (1983), *Transportation modeling : Lessons from the past and tasks for the future*, Transportation, 12, pp. 79-90.
- SUPERNAK J.**, (1984), *Travel regularities and their interpretations : A discussion Paper*, Transportation Research Record, 987, pp. 48-57.
- SUPERNAK J. ET STEVENS W. R.**, (1987), *Urban transportation modeling : The discussion continues*, Transportation, 14, pp. 73-82.
- VARIAN H. R.**, (1995), *Analyse Microéconomique*, 3^{me} édition, De Boeck Université.

La "Loi de Zahavi".

ZAHAVI Y., (1973), *The TT-relationship : a unified approach to transportation planning*, Traffic engineering and control, pp. 205-212.

ZAHAVI Y., (1974), *Traveltime budgets and mobility in urban areas*, report prepared for the U.S Department of transportation.

ZAHAVI Y., (1978), *The measurement of travel demand and mobility*, presented at the Joint International Meeting on the Integration of Traffic and Transportation Engineering in Urban Area, Tel Aviv, Israel.

ZAHAVI Y., (1979), *The 'UMOT' Project*, rapport pour l'U.S. Department of Transportation and the Ministry of Transport of Federal Republic Of Germany.

ZAHAVI Y., (1982), *Discussion*, (suite de J. Supernak (1982) : *Travel Time Budget : A critique*), Transportation Research Record, 879, pp. 25-27.

ZAHAVI Y. ET RYAN J. M., (1980), *Stability of travel components over time*, Transportation Research Record, 750, pp. 19-26.

ZAHAVI Y. ET TALVITIE A., (1980), *Regularities in travel time and money expenditures*, Transportation Research Record, 750, pp. 13-19.