

Décision d'Aide à la Recherche N° 82.02.10

MINISTERE DES TRANSPORTS

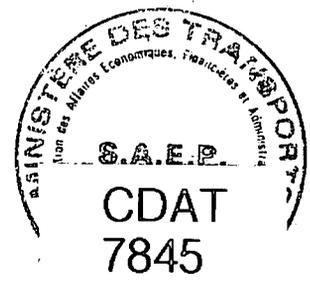
Service des Etudes, de la Recherche
et de la Technologie

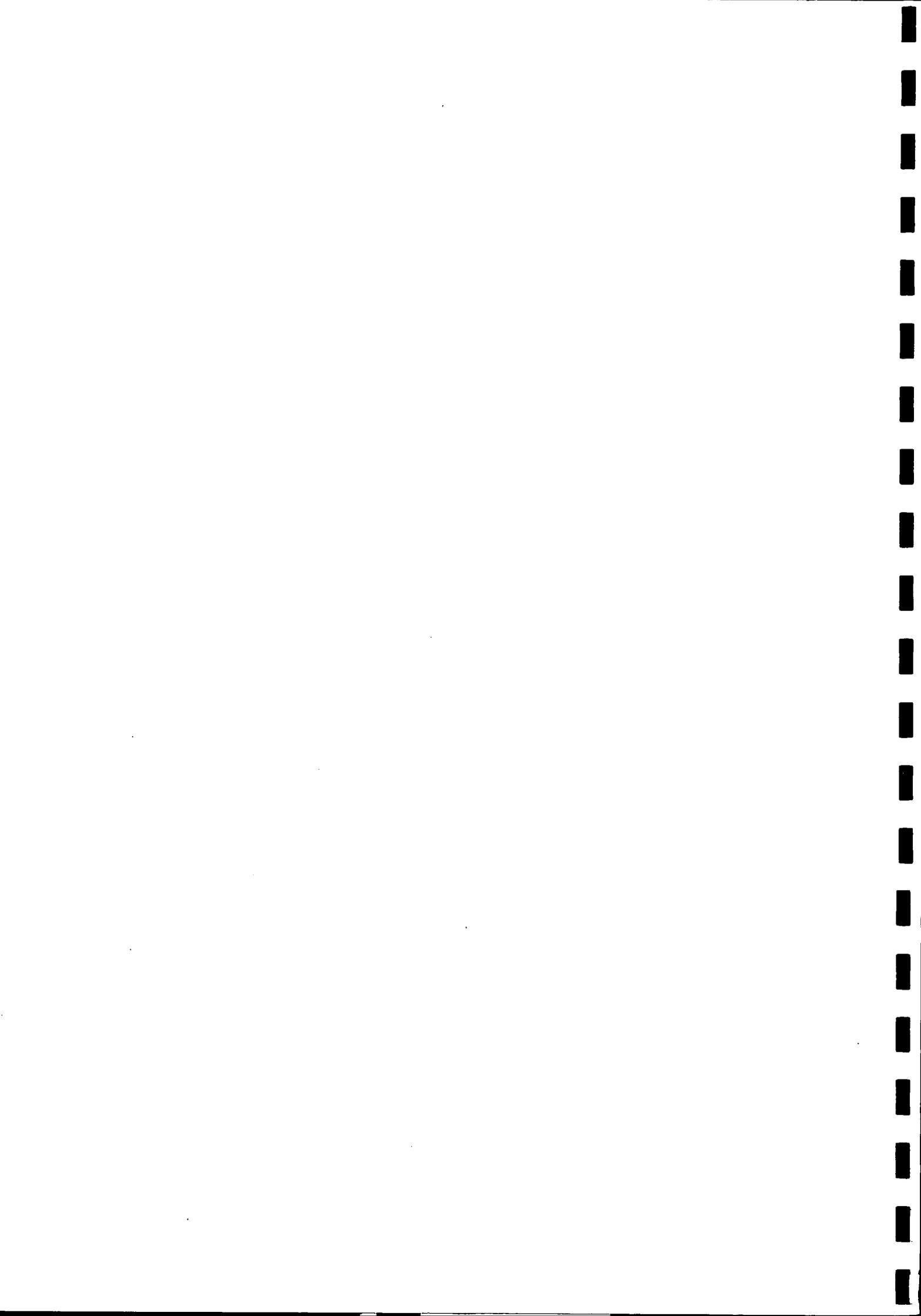
MINISTERE DE L'INDUSTRIE
ET DE LA RECHERCHE

Lourdes DIAZ OLVERA
Didier PLAT

**BUDGET ENERGIE
TRANSPORT ET
PETITS DEPLACEMENTS**

août 1984



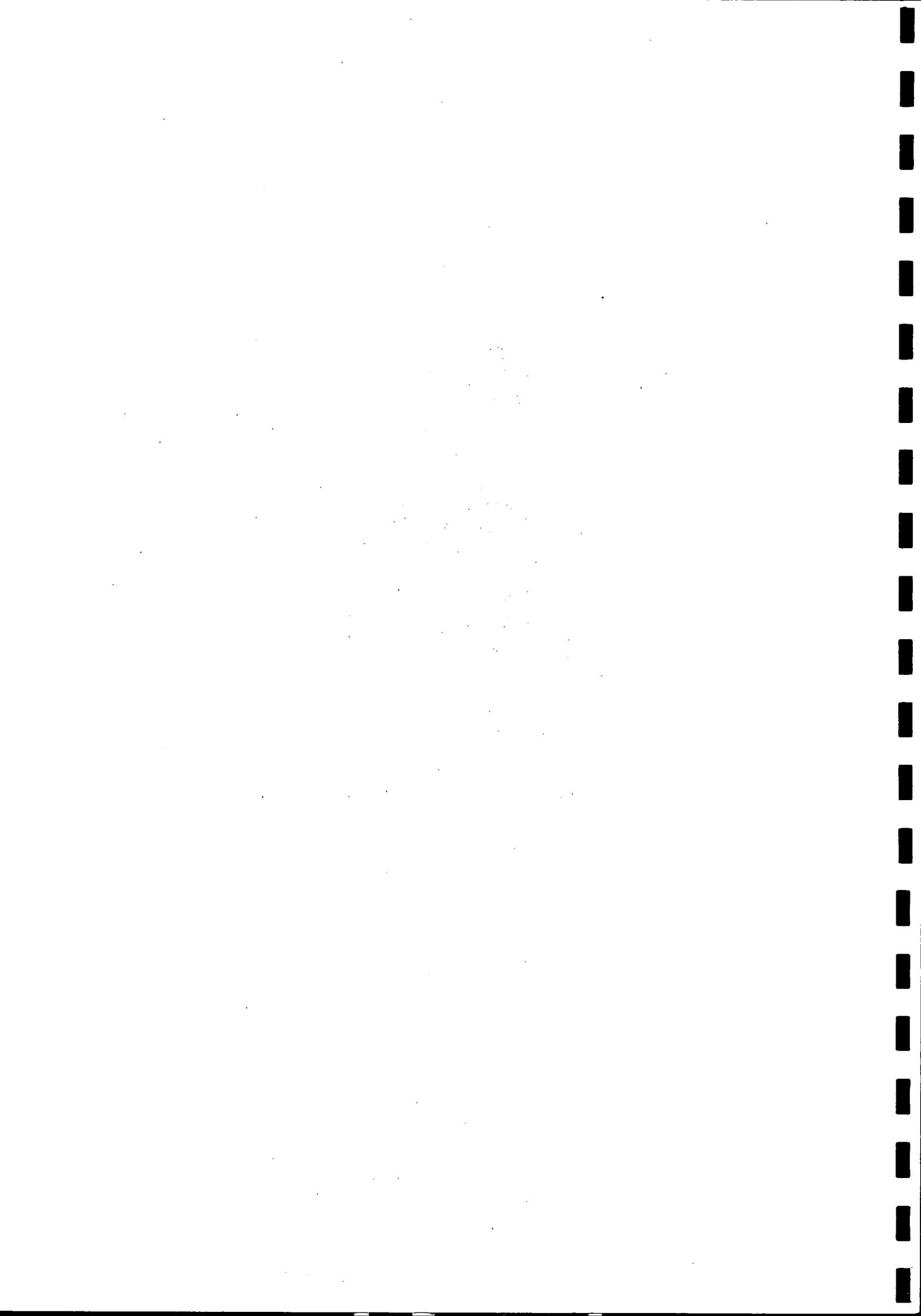


RESUME

L'objet de la recherche est double : mettre en évidence les déterminants des consommations énergétiques transport en milieu urbain et identifier les déplacements courts, notamment dans une perspective d'économies d'énergie.

Les deux premières parties sont consacrées à la mise au point des instruments méthodologiques. Partant d'enquêtes de type programme d'activité réalisées antérieurement dans l'agglomération lyonnaise (chapitre 1), il s'agit de pouvoir affecter distance et consommation à chaque déplacement. Une étude bibliographique fait d'abord le point sur l'état de la modélisation en matière énergétique (chapitre 2). Puis deux modèles sont élaborés. Le premier permet de reconstituer les distances de déplacement (chapitre 3) tandis que le second s'attache au calcul des consommations (chapitre 4).

La troisième partie rend compte des analyses effectuées. La fiabilité des modèles présentés dans la partie précédente est d'abord évaluée rapidement (chapitre 5) avant qu'une première étude des consommations énergétiques mette en évidence un certain nombre de déterminants : sexe, lieu d'habitat, statut, usage de l'espace... (chapitre 6). Une synthèse est ensuite tentée qui, à partir de la construction de macro-variables, permet d'approcher simultanément les budgets énergétiques transport des individus et la micro-mobilité (chapitre 7). A cette occasion, le potentiel d'économies d'énergie résultant d'un report de la voiture vers les autres modes (pour les seuls déplacements courts) est évaluée et apparaît singulièrement limité (tout au moins pour l'agglomération lyonnaise). Enfin, un bilan est proposé, sous le double aspect des résultats obtenus et des améliorations méthodologiques nécessaires à un approfondissement de la recherche.



NOTE DE SYNTHÈSE

Si l'évolution de la consommation d'énergie du secteur des transports est relativement bien suivie à un niveau macro-économique, il n'en est pas de même lorsque l'on examine l'une ou l'autre de ses composantes. Des travaux récents (notamment ceux de l'IRT-CERNE) ont toutefois permis de dépasser la connaissance des seules consommations unitaires pour fournir une image, parfois encore floue, des comportements des véhicules en conditions réelles de circulation.

Ces recherches montrent notamment que la consommation des véhicules particuliers n'est pas rigoureusement proportionnelle à la vitesse de déplacement. Lorsque le départ s'effectue à froid, une dépense énergétique servant à mettre le moteur en température (la "surconsommation") vient en effet se greffer sur la consommation assurant le mouvement du véhicule. Ce surcoût peut être extrêmement important, notamment dans le cas de petits déplacements automobiles. Ainsi, sur des modèles courants de gamme moyenne, des consommations supérieures à 50 litres/100 km ont pu être observées pour des déplacements de l'ordre de 4 km avec démarrage moteur froid.

Sans vouloir se lancer dans des évaluations hasardeuses du poids énergétique précis des petits déplacements urbains, les remarques précédentes les désignent comme susceptibles de cacher des gisements d'économies d'énergie peut-être substantiels.

Les deux objectifs principaux de la recherche découlent de ces quelques remarques :

- Quels sont les déterminants des consommations énergétiques transport des individus en milieu urbain ?
- Quels sont les petits déplacements et quel est leur poids ? Et donc, quelles économies d'énergie peut-on en attendre ?

1 - LA PRODUCTION DES DONNÉES

Du fait de l'existence de la surconsommation, l'énergie consommée durant le déplacement n'est pas liée qu'à ses seules caractéristiques spatiales, mais également à ses caractéristiques temporelles. L'instrument qui s'impose alors pour aborder le problème est la méthode des programmes d'activité, enrichie d'une

dimension qui lui est traditionnellement étrangère, celle de la consommation temporelle d'énergie liée aux déplacements.

Le support empirique est constitué de deux enquêtes programmes d'activité réalisées antérieurement par le Laboratoire et portant sur un jour banalisé de semaine. Leur mise en conformité avec les nécessités de cette recherche s'est organisée autour de trois axes : un redressement, la reconstitution des distances et la reconstitution des consommations.

Les échantillons des enquêtes de base avaient été élaborés dans une perspective de représentativité structurelle et non statistique. La disponibilité d'un échantillon statistiquement représentatif s'avérant ici nécessaire, il a donc fallu redresser la base de données existante. Ce redressement ne porte toutefois que sur l'une des deux enquêtes, l'autre ayant déjà fait l'objet d'une telle procédure antérieurement.

La méconnaissance de la distance réelle de chaque déplacement recensé impose de recourir à une méthode de reconstitution de cette distance. Son choix s'appuie sur une réflexion préliminaire sur les différentes approches mathématiques de la notion de distance et sur les hypothèses de représentation de l'espace physique dont elles découlent. La méthode retenue recourt à une partition des déplacements en deux groupes, selon qu'origine et destination ont ou non été précisément enregistrées par l'enquêteur. Une distance "probable" (mesurée sur un fond de plan avec un curvimètre) est alors affectée aux déplacements les mieux connus et permet de caler des modèles concernant les vitesses moyennes réutilisables sur les déplacements du second groupe. Si cette démarche n'est pas exempte de critiques (notamment son caractère normatif), elle s'avère cependant beaucoup plus fiable que les méthodes traditionnelles (passant par un zonage et une distance à vol d'oiseau).

Une analyse bibliographique montre les lacunes de la modélisation de la consommation des véhicules. L'automobile est la mieux lotie mais des progrès sensibles sont possibles. La batterie de modèles de consommation se ressent de ces manques et ce n'est que pour la voiture qu'il est possible de dépasser les simples consommations unitaires. Ce mode de transport a ainsi donné lieu à l'élaboration d'un modèle original à quatre étapes. Le modèle de consommation moteur chaud a été emprunté à la littérature. Les trois autres éléments (surconsommation, échauffement et refroidissement du moteur, influence de facteurs annexes) sont issus d'un effort spécifique de formalisation basé sur des études empiriques rencontrés dans la bibliographie.

Ces divers axes d'enrichissement des données étaient susceptibles d'introduire des biais. Aussi la fiabilité des résultats a-t-elle été testée de manière approfondie. Leur consistance semble satisfaisante, mais la lourdeur des procédures utilisées invite à réfléchir sur les améliorations ou innovations à apporter aux

méthodes d'enquête usuelles afin d'y intégrer la dimension énergétique.

2 - LES DETERMINANTS DES CONSOMMATIONS TRANSPORT

Les écarts entre niveaux de consommation sont bien évidemment, avant tout, le résultat de l'utilisation des modes. L'automobile se révèle ainsi une forte consommatrice, captant à elle seule près de 90 % de l'énergie totale. Pour des distances moyennes similaires (environ 6 km), elle demande près de quatre fois plus d'énergie que les transports collectifs. Ces mauvaises performances énergétiques de l'automobile sont dues notamment à la surconsommation liée à l'échauffement du moteur, qui représente, en moyenne, près du quart de la consommation totale de ce mode. Toutefois, son poids varie très sensiblement avec la distance parcourue. Pour des longueurs inférieures à 5 km, la surconsommation représente 38 % de la consommation totale, mais seulement 13 % de cette même consommation pour des distances de 15-20 km. Ce phénomène se retrouve très clairement dans l'analyse des consommations moyennes selon le type de liaison. Les déplacements automobiles internes au centre, avec de faibles distances moyennes, présentent des consommations kilométriques très élevées (de 30 à 60 % supérieures à la moyenne), le taux de surconsommation étant de l'ordre de 30 %. Par contre, les déplacements radiaux et surtout orthoradiaux, plus longs, se montrent plus efficaces énergétiquement.

Le caractère déterminant du taux d'usage de la voiture se retrouve lorsque l'on examine les consommations moyennes selon le motif du déplacement. Les motifs les plus "énergivores" (surtout "travail" mais également "secondaire" et "vie sociale") sont ceux pour lesquels l'utilisation de la voiture est la plus élevée. Entre les déplacements "service passager", les moins consommateurs, et les déplacements domicile-travail, le rapport des consommations tous modes est de 1 à 6,5. Mais plus qu'une quantification des écarts de consommation, l'analyse révèle que la hiérarchisation des motifs selon leur consommation moyenne est à référer essentiellement à la richesse de l'offre urbaine. Les motifs les moins consommateurs ("service passager", "achats", "école") renvoient aux éléments de l'offre urbaine les plus diffus.

Cependant ces activités résultent de pratiques des individus. Les consommations par déplacement se ressentent alors des autres activités, du mode de vie de ces individus et il est fondamental de dépasser l'examen des consommations moyennes par déplacement pour analyser les budgets énergétiques des individus. Ces budgets sont répartis très inégalement dans la population : 13 % des individus consomment la moitié de l'énergie. La désagrégation de la population selon les caractéristiques socio-économiques traditionnelles va nous montrer des différences sensibles entre groupes d'individus.

Il en est ainsi du lieu d'habitat. L'usage des modes comme l'usage de l'espace est sensiblement différent selon le lieu de résidence. Aussi entre le centre et la périphérie le budget énergétique tous modes est multiplié par 1,6.

Le sexe présente également un fort pouvoir discriminant. En moyenne, les hommes consomment deux fois plus que les femmes, pour une distance supérieure de 50 %. L'écart entre les deux taux est lié à l'usage de la voiture nettement plus développé pour les hommes.

Ainsi, au delà des écarts (consommation, distance) entre individus résultant de décisions structurelles de leurs ménages d'appartenance, des inégalités sensibles existent entre membres d'un même ménage. Il est ainsi symptomatique de constater que les hommes appartenant à des ménages monomotorisés consomment deux fois plus d'énergie que leur compagnes mais autant que les femmes des ménages bimotorisés.

Le statut de l'individu permet de lier le sexe à l'activité professionnelle. Entre les hommes actifs et les retraitées, les écarts de consommation sont considérables (de l'ordre de 7,5). Des groupes plus contrastés peuvent être mis en évidence. L'analyse de la micro-mobilité nous a amené à construire une macro-variable caractérisant l'individu à partir du lieu d'habitat, du nombre de voiture du ménage, de la structure spatiale de ses déplacements et de son statut. L'écart entre les groupes extrêmes est alors supérieur à 12. Cette croissance des budgets énergétiques est à relier à trois phénomènes :

- les pratiques d'activités se modifient; le travail supplante les achats : les activités entraînant les déplacements les plus énergivores se développent au détriment des activités de proximité ;
- l'usage de l'espace se complexifie ; les mêmes activités sont effectuées plus loin du domicile pour les hommes actifs que pour les retraitées ;
- l'usage des modes se transforme ; le glissement vers la voiture est très sensible.

Qui plus est, les actions de ces trois phénomènes se conjuguent et la croissance du budget énergétique est ainsi encore amplifiée.

Les trois facteurs explicatifs renvoient finalement à l'insertion de l'individu dans les trois sous-systèmes constitutifs du système urbain : localisation, relations et pratiques sociales, transport.

3 - PETITS DEPLACEMENTS ET ENERGIE

La notion de petit déplacement se réfère d'abord à un critère de distance : en dessous d'une certaine distance-seuil, le déplacement peut être qualifié de petit. Mais en demeurer à la seule distance du déplacement s'avère insuffisant. Le déplacement s'insère dans une chaîne constituant la sortie du domicile, chaîne dont les maillons sont interdépendants (nous entendons par "sortie" tous les déplacements compris entre le départ d'un lieu de référence et le retour). Aussi avons-nous combiné trois éléments pour obtenir une définition plus pertinente du "petit déplacement" :

- la sortie
- la distance, du déplacement considéré et de la sortie
- les lieux à partir desquels se structurent l'utilisation du temps et de l'espace, c'est-à-dire, le domicile et, à un moindre degré, le lieu de travail (sortie secondaire).

A partir de ces critères, il est possible de bâtir une typologie des déplacements en cinq catégories (figure 1). Les quatre premiers types regroupent les déplacements courts. La différenciation entre eux s'effectue en fonction des caractéristiques de distance de la sortie à laquelle appartient le déplacement (distance du plus grand déplacement et distance totale).

Nous avons retenu comme distances-seuil 2,4 km pour le déplacement et 3,9 km pour la sortie. Ces valeurs peuvent être considérées comme optimistes car elles sont, d'une certaine manière, des distances pédestres "maximales".

Les déplacements courts inclus dans des sorties courtes (type 1 - 39 % des déplacements) sont liés à des activités contraignantes (essentiellement les achats et les services passagers) mais aussi le travail lorsqu'il est à proximité du domicile. Ils sont effectués principalement par des non actifs (retraités) habitant le centre de l'agglomération et appartenant à des ménages peu motorisés.

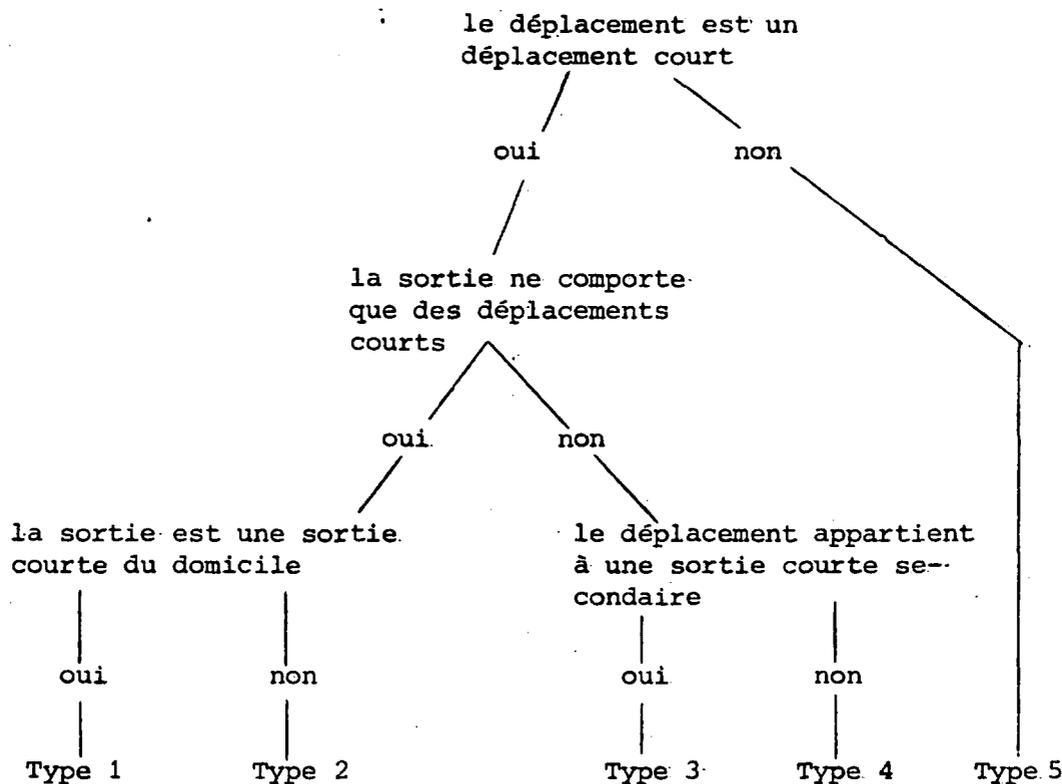
Les déplacements qui appartiennent à des sorties longues quoique constituées uniquement de déplacements courts (type 2 - 4 %) correspondent plutôt aux achats et à la vie sociale.

Les déplacements courts inclus dans des sorties secondaires courtes (type 3 - 1 %) renvoient, bien évidemment, à des déplacements secondaires. Extrêmement rares, ils sont dus à des actifs ou à des scolaires demeurant en périphérie.

Les déplacements courts isolés (type 4 - 10 %) regroupent notamment des déplacements secondaires et, à un moindre degré, des déplacements domicile-travail. Ils sont accomplis par des hommes actifs.

FIGURE 1 : Typologie des déplacements, selon leur distance

On appellera ici déplacement court, un déplacement dont la distance est inférieure à un seuil (restant à définir) et sortie courte (du domicile ou secondaire) une sortie dont la longueur totale est inférieure à une longueur seuil (restant également à définir).



Les déplacements longs (type 5 - 46 %) se caractérisent surtout par leur hétérogénéité mais on remarque une certaine prééminence des actifs. Cela se reflète d'ailleurs dans la place prépondérante du motif travail au détriment des achats.

L'usage des modes paraît très dépendant du type de déplacement. Les déplacements type 1 sont essentiellement pédestres (à 85 %). Les déplacements du type 3 présentent un recours moins important à la marche en faveur de la voiture. Ces deux types se signalent par un très faible usage des deux roues et des transports collectifs. La marche perd son rôle prépondérant pour les déplacements de type 2 et 4, au profit de la voiture et des transports collectifs (type 2, uniquement). Enfin, elle disparaît presque totalement pour les déplacements longs. Mais ces variations dans l'usage des modes ne peuvent être imputées uniquement à la distance du déplacement. Plus que cette distance elle-même, ce sont la distance totale de la sortie et la distance de son plus long déplacement qui pèsent le plus lourdement sur l'utilisation des modes.

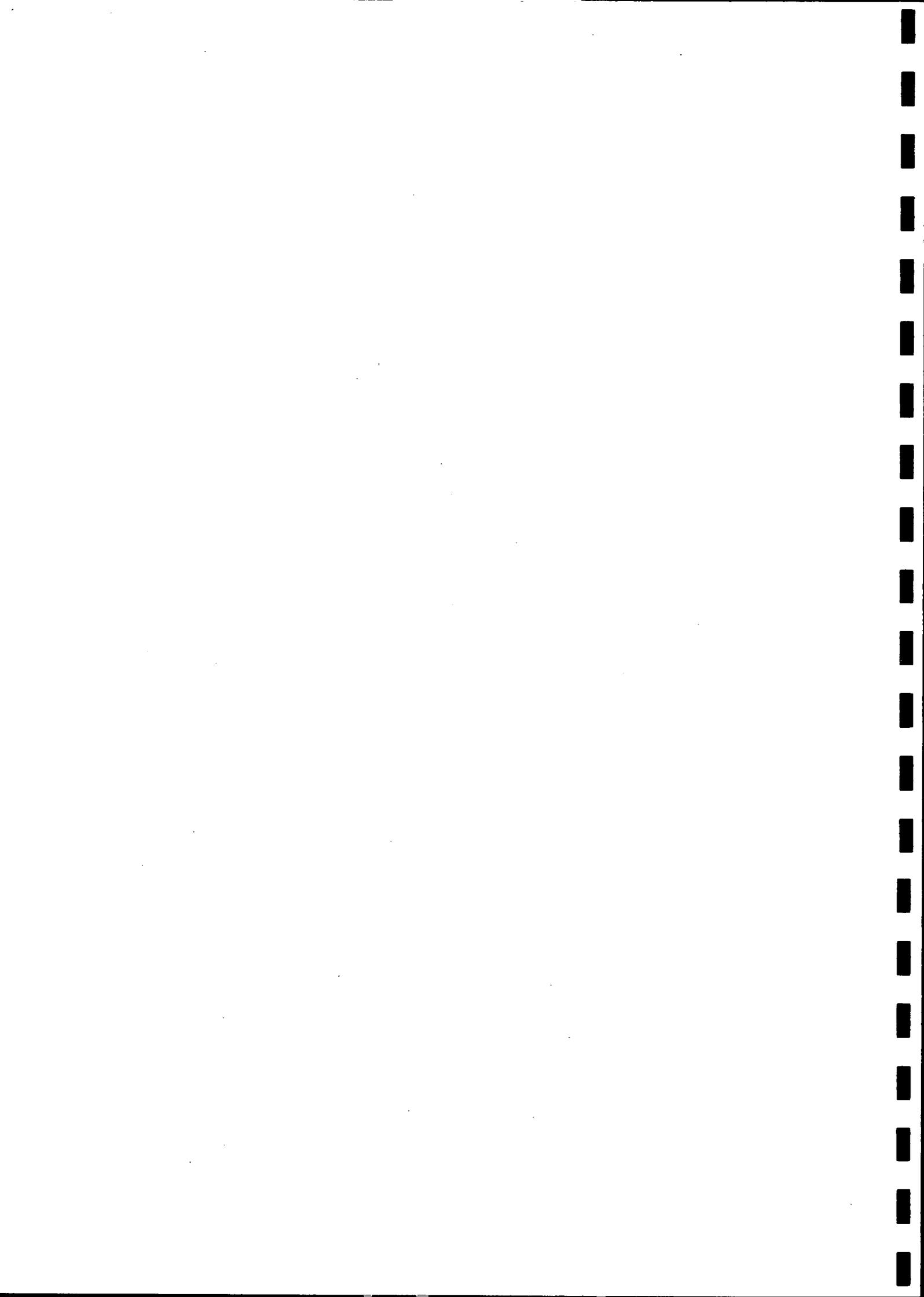
Les déplacements courts représentent 54 % de l'ensemble des déplacements mais seulement 13 % en termes de distance et 11 % en termes de consommation. La part de la voiture dans la consommation est toutefois peu sensible au type de déplacement.

Pour les seuls déplacements effectués en voiture, 26 % sont des déplacements courts, mais ils regroupent uniquement 7 % des distances parcourues et 12 % de la consommation. Cette surimportance relative de la consommation par rapport à la distance est entièrement à imputer à la surconsommation nécessaire à l'échauffement du moteur. En effet, elle représente près de 50 % de la consommation totale des déplacements automobiles courts et seulement 21 % de la consommation totale des déplacements longs.

Les divers types de déplacements automobile court ne se prêtent pas de la même manière à la substitution modale. Ainsi, un report modal des déplacements de type 4, inclus dans des sorties automobiles longues, paraît difficile sans remise en question de l'usage de la voiture sur tout ou partie de la sortie.

L'enjeu énergétique théorique lié à un report modal systématique des seuls petits déplacements automobiles dans l'agglomération lyonnaise semble alors excéder difficilement 5 à 6 % de la consommation automobile totale. Qui plus est, bien d'autres facteurs interviennent dans le choix du mode de transport. Certains sont directement liés à l'offre de transport ; d'autres renvoient plus aux caractéristiques propres du déplacement et de la sortie correspondante ; d'autres encore sont à relier aux caractéristiques socio-démographiques et économiques des individus. Les économies à attendre semblent alors très inférieures au maximum théorique, d'autant que le véhicule abandonné peut être utilisé par un autre membre du ménage. La recherche ne permet cependant pas d'affiner ce résultat et de l'étendre aux autres agglomérations françaises. De plus, il faut remarquer que restreindre le recours à la voiture sur les faibles distances risquerait d'accroître encore l'inégalité de son usage. Le budget énergétique automobile est multiplié par plus de 10 entre les deux groupes extrêmes d'individus (issus de la macro-variable individu) mais seulement par 5 en se limitant aux déplacements courts. Les écarts de consommation reflètent moins un accès différencié à la voiture pour les petits déplacements que la possibilité de son utilisation lors de déplacements longs.

Les substituts du déplacement court automobile, plus que dans le report modal, sont à inscrire dans des formes plus larges de substitution entre des organisations différentes de la vie quotidienne ou entre des pratiques spatiales elles-mêmes différenciées.



SOMMAIRE

	Page
INTRODUCTION	1
PREMIERE PARTIE	7
CHAPITRE I - LE SUPPORT EMPIRIQUE	9
I - DESCRIPTION DES ENQUETES DE BASE	10
II - REDRESSEMENT DES ENQUETES	14
1 - Redressement du sous-fichier centre	14
2 - Représentativité du fichier global	16
III - PRESENTATION DU FICHER DE TRAVAIL	18
1 - Les ménages	18
2 - Les individus	18
3 - Les déplacements	21
CHAPITRE II. - REPERES BIBLIOGRAPHIQUES :	
LA MODELISATION DE LA CONSOMMATION	
D'ENERGIE DES VEHICULES EN MILIEU	
URBAIN	25
I - LES VEHICULES LEGERS	26
1 - La consommation moteur chaud	26
2 - La surconsommation due à la mise en	
température du moteur	35
3 - Les facteurs ayant une incidence sur la	
consommation de carburant en milieu urbain	37
II - LES TRANSPORTS COLLECTIFS	42
1 - Les taxis	42
2 - Les autobus	42
3 - Les trolleybus	44
4 - Le métro	45
III - LES DEUX ROUES	47

	Page
DEUXIEME PARTIE	49
CHAPITRE III - RECONSTITUTION DES DISTANCES DE DEPLACEMENT	51
I - CHOIX D'UNE METHODE DE RECONSTITUTION	52
1 - Les méthodes disponibles	52
2 - La méthode de reconstitution	56
3 - Les limites de la méthode	58
II - RECONSTITUTION DES DISTANCES DE DEPLACEMENT	61
1 - Le sous-fichier	61
2 - Etude des distances et des vitesses des déplacements du sous-fichier	63
III - DISTANCES DE DEPLACEMENT ET VITESSES MOYENNES DANS L'AGGLOMERATION LYONNAISE	70
1 - Les trois types de distance	70
2 - Vitesses moyennes de déplacement	72
CHAPITRE IV - LES MODELES DE CONSOMMATION	75
I - LES VEHICULES LEGERS	76
1 - Les lois d'échauffement et de refroidissement du moteur	76
2 - Le modèle de surconsommation due au démarrage à froid	81
3 - Le modèle de consommation moteur chaud	88
4 - La prise en compte des divers facteurs influençant la consommation	89
5 - Le modèle complet de consommation des véhicules légers	91
6 - Les simulations	92
II - LES AUTRES MODES MOTORISES	96
1 - Les transports collectifs	96
2 - Les deux roues	97
3 - Le mode complexe	98
4 - Conclusion	98
III - L'AFFECTATION DES CONSOMMATIONS AUX INDIVIDUS	99
TROISIEME PARTIE	101
CHAPITRE V - ELEMENTS D'EVALUATION DES METHODES D'ENRICHISSEMENT DES DONNEES	103
I - METHODES LIEES AUX DISTANCES : EFFETS DE LA RECONSTITUTION	104
1 - Méthode de lissage	104
2 - Etude de la courbe "pourcentage cumulé de déplacements-Distance"	105

	Page
II - METHODES LIEES AUX CONSOMMATIONS :	
EFFETS DES SIMULATIONS	108
1 - Approche globale	108
2 - Approche désagrégée	109
3 - Conclusion	116
 CHAPITRE VI - PREMIERE APPROCHE DES CONSOMMATIONS ENERGETIQUES	117
I - LES CONSOMMATIONS MOYENNES PAR DEPLACEMENT	118
1 - Premier aperçu des consommations	118
2 - L'influence du motif	125
3 - Consommations d'énergie et sorties du domicile	133
II - LES BUDGETS ENERGETIQUES TRANSPORTS	140
1 - Sous le signe de l'inégalité	140
2 - Le nombre de voiture du ménage	142
3 - Le lieu d'habitat	144
4 - Le sexe de l'individu	146
5 - Le statut de l'individu	150
6 - La structure spatiale des déplacements	156
7 - Conclusion	158
 CHAPITRE VII - CONSOMMATIONS D'ENERGIE ET PETITS DEPLACEMENTS	159
I - L'ELABORATION DES MACRO-VARIABLES	160
1 - Une typologie des déplacements fondée sur la distance	160
2 - Les macro-variables	161
II - LES DEPLACEMENTS	165
1 - La caractérisation des six classes	165
2 - Classes de déplacement et consommation	172
III - LES INDIVIDUS	175
1 - Les sédentaires	175
2 - Les six groupes d'individus	176
3 - Groupes d'individus et consommations	186
IV - PETITS DEPLACEMENTS ET ECONOMIE D'ENERGIE	189
1 - Les petits déplacements	189
2 - Quelles économies d'énergie ?	195
 CHAPITRE VIII - UN BILAN	199
I - LES DETERMINANTS DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE ET DE LA MICRO-MOBILITE	200
1 - Les déterminants des consommations transport	200
2 - Petits déplacements et énergie	202
3 - Un essai de mise en ordre des déterminants déterminants	203

	Page
II - REFLEXIONS METHODOLOGIQUES	207
1 - Evaluer les distances	207
2 - Déterminer les consommations	211
3 - Analyser la mobilité	213
4 - Quelles méthodes pour quels objectifs	213
5 - Conclusion	215

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	217
-----------------------------	-----

ANNEXES

ANNEXE I	- DOCUMENTS D'ENQUETE
ANNEXE II	- LA MOBILITE INTERURBAINE
ANNEXE III	- BIAIS DUS A L'UTILISATION DU CURVIMETRE ET DU FOND DE PLAN
ANNEXE IV	- LES DEUX MACROVARIABLES
ANNEXE V	- ABREVIATIONS
ANNEXE VI	- SIGLES

INTRODUCTION

1 - PREAMBULE

Si l'évolution de la consommation d'énergie du secteur des transports est relativement bien connue à un niveau macro-économique, il n'en est pas de même lorsque l'on examine l'une ou l'autre de ses composantes. C'est ainsi que nous ne disposons jusqu'à une époque récente que de données relatives aux consommations unitaires moyennes de tel ou tel mode de transport. Qui plus est, ces consommations unitaires provenaient généralement d'essais effectués selon des procédures normalisées très éloignées des conditions réelles de circulation. Les travaux du Centre d'Evaluation et de Recherche des Nuisances et de l'Energie de l'Institut de Recherche des Transports, en France, s'attachent à combler cette lacune : on citera notamment l'Enquête sur l'Utilisation Réelle de la Voiture (EUREV), effectuée à la demande de l'Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie, qui avait pour ambition de fournir une image énergétique fidèle des déplacements automobiles des français (VALLET, YGNACE, MAURIN, 1982).

Sans dépasser les estimations grossières, on peut avancer que, pour la France, la consommation d'énergie des voitures particulières se ventile en deux parts égales, correspondant l'une aux déplacements urbains, l'autre aux parcours non urbains. Pour 1982, ce sont donc quelques 8 millions de tonnes équivalent pétrole (tep) qu'il faut affecter aux seuls déplacements automobiles effectués dans les villes françaises, soit le quart de la consommation d'énergie des transports terrestres. Le chiffre est élevé, ce que souligne encore la comparaison avec les 5,5 millions de tep consommés par les transports routiers de marchandises (hors distribution). Peut-on alors évaluer le poids énergétique des petits déplacements automobiles ?

La consommation des véhicules particuliers n'est pas rigoureusement proportionnelle à la distance parcourue. En effet, diverses recherches ont mis en évidence la mauvaise efficacité énergétique de la voiture sur de faibles distances (de l'ordre de quelques kilomètres). Les consommations de carburant enregistrées lors de ces petits déplacements sont en effet très largement supérieures aux consommations unitaires moyennes. Sur des modèles courants de gamme moyenne (7 CV), des consommations supérieures à 50 litres/100 km ont pu être observées pour des déplacements urbains de l'ordre de 4 km avec démarrage moteur froid. Ces résultats, comme d'ailleurs certaines des conclusions tirées d'EUREV, indiquent du reste l'importance de la surconsommation liée à la mise en température du moteur lorsque celui-ci est totalement refroidi au moment du démarrage.

Sans vouloir se lancer dans des évaluations hasardeuses du poids énergétique précis des petits déplacements urbains (et encore faudrait-il définir ces derniers avec précision), les considérations précédentes les désignent comme susceptibles de cacher des gisements d'économies d'énergie peut-être substantiels. Or, il s'agit là d'un domaine mal connu. La plupart des enquêtes réalisées en matière de mobilité appréhendent très mal les petits déplacements, et ce pour au moins trois raisons :

- le zonage choisi dans de nombreuses enquêtes est tel qu'il est très difficile de les repérer, notamment dans les communes périurbaines du fait de la dimension des zones ;
- le calcul des distances parcourues repose généralement sur la distance à vol d'oiseau entre les centroïdes de zones ;
- les trajets terminaux associés aux déplacements motorisés sont rarement isolés.

Cette méconnaissance est d'autant plus regrettable que les exploitations diachroniques des enquêtes ménages semblent montrer une progression de l'utilisation de la voiture sur les faibles distances, ce mode venant ainsi de plus en plus concurrencer la marche à pied. L'enjeu énergétique des petits déplacements est peut-être moins présent que futur.

2 - OBJECTIFS ET METHODE

Ces quelques remarques permettent de dégager deux objectifs et désignent la méthode permettant de les atteindre.

Quels sont les déterminants des consommations énergétiques transport en milieu urbain ? Nous nous limiterons toutefois aux seules consommations directes, provenant de la réalisation d'un déplacement, en écartant les consommations indirectes, liées, par exemple, à la construction des infrastructures ou des véhicules.

Quels sont les petits déplacements et quel est leur poids ? Et donc, quelles économies d'énergie peut-on en attendre ?

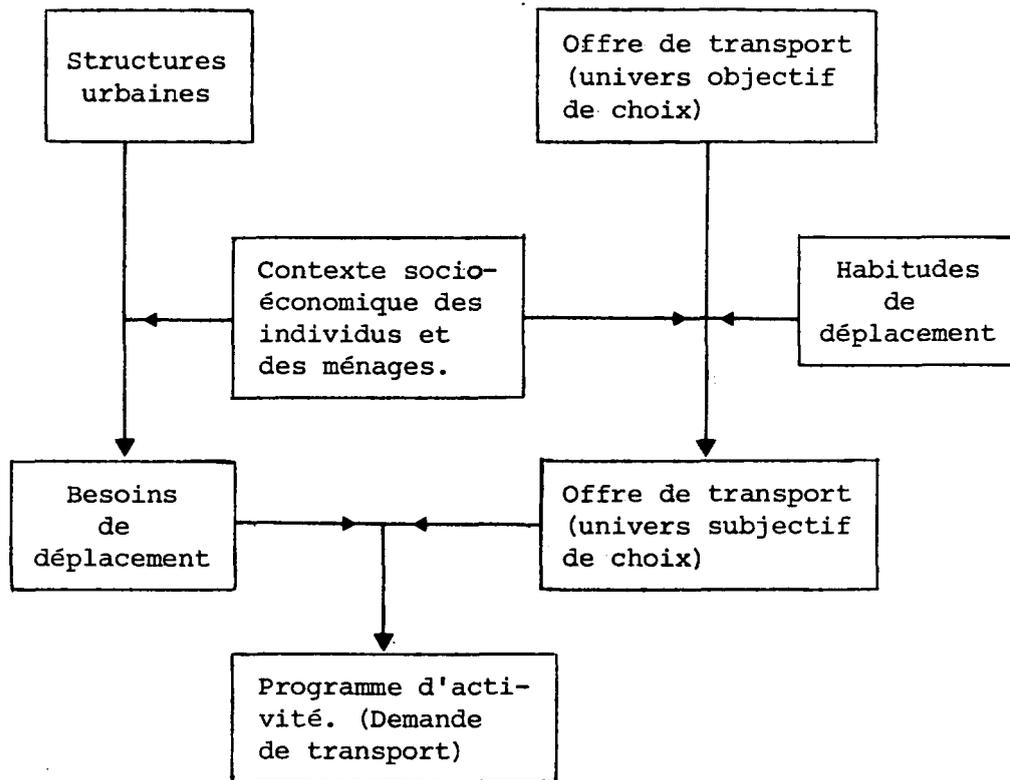
De la constatation de l'existence de la surconsommation découle une remarque immédiate : l'énergie consommée durant le déplacement n'est pas liée qu'à ses seules caractéristiques spatiales, mais également à ses caractéristiques temporelles. Une conséquence méthodologique s'en déduit alors.

Si le repérage horaire des déplacements est indispensable, il n'est toutefois pas suffisant. La succession temporelle des déplacements n'est que le produit de l'usage qui est fait du temps par l'individu, c'est-à-dire de la succession d'activités spatialement et temporellement localisées. Les déterminants des consommations en transport urbain (comme ceux des distances de déplacement) sont à chercher dans ces pratiques d'activités différenciées selon les individus.

L'instrument qui s'impose ainsi pour aborder le problème est la méthode des programmes d'activité, enrichie d'une dimension qui lui est traditionnellement étrangère et qui est celle de la consommation temporelle d'énergie liée aux déplacements. Nous aventurant dans un domaine encore mal balisé, nous avons préféré, plutôt que nous lancer directement dans l'élaboration d'une enquête spécialement adaptée à notre propos, partir d'enquêtes programmes d'activité réalisées par le LET dans d'autres occasions en les complétant d'un volet énergétique. Nous n'atteindrons ainsi probablement pas toute la finesse souhaitable dans les réponses à nos deux objectifs, mais la réflexion sur les éléments indispensables à introduire dans une enquête spécifique s'y enrichira plus.

De par le réemploi d'enquêtes existantes, l'analyse des distances et consommations par déplacement que nous nous proposons, et donc in fine l'analyse de la mobilité qui la sous-tend, s'inscrira alors dans le cadre conceptuel proposé par BONNAFOUS lors de la 32ème table ronde de la CEMT (BONNAFOUS, 1976). Ce cadre, qu'on trouvera schématisé ci-dessous, présente l'avantage de séparer nettement la demande de transport observée de ses déterminants propres au système urbain (ou plutôt des trois sous-systèmes dont il est l'articulation : localisation, relations et pratiques sociales, transport), en mettant en évidence le niveau individuel de la confrontation de ces déterminations.

Cadre conceptuel pour l'analyse de mobilité.
(BONNAFOUS, 1976)



Le plan de la recherche découle de ces choix. La première partie nous permettra de repérer l'existant en examinant le support empirique disponible et l'état de la modélisation de la consommation des véhicules. La deuxième partie sera consacrée à la mise en adéquation des enquêtes disponibles avec les nécessités de l'étude (reconstitution des consommations énergétiques par déplacement). Enfin, la dernière partie essaiera de répondre aux deux objectifs.

PREMIERE PARTIE

La réexploitation d'enquêtes à des fins pour lesquelles elles n'avaient pas été conçues ne va pas sans inconvénient. En particulier, la reconstitution de paramètres après coup demande l'élaboration d'un modèle.

Pour que cette élaboration se fasse dans les meilleures conditions, deux préliminaires sont indispensables :

- une parfaite connaissance du support empirique disponible (chapitre I),
- un recensement bibliographique des modèles ou des expérimentations pouvant être utilisées pour la modélisation et déjà disponibles (chapitre II).



CHAPITRE I

LE SUPPORT EMPIRIQUE

Cette recherche est basée sur une réexploitation en termes énergétiques d'enquêtes réalisées antérieurement par le Laboratoire. Un redressement s'est avéré nécessaire pour certaines d'entre elles.

Nous présenterons d'abord ce redressement puis les tris à plat sur l'ensemble du fichier (centre et périphérie) de quelques variables portant sur le ménage, les individus ou les déplacements, en les comparant, lorsque les données existent, aux résultats du recensement INSEE de 1975 ou à l'enquête ménages de 1976.

LET correspond au fichier de travail redressé, EM76 à l'enquête ménages et INSEE au recensement.

I - DESCRIPTION DES ENQUETES DE BASE

L'échantillon dont nous disposons est constitué de quatre enquêtes effectuées pour l'étude de la mobilité des personnes en milieu urbain auprès de ménages de l'agglomération lyonnaise. En 1978 et 1979, l'Institut des Etudes Economiques (actuelle partie universitaire du LET) a réalisé deux enquêtes dans le cadre du suivi du métro de Lyon.

Des 5 zones enquêtées nous avons retenu celles situées dans Lyon et Villeurbanne, à savoir :

- le quartier d'Ainay,
- les pentes de la Croix Rousse,
- le quartier Part Dieu - Brotteaux,
- le quartier des Gratte-Ciel.

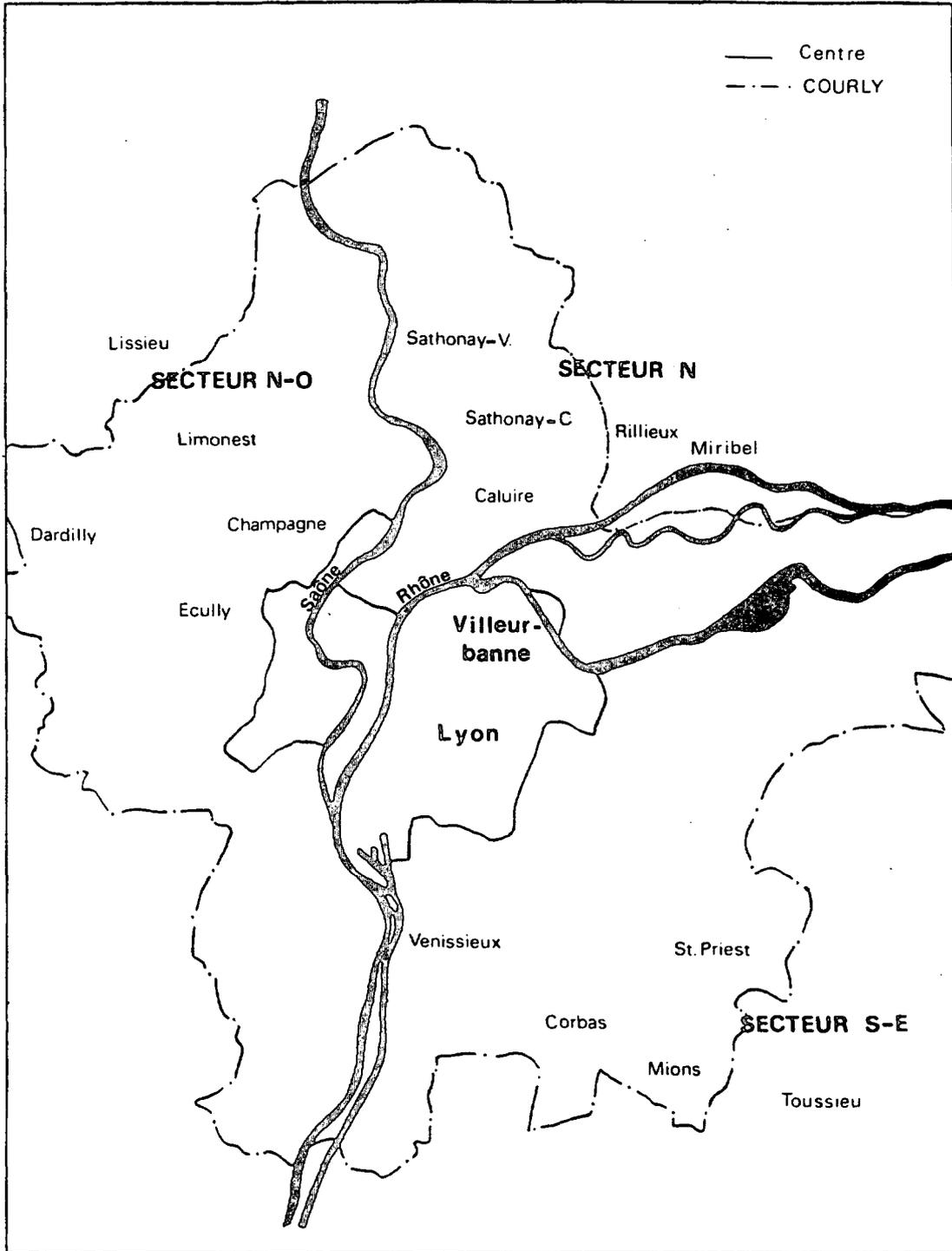
Dans la suite, ces enquêtes seront désignées par "sous-fichier Centre". Les deux autres enquêtes ont été réalisées en 1979 et 1980 par le Laboratoire d'Aménagement et d'Economie des Transports de l'ENTPE (actuelle composante ENTPE du LET) dans 15 communes situées au Nord-Ouest, Nord et Sud-Est de la périphérie lyonnaise (dans la suite "sous-fichier périphérie"). La figure 1.1 précise la localisation des différents quartiers et communes enquêtés.

Les quatre enquêtes ont saisi bien évidemment les caractéristiques socio-économiques traditionnelles aux niveaux tant ménage qu'individu. Pour l'étude de la mobilité, partant de l'analyse que les déplacements constituent rarement une fin en soi mais permettent d'articuler une utilisation de l'espace avec une utilisation du temps, la méthode utilisée a été celle des programmes d'activité (BONNAFOUS, 1978). Ainsi, pour chaque individu du ménage de plus de 16 ans, dans les enquêtes effectuées en 1978-1979, et de plus de 10 ans dans l'enquête 1980, on a recueilli chronologiquement l'ensemble des activités effectuées la veille du jour d'enquête (uniquement pour les jours ouvrables). Pour chaque activité sont retenus des renseignements tels que sa fréquence de réalisation, sa nature (d'après une nomenclature dérivée de la nomenclature INSEE) et sa localisation géographique.

L'activité déplacement a été saisie par "trajets", le trajet élémentaire étant spécifié alors par un mode et par un nombre de personnes l'effectuant. L'attente en vue de se déplacer est intégrée au déplacement en cours lorsqu'il existe ou sinon à celui qui lui succède. Chaque déplacement a été classé selon trois catégories (figure 1.2).

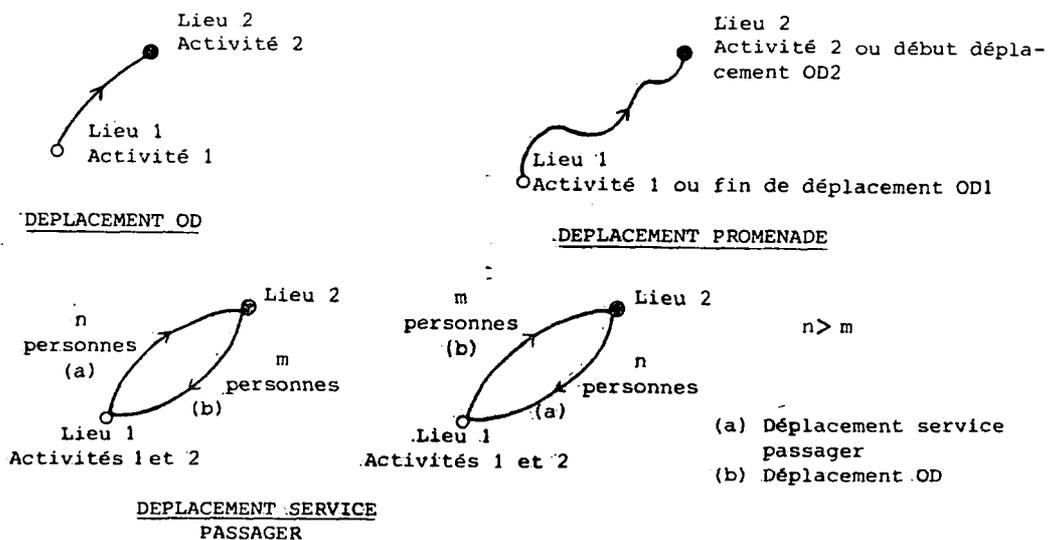
- Le déplacement origine-destination (OD), caractérisé par une activité à l'origine et une activité à la destination (l'activité peut être un déplacement d'un autre type). Ainsi, le parent qui, le matin dépose un enfant à l'école en se rendant à son travail

FIGURE 1.1 : Les zones d'enquête



- en voiture, effectue un seul déplacement composé de deux trajets: le premier correspond à un taux d'occupation du véhicule de deux, le second à un parcours effectué seul. L'activité à l'origine est, par exemple, le petit déjeuner, celle à la destination est le travail. Les déplacements O.D. sont donc un moyen pour l'individu d'accomplir son programme d'activité sous les contraintes spatiale et temporelle.
- Le déplacement promenade (P). Parce que l'on ne se déplace pas que pour aller quelque part, le déplacement promenade trouve son propre motif en lui-même et peut nécessiter préalablement un déplacement O.D.. Il est ainsi à mi-chemin de l'activité pure et du déplacement pur, empruntant à celui-ci son aspect itinérant et à celle-là son caractère de réponse à un besoin de l'individu. Dans une perspective fonctionnelle, si pour le déplacement O.D., ce sont origine et destination qui sont fondamentaux, pour la promenade c'est l'itinéraire. Un déplacement promenade n'est constitué, le plus souvent, que d'un seul trajet. Le déplacement promenade est l'un des éléments à part entière du programme d'activités.
 - Le déplacement service passager (S.P.). Il vise à l'accompagnement d'une personne et est toujours inclus dans un voyage à deux déplacements, l'un de type service passager, l'autre de type O.D.. On appellera ici voyage toute suite de déplacements dont points de départ et d'arrivée sont confondus. Si le voyage s'effectue à partir du domicile, on parlera alors de sortie. Ainsi le parent dont nous parlions plus haut, s'il rentrait à son domicile au lieu d'aller à son travail après avoir déposé son enfant, effectuerait alors un déplacement service passager puis un déplacement O.D.. (Quant à l'enfant, il ne fait, bien sûr, qu'un seul déplacement, de type O.D.). Ce déplacement n'est constitué que d'un seul trajet. Le déplacement service passager permet de réaliser le programme d'activité de l'individu accompagné et n'apparaît dans celui de l'accompagnateur que comme une contrainte.

FIGURE 1.2 : Les différents types de déplacement



On dispose alors pour chaque déplacement, quelque soit son type, des paramètres suivants :

- de son heure de début,
- de sa durée (enregistrée par tranches de cinq minutes),
- du (ou des) mode(s) avec lequel il a été effectué,
- des adresses avant et après (codées suivant un découpage de l'agglomération en 141 zones - découpage SEMALY -, mais figurant en clair sur les questionnaires),
- des activités avant et après,
- du nombre de personnes l'effectuant (non disponible dans le sous-fichier Centre).

Enfin, les caractéristiques socio-économiques traditionnelles, tant au niveau ménage qu'individu, ont bien entendu été saisies. (L'annexe I présente un questionnaire type).

II - REDRESSEMENT DES ENQUETES

Les enquêtes qui ont permis de constituer les deux fichiers de base avaient été constituées dans une perspective structurelle et non statistique. Il s'agissait alors moins de quantifier exactement la mobilité, des fluctuations dans l'usage des modes dues à une transformation importante de l'offre ou d'autres phénomènes fondamentaux dans l'analyse de la demande de déplacement que de révéler des tendances lourdes, structurant fortement les comportements de déplacement des individus. La recherche d'une telle représentativité structurelle s'est alors tout naturellement traduite par une pré-stratification des échantillons.

Etant donné nos objectifs de mise en évidence des facteurs explicatifs de la consommation énergétique des individus en transport urbain et d'appréhension des petits déplacements, la disponibilité d'un échantillon statistiquement représentatif s'avère nécessaire.

Mais le passage d'une représentativité structurelle à une représentativité statistique n'est pas sans poser problème. Celle-là peut se contenter d'un échantillon de petite taille, celle-ci a tout à perdre d'une réduction du nombre de ménages enquêtés. Celle-là est basée sur une pré-stratification de l'échantillon, favorisant telle modalité d'une variable aux dépens de telle autre (par exemple les usagers des transports en commun par rapport aux autres individus), celle-ci s'attache à ce que chaque modalité soit présente au prorata de sa fréquence dans la population. Aussi les coefficients de redressement peuvent-ils être fort élevés, ne signifiant pas nécessairement une mauvaise qualité de l'enquête de base.

Dans le cadre de travaux antérieurs, le sous-fichier périphérie a été redressé (méthode par élimination de ménage) et rendu représentatif de la périphérie de l'agglomération.

1 - REDRESSEMENT DU SOUS-FICHIER CENTRE

Les variables sur lesquelles repose le redressement du sous-fichier Centre sont couramment utilisées pour des opérations de ce type : il s'agit de la C.S.P. du chef de ménage (codage INSEE à deux chiffres, réduit à un chiffre - voir Annexe I) et de la pyramide des âges de l'ensemble des individus enquêtés.

Le tableau 1.1 donne les coefficients de redressement (méthode par multiplication des ménages) appliqués selon la CSP du chef de ménage. Il amène plusieurs réflexions.

TABLEAU 1.1 : Coefficients de redressement du sous-fichier Centre (Lyon et Villeurbanne) selon la CSP du chef de ménage.

C.S.P.	Code INSEE	Effectif (départ)	% (départ)	Facteur de Correct.	Effectif (redressé)	% (redressé)	% INSEE
Prof. agricoles	0,1	0	0	0	0	0	0,3
Patrons de l'ind. et du comm.	2	14	9,7	2	28	6,5	6,4
Prof. lib. et cadres sup.	3	35	24,3	1	35	8,1	9,0
Cadres moyens	4	15	10,4	3	45	10,4	11,2
Employés	5	18	12,5	3	54	12,5	12,1
Ouvriers	6	11	7,6	10	110	25,5	25,6
Pers. de serv. et autres actifs	7,8	1	0,7	10	10	2,3	4,6
Pers. non actives	9	50	34,7	3	150	34,7	30,8
TOTAL		144	100,0		432	100,0	100,0

L'effectif concerné est faible. Sa représentativité statistique de départ est très mauvaise. Le redressement multiplie globalement le nombre de ménages par 3 et certaines catégories par 10. Après redressement, un léger déficit en ménages à chef cadre, profession libérale ou personnel de service subsiste au profit des ménages à chef inactif.

TABLEAU 1.2 : Comparaison sous-fichier Centre (Lyon et Villeurbanne) et recensement 1975 selon l'âge pour les individus de plus de 16 ans.

CLASSE D'AGE		16	18	25	30	40	50	60	65 et plus	TOTAL
		18	25	30	40	50	60	65		
"Centre" non redressé	eff.	23	79	127	62	80	76	44	108	599
	%	3,8	13,2	21,2	10,4	13,4	12,7	7,3	18,0	100,0
"Centre" redressé	eff.	39	125	169	94	118	134	60	168	907
	%	4,3	13,8	18,6	10,4	13,0	14,8	6,6	18,5	100,0
INSEE		20,0	11,6	14,4	15,8	13,3	6,2	18,7	100,0	

Le redressement effectué, à partir de la C.S.P. du chef de famille donne, par rapport à l'âge, un résultat passable car les 25-30 ans et les 50-60 ans sont sur-représentés, au détriment des moins de 25 ans et des 30-50 ans (tableau 1.2).

2 - REPRESENTATIVITE DU FICHER GLOBAL

Le redressement du sous-fichier Centre laisse subsister certains problèmes. Il faut de plus examiner la représentativité statistique du fichier global regroupant les deux sous-fichiers redressés (il sera désigné par fichier LET).

Le tableau 1.3 traduit le léger déficit du sous-fichier "Centre" dans l'enquête LET.

TABLEAU 1.3 : Répartition des ménages entre Centre et Périphérie dans l'enquête LET et dans le recensement 1975.

	LET		INSEE
	eff.	%	%
Nbre de ménages "Centre"	432	51,3	55,6
Nbre de ménages "Périphérie"	410	48,7	44,4

En ce qui concerne la répartition des ménages du fichier LET selon la C.S.P. de leur chef, le tableau 1.4 permet de constater, par rapport au recensement 1975, une légère sous-représentation des ouvriers due à une trop forte présence d'inactifs, de cadres et de professions libérales.

TABLEAU 1.4 : Comparaison entre enquête LET et recensement 1975 selon la C.S.P. du chef de ménage.

C.S.P.	Prof. agr.	Patrons de l'ind et du comm.	Prof. lib. et cad. sup.	Cadres moyens	Employés	Ouvriers	Pers. de service et autres activités	Pers. non actives	Total
LET	eff. 4	51	93	112	96	227	34	225	842
	% 0,5	6,1	11,0	13,3	11,4	27,0	4,1	26,7	100,0
INSEE	% 0,6	6,3	9,0	12,0	11,6	30,4	4,6	25,6	100,0

Enfin l'étude de la structure par âge de la population enquêtée (tableau 1.5) montre un déficit des classes de 30-40 ans et de plus de 65 ans au profit des 25-30 ans et des 50-60 ans.

TABLEAU 1.5 : Comparaison entre enquête LET et recensement 1975 selon l'âge, pour les individus de plus de 16 ans.

CLASSES D'AGE		<u>16</u>	<u>18</u>	<u>25</u>	<u>30</u>	<u>40</u>	<u>50</u>	<u>60</u>	65	TOTAL
		18	25	30	40	50	60	65	et +	
LET	eff.	96	271	285	266	310	254	94	251	1 827
	%	5,3	14,8	15,6	14,6	17,0	13,9	5,1	13,7	100,0
INSEE	%	19,3		12,5	17,5	17,3	12,6	5,4	15,4	100,0

Que peut-on conclure de l'examen de ces tableaux ?

Tout d'abord, se confirme le fait qu'utiliser une enquête à des fins qui étaient ignorées lors de sa conception amène, bien souvent, des biais. Nous disposions ici d'un échantillon de petite taille. Le redressement auquel il a donné lieu n'a pas permis d'obtenir une très bonne correspondance avec le recensement INSEE.

Aussi, toutes les informations chiffrées qui seront fournies dans la suite de la recherche seront-elles à considérer avec précaution, plus en tant qu'ordre de grandeur qu'en tant que quantification exacte d'un phénomène.

III - PRESENTATION DU FICHER DE TRAVAIL

1 - LES MENAGES

Le fichier concerne 842 ménages, 432 dans le centre et 410 en périphérie.

Le nombre moyen de personnes est de 2,98 (INSEE : 2,77). L'enquête LET comprend, proportionnellement, peu de ménages d'une seule personne et beaucoup de 4 personnes. C'est là un biais de l'échantillon.

Le nombre moyen d'actifs est de 1,18, soit une valeur tout à fait comparable au 1,19 du recensement INSEE.

Si l'on s'intéresse aux indicateurs de possession de véhicules particuliers, on voit qu'ils sont plus élevés dans l'enquête LET : le taux de motorisation est de 104 (contre 84), le taux d'équipement 78 (68). Nous y voyons deux explications : la légère sur-représentation des classes les plus favorisées mais aussi une croissance certaine de ces deux indicateurs entre 1975 et la fin de la décennie.

Enfin, le nombre moyen de déplacements par ménage est de 9,57. Il est difficilement comparable au résultat de l'enquête ménages car, ici, tous les enfants entre 5 ans et 16 ans n'ont pas été enquêtés.

2 - LES INDIVIDUS

Le fichier regroupe 1 928 individus répartis de la façon suivante :

- 907 dans le centre et 1021 dans la périphérie,
- 1015 femmes et 913 hommes.

Le tableau 1.6 indique leur distribution selon la catégorie socio-professionnelle.

La mobilité moyenne des individus enquêtés est de 4,2. Elle est de 3,7 dans l'enquête ménages. Là encore, la comparaison est hasardeuse car les échantillons ne sont pas strictement compatibles. La différence peut cependant s'expliquer par plusieurs facteurs :

- il est possible que les jeunes enfants aient une mobilité plus faible que la moyenne,
- la mobilité a très probablement légèrement augmenté entre la réalisation des deux enquêtes,
- la structure socio-économique des échantillons étant différente peut induire des fluctuations,
- le type d'enquête utilisé n'est pas neutre vis-à-vis de la qualité de l'information finale.

TABLEAU 1.6 : Répartition des individus selon la C.S.P.

CSP	Prof. agr.	Patrons de l'ind. et du commerce	Prof. lib. et cadres sup.	Cadres moyens	Employés	Ouvriers	Pers. de service et autres actifs	Pers. non actives	TOTAL
Effectifs	4	70	114	203	229	312	68	928	1 928
%	0,2	3,6	5,9	10,5	11,9	16,2	3,5	48,2	100 %

En effet, une enquête de type programme d'activité, parce qu'elle recense en séquence toutes les activités sur une période de 24 heures (la veille, dans notre cas), autorise plus difficilement l'oubli des petits déplacements qu'une enquête traditionnelle du type enquête-ménages. Effectuant simultanément ces deux types d'enquête, une équipe du T.S.U. a abouti à une différence de 13 % entre les deux valeurs observées de la mobilité (JONES, DIX, CLARKE et HEGGIE, 1980).

La mobilité urbaine (déplacements ayant l'origine et la destination dans l'agglomération) est de 4,00. Le nombre moyen de déplacements interurbains par personne enquêtée est alors de 0,2. Cette valeur élevée est à nuancer par le fait que sur 100 individus, 7 seulement sont sortis de l'agglomération. L'annexe II est une présentation rapide de ces individus et des déplacements correspondants.

Le budget temps de transport (BTT) moyen est de 90 minutes. Il est de même ordre de grandeur que le temps moyen consacré à la télévision (87 minutes) et que le cumul du temps d'achats, soins, services et du temps consacré à la vie sociale (84 minutes). La considération des seuls déplacements urbains amène à un B.T.T. de 81 minutes. Le temps moyen par déplacement est légèrement supérieur à 21 minutes (20 minutes pour les seuls déplacements urbains), soit 23 % plus élevé que dans l'enquête ménages (17 minutes). Avant d'essayer d'expliquer cette différence importante (cf. infra, 3.3.),

nous allons encore présenter quelques résultats généraux concernant les temps moyens consacrés aux diverses activités.

La nomenclature des activités utilisée pour le codage de l'enquête (Annexe I) est trop riche pour l'échantillon dont nous disposons. De plus, certaines distinctions ne deviennent pertinentes qu'à un fin niveau de désagrégation des individus. Aussi ne considérerons-nous que des typologies plus grossières.

TABLEAU 1.7. : Budgets temps journaliers moyens des activités selon une typologie en huit classes (en minutes).

Activité	Besoins privés	Sommeil	Travail	Travaux ménagers	Achats, soins, services	Vie sociale	Télé	Loisirs (sauf Télé)
Budget-Temps moyen	141	517	278	132	26	58	87	111

La somme des budgets-temps moyens du tableau 1.7 n'est pas égale à 1 440 minutes, le budget temps de transport n'étant pas inclus ici. L'importance du temps passé à regarder la télé est mise en évidence comme également le peu de temps consacré aux achats (rappelons que l'enquête ne porte pas sur la fin de la semaine).

Si l'on ignore les temps de sommeil et de besoins privés, on constate que les 782 minutes restantes (soit 13 heures) se répartissent en :

- 436 minutes (7 heures et quart) d'activités contraintes (travail, travaux ménagers et achats, soins, services),
- 256 minutes (4 heures et quart) d'activités non contraintes (loisirs, télévision, vie sociale),
- 90 minutes (1 heure et demie) de déplacements.

Ces résultats demanderaient bien évidemment à être nuancés en fonction de critères socio-économiques. Mais ce n'est pas l'objet de ce travail.

Enfin, toujours en moyenne, un individu enquêté passe 999 minutes (16 heures 39 minutes) chez lui. Pour chaque heure d'activité hors de son domicile, il doit ainsi se déplacer en moyenne 15 minutes. Là encore, la moyenne cache de grandes disparités au niveau des individus.

3 - LES DEPLACEMENTS

Le fichier regroupe 8 058 déplacements dont 7 710 strictement urbains (95,7 %). Ce sont ceux-ci que nous allons considérer dans la suite de cette recherche.

TABLEAU 1.8 : Répartition modale et temps moyen de déplacement par mode (enquêtes LET et EM 76)

		MAP	2R	TC	VP
Répartition modale (en %)	LET	42,2	3,5	13,3	41,0
	EM 76	45,5	5,6	11,3	37,6
Temps moyen par déplacement (en minutes)	LET	17	20	36	18
	EM 76	14	21	31	17

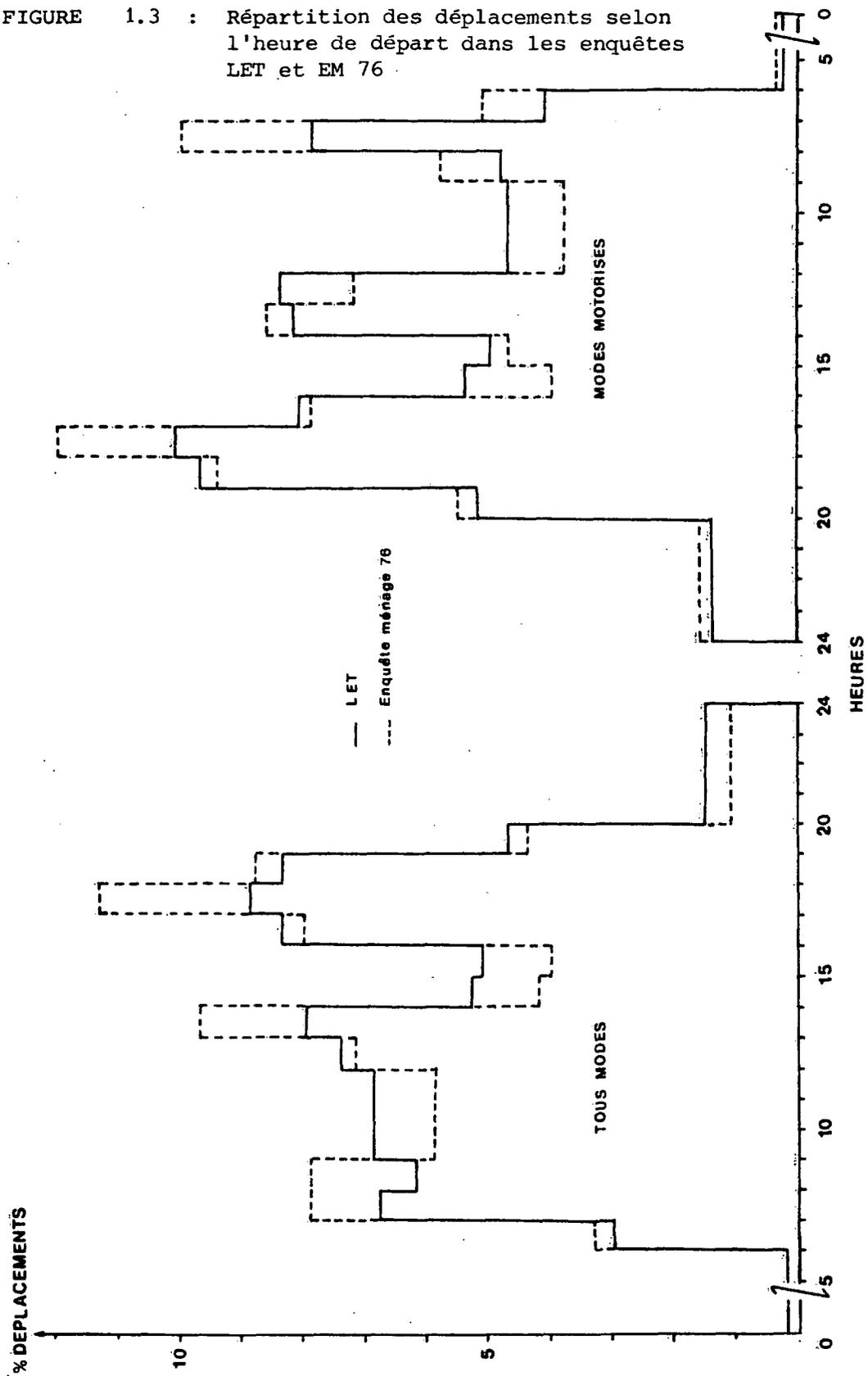
Selon le tableau 1.8, la part de la marche à pied et des deux roues est plus faible dans l'enquête LET que dans l'enquête ménages. Cela peut s'expliquer notamment par le recensement dans celle-ci de l'ensemble des jeunes de 5 à 16 ans. En effet, les déplacements de type domicile-école ont lieu à 48 % à pied et à 8 % en deux roues (chiffres EM 76).

Toujours sur le même tableau, on constate une augmentation de la durée moyenne des déplacements à pied et en transport en commun, ceux en voiture et en deux roues restant stables. Ce phénomène est plus difficile à expliquer. L'influence de la non-prise en compte de tous les scolaires et la sur-représentation des ménages périphériques par rapport à la distribution INSEE interviennent probablement.

Ce double mouvement, glissement de la répartition modale et allongement des durées moyennes par mode, explique la forte différence constatée au 3.2 entre les durées moyennes par déplacement des deux enquêtes.

La figure 1.3 semble traduire, pour les déplacements tous modes confondus, une baisse de l'intensité des pointes et en conséquence un lissage de la courbe de répartition horaire. Pour les seuls modes motorisés on remarque une forte diminution de la pointe du matin. Ces effets peuvent être dus à la structure de l'échantillon mais aussi plus probablement à l'extension de l'horaire libre et de la montée du chômage.

FIGURE 1.3 : Répartition des déplacements selon l'heure de départ dans les enquêtes LET et EM 76



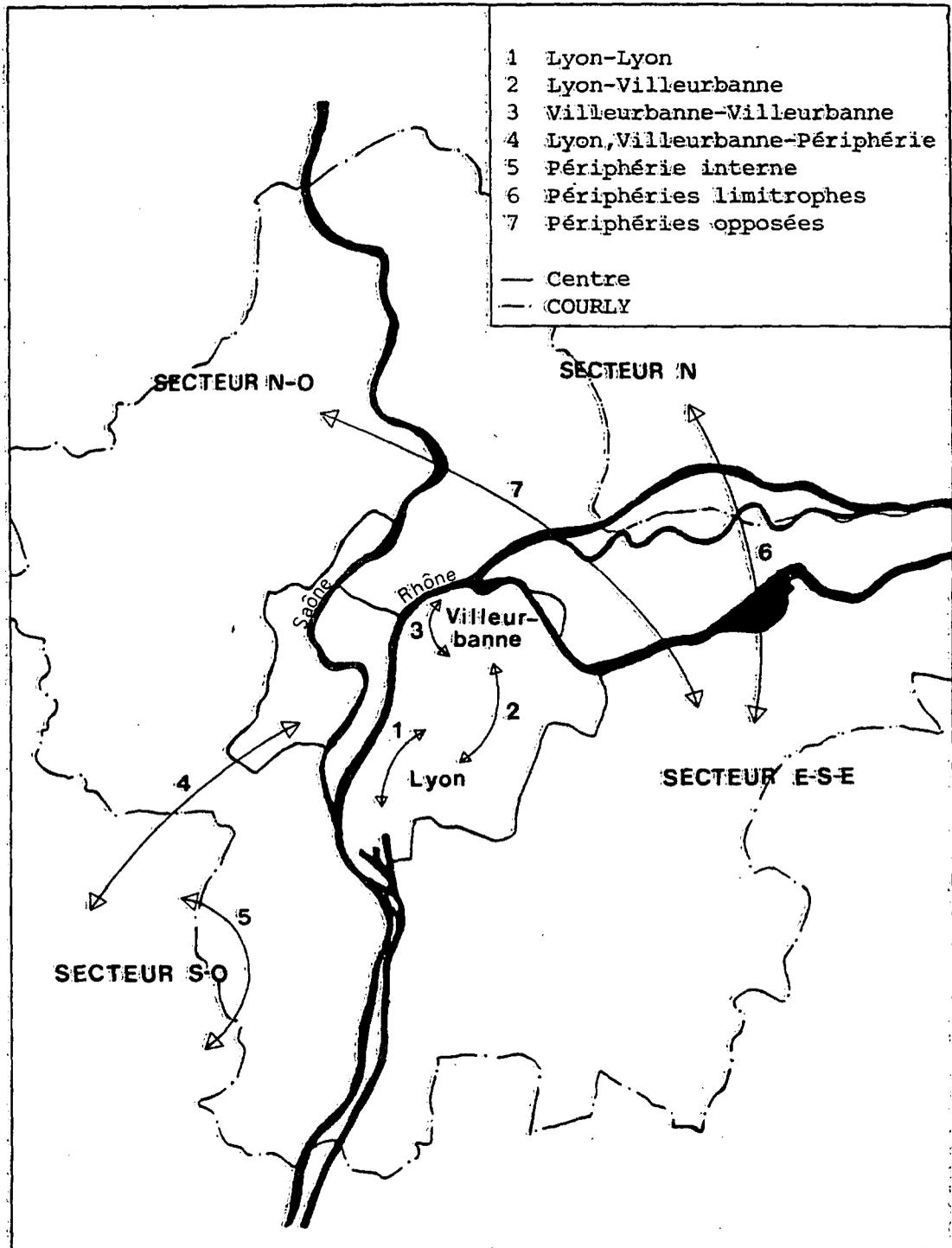
Enfin, il est possible, après zonage de l'agglomération, de caractériser un déplacement par le type de liaison auquel il correspond. Six zones ont été isolées, deux constituant le "centre" de l'agglomération (Lyon et Villeurbanne), les quatre autres sa "périphérie" ; la figure 1.4 précise les limites de ces zones et permet donc de définir les modalités du type de liaison. Les trois types usuels (Centre-Centre, Centre-Périphérie et Périphérie-Périphérie) peuvent ainsi être conservés en l'état ou bien être éclatés et conduisent alors à une typologie à huit classes. Le tableau 1.9 ventile les déplacements urbains selon ces deux grilles.

TABLEAU 1.9. : Répartition des déplacements selon le type de liaison.

TYPE DE LIAISON	%
CENTRE-CENTRE	47,9
dont :	
Lyon - Lyon	37,9
Lyon - Villeurbanne	3,1
Villeurbanne - Villeurbanne	6,9
CENTRE-PERIPHERIE	15,6
dont :	
Lyon, Villeurbanne-Périphérie ..	7,7
Périphérie-Lyon, Villeurbanne ..	7,9
PERIPHERIE-PERIPHERIE	36,5
dont :	
Interne à un secteur	34,8
Secteurs limitrophes	1,3
Secteurs opposés	0,4
AGGLOMERATION-AGGLOMERATION	100,0

Près d'un déplacement sur deux est, dans notre fichier, interne au centre, la plupart se situant dans Lyon. Un déplacement sur trois est interne à un secteur de la périphérie, les déplacements entre secteurs étant pratiquement inexistantes. Enfin, les déplacements radiaux sont pratiquement également répartis entre les deux sens (Centre-Périphérie et Périphérie-Centre).

FIGURE 1.4 : Zonage de l'agglomération et types de liaison



CHAPITRE II

REPERES BIBLIOGRAPHIQUES : LA MODELISATION
DE LA CONSOMMATION D'ENERGIE DES VEHICULES
EN MILIEU URBAIN

Les enquêtes servant de support empirique à la recherche ne se situaient pas dans des perspectives d'analyse en termes énergétiques. La consommation afférente à chaque déplacement motorisé n'a donc pas été recueillie et il convient maintenant d'essayer de la déterminer à partir des données enregistrées. Un détour bibliographique s'impose donc.

Nous allons voir que l'état des connaissances est sensiblement différent selon les modes. Si les motoristes s'intéressent de près au comportement des automobiles et proposent diverses modélisations de leur consommation en conditions réelles de circulation, les transports collectifs sont déjà plus délaissés et n'ont donné lieu qu'à quelques rares travaux, tandis que les deux-roues sont pratiquement ignorés. Cette hiérarchie n'est d'ailleurs pas inattendue, puisqu'elle correspond parfaitement à celle des enjeux espérés en matière d'économies potentielles d'énergie.

Notre passage en revue de la littérature la respectera, envisageant successivement la voiture, les transports collectifs et les deux roues.

I - LES VEHICULES LEGERS

L'usage grandissant de la voiture sur de faibles distances a attiré l'attention des motoristes sur les fortes consommations énergétiques qui en découlent. Mais moins que d'un critère de longueur, ces surcoûts proviennent du mauvais rendement des moteurs à basse température. Les consommations unitaires sont alors mal adaptées à la prise en compte de ces phénomènes. Rappelons pour mémoire que l'on estime la consommation unitaire à 52 grammes équivalent pétrole par passager-kilomètre transporté (gép/pkt) pour un véhicule moyen dans les grandes agglomérations françaises autres que Paris (FRYBOURG, 1979).

Il est en fait souhaitable de décomposer l'énergie consommée par une automobile en deux termes dont le poids relatif dépend de la température du moteur. Le premier est appelé la consommation moteur chaud (CMC) et correspond à la quantité de carburant consommée pour assurer le mouvement du véhicule lorsque le moteur est à l'équilibre thermique. Le second représente le surcoût énergétique nécessaire à la mise en température du moteur et s'annule si le moteur est à sa température d'équilibre lors du démarrage : il prend le nom de surconsommation (ΔC).

La consommation totale d'un véhicule pour un déplacement donné se met alors sous la forme $CMC + \Delta C$, les deux termes dépendant d'une multitude de facteurs, mécaniques aussi bien que météorologiques, spatiaux aussi bien qu'humains.

Nous envisagerons donc tout d'abord les formulations de la consommation énergétique pour les déplacements urbains effectués moteur chaud avant de faire le point sur les évaluations de la surconsommation due aux démarrages à froid. Enfin, puisque les consommations réelles moyennes des véhicules sont fonction d'un grand nombre de facteurs hétérogènes, nous en présenterons une liste quasi exhaustive tout en abordant le problème de leur prise en compte simultanée.

1 - LA CONSOMMATION MOTEUR CHAUD

Deux précisions de vocabulaire s'imposent tout d'abord :

- l'énergie dépensée concerne uniquement le mouvement du véhicule : on ne considère donc pas la consommation correspondant au ralenti du moteur (arrêt avec moteur tournant) ; toutefois, le modèle de consommation moteur chaud utilisé par la suite intègre indifféremment les phases de mouvement et d'arrêt d'un véhicule ;
- le qualificatif de "moteur chaud" soulève quelques difficultés ;

de fait, doit on entendre par là un moteur ayant atteint son équilibre thermique ou un moteur ayant dépassé la phase de forte surconsommation ; si un moteur à l'équilibre thermique ne surconsomme plus, l'inverse n'est par contre pas vrai. Toutefois, comme la surconsommation devient rapidement négligeable après un démarrage moteur froid, on ne fera pas de différence entre ces deux définitions par la suite.

Cette consommation fait l'objet de modélisation à partir d'ajustements statistiques réalisés d'après des essais effectués soit en circulation réelle, soit sur banc à rouleaux selon une procédure normalisée ayant pour ambition de reproduire les conditions de déplacement en milieu urbain (le cycle Europe). Les données suivantes sont alors recueillies :

- le litrage consommé réellement, mesuré sur le véhicule et qui permet du reste d'obtenir des consommations moyennes réelles ;
- divers paramètres représentatifs du véhicule et de son déplacement.

Les modèles les plus courants sont du type :

$$\text{CMC} = a + \frac{b}{v}$$

CMC : consommation l/100 km
v : vitesse moyenne km/h

où les coefficients a et b dépendent essentiellement de la puissance du groupe motopropulseur et de ses conditions de fonctionnement, du poids du véhicule, des caractéristiques du réseau viaire et enfin du style de conduite du conducteur.

Nous rappelons ci-après les principaux paramètres retenus actuellement dans l'élaboration des modèles de consommation de carburant moteur chaud. Nous verrons par la suite que d'autres facteurs peuvent influencer cette consommation (sous section 3).

1.1 - Les paramètres considérés dans les modèles de consommation moteur chaud

1.1.1 - Le type d'énergie

Il est clair que les comportements énergétiques des véhicules sont fortement différenciés selon le type d'énergie utilisée. Si la diesélisation du parc automobile français est un phénomène avéré, le recours au diesel reste toutefois limité. Ainsi, en 1978, il ne concernait que 3 % des véhicules. Sa part était donc alors très faible. Du fait que les études le concernant sont rares et que, de plus, nous sommes dans l'impossibilité de déterminer pour chacun des déplacements recensés dans notre enquête quel type d'énergie a été utilisé, nous nous focaliserons ici sur les seuls véhicules à essence.

1.1.2 - Le type de trajet

On distingue couramment les trajets en milieu urbain des trajets en milieu rural. Seuls les premiers seront considérés ici.

1.1.3 - Le type de véhicule

Comme il n'est pas possible pour des raisons pratiques d'établir une formalisation pour chaque type de véhicule, les modèles existants reposent sur des recensements par classe de puissance fiscale. Celle-ci résume en effet correctement les diverses caractéristiques des automobiles (COHEN, 1981). Les modèles sont alors relatifs :

- soit à un véhicule moyen représentatif du parc (chaque classe de puissance est pondérée par le nombre de véhicules correspondant) ;
- soit à un véhicule moyen urbain (l'usage des différents types de véhicules n'est pas le même entre rase campagne et milieu urbain : la pondération repose ici sur les kilométrages urbains parcourus par les véhicules de chaque classe de puissance) ;
- soit à trois véhicules types qui sont représentatifs respectivement :
 - . des véhicules bas de gamme (6 cv et moins),
 - . des véhicules gamme moyenne (7 à 9 cv),
 - . des véhicules haut de gamme (10 cv et plus).

1.1.4 - Les caractéristiques du déplacement

Un grand nombre de caractéristiques peuvent être retenues mais, dans la pratique, elles sont fortement liées les unes aux autres. La plupart des modèles sont en fait des améliorations du modèle de base précédemment cité et que l'on peut aussi formuler de la manière suivante :

$$\text{CMC} = aL + bT$$

CMC : litrage absolu consommé
L : longueur réelle du déplacement
T : temps réel du déplacement.

Les quantités aL et bT peuvent se voir doter d'une certaine interprétation physique : aL est l'énergie consommée par le déplacement, bT est l'énergie consommée pour faire tourner le moteur.

Les autres caractéristiques du déplacement qui peuvent

être introduites dans le modèle de base sont les suivantes (ROUMEGOUX, 1981; COHEN, 1981) :

- nombre d'arrêts
- temps de roulage
- temps d'arrêt
- longueur parcourue entre deux arrêts successifs
- vitesse maximale atteinte sur le tronçon i
- vitesse maximale au cours du déplacement
- type de voirie utilisée lors du déplacement.

L'introduction de chacune de ces caractéristiques n'apporte que peu de précision supplémentaire par rapport aux deux seules caractéristiques longueur et temps, du fait de leur très forte liaison dans les conditions de circulation urbaine (ROUMEGOUX, 1981). Par ailleurs, elles ne figurent que très exceptionnellement dans les enquêtes classiques sur la mobilité. On peut cependant noter que les modèles intégrant certaines de ces caractéristiques sont parfaitement adaptés à l'évaluation énergétique d'actions précises sur la circulation (politique de feux, gestion centralisée, trémies, etc.).

1.2- Les modèles existants

La littérature sur ce sujet manque parfois de précision, particulièrement en ce qui concerne les conditions d'expérimentation. Aussi avons-nous classé les modèles existants en deux familles :

- première famille : ce sont des études pour lesquelles, soit on ne connaît pas les conditions précises d'expérimentation (faute d'avoir accédé aux documents originaux), soit ces conditions ne répondent pas à nos objectifs ;
- deuxième famille : il s'agit d'études dont les conditions d'expérimentation nous sont connues et qui s'adaptent mieux à nos objectifs.

1.2.1 - Première famille

A - Essai R 12 TL à Lyon (ROUMEGOUX, 1979)

N'en connaissant pas les conditions d'expérimentation et sachant qu'il s'agit au mieux d'un véhicule de 1975, nous ne retiendrons pas le modèle élaboré à partir de ces essais (les résultats apparaissent pour mémoire dans le tableau 2.1).

TABIEAU 2.1 : Consommations moyennes et modèles de consommation
(en litres/100 km)

	Véhicule considéré	Aire géographique de l'étude	Température ambiante	Paramètre du modèle		Vitesse moyenne (km/h)	Consommation à vitesse moyenne (l/100 km)	Consommations à différentes vitesses (l/100 km)			
				$C = a + \frac{b}{v}$ b.	a			C ₁₀	C ₂₀	C ₂₅	C ₄₀
A	R 12 TL	Lyon		117	6,7			18,4	12,5	11,3	9,6
B	différents véhicules	Cycle Europe	20°C			19,0	14,0				
C1	R 12 TL	Firminy				23,5	9,0				
C2	R 12 TL	Firminy				27,0	8,7				
D1	R 12 TL	Paris		104	7,0			17,4	12,2	11,1	9,6
D2	R 12 TL	Province		98	6,0			15,8	10,9	10,0	8,4
E	R 12 TL	Paris		89	6,3			15,2	10,8	9,9	8,5
F	R 12 TL	Paris		101	7,1			17,2	12,1	11,1	9,6
G1	R 5	Lyon		112	3,7			14,9	9,3	8,2	6,5
G2	R 18	Lyon		112	6,2			17,4	11,8	10,7	9,0
G3	505	Lyon		166	7,7			24,3	16,0	14,3	11,8
G4	véhicule moyen	Lyon		117	5,5			17,2	11,4	10,2	8,4

B - Essai Mobil-Oil (BOUARD et CLUZEL, 1978)

Les conditions d'expérience des mesures réalisées sur différents véhicules de 1975-76 sont mal définies dans la référence correspondante. Il s'agit néanmoins d'une répétition de cycles Europe voulant mettre en évidence l'influence des démarrages moteur froid sur la consommation de carburant. A ce titre, sont fournies des consommations moyennes moteur chaud qu'on trouvera dans le tableau 2.1 .

C - Essai R 12 TL à Firminy (ROUMEGOUX, 1979)

J.P. ROUMEGOUX a testé avec une R.12 TL les conséquences de la mise en service d'une déviation autoroutière sur le trafic traversant la ville de Firminy. Il dispose ainsi de deux jeux de données, l'un relatif à la traversée de l'agglomération avant mise en place de la déviation (C1), l'autre après (C2). Toutefois, ces trajets ne sont absolument pas représentatifs des parcours urbains réels.

D - Essai R 12 TL à Paris et en Province : Toulouse, Nice, Dunkerque (ROUMEGOUX, 1979)

Ces résultats, obtenus par COHEN et repris par ROUMEGOUX, issus d'essais réalisés avec une R 12 TL, sont relatifs d'une part à Paris (D1), de l'autre à la Province (D2). On remarquera (cf. tableau 2.1) les consommations plus faibles en province qu'à Paris, mais il faut toutefois noter que l'effet surconsommation n'est peut-être pas totalement éliminé (voir plus loin, § H).

E - Etude des budgets-énergie des ménages (ORFEUIL, 1980)

J.P. ORFEUIL a utilisé pour son étude des budgets-énergie transport des habitants de la région parisienne, un modèle tiré du rapport de S. COHEN de 1979 évoqué en D. Ce modèle est cependant différent de celui retenu par J.P. ROUMEGOUX (modèle D1).

F - Etude d'une R 12 TL à Paris (COHEN, 1980)

Citée par J.P. ROUMEGOUX dans un rapport de 1981 et reprise par son auteur dans un rapport final de la même année sur lequel nous reviendrons, cette étude de S. COHEN conduit à un modèle élaboré à partir de la même base de données que D1 et E, mais tenant toutefois compte des arrêts des véhicules. Ce modèle est bien sûr redevable d'une critique identique à celle formulée pour les autres modèles issus de ces essais.

G - Essais réalisés par l'IRT-CERNE (MAURIN, 1982)

En 1981, J.P. ROUMEGOUX s'est intéressé à l'influence des limitations de vitesse en milieu urbain sur la consommation des véhicules. L'étude nous intéresse cependant moins, car les voiries retenues permettaient d'atteindre des vitesses élevées. On est donc

loin de parcours de type "urbain" et les valeurs de consommation obtenues ne sont données ici qu'à titre illustratif (tableau 2.1). Quatre modèles sont disponibles : bas de gamme (G1), gamme moyenne (G2), haut de gamme (G3) et véhicule moyen (G4).

Le tableau 2.1 donne une vue d'ensemble des résultats obtenus par ces différentes études. Les consommations spécifiques à 10, 20, 25 et 40 km/h varient sensiblement entre les différents modèles, mais sans doute y-a-t-il là la manifestation de terrains d'expérience variés, dont l'influence, on le sait, est loin d'être négligeable.

1.2.2 - Deuxième famille

H - Synthèse des essais réalisés par S. COHEN (COHEN, 1981)

S. COHEN a synthétisé ses résultats antérieurs (cf. notamment § D). L'ensemble des essais réalisés à Paris et en Province donne un échantillon de 120 déplacements censé être représentatif des déplacements urbains des français (au niveau national). Ces essais se sont déroulés entre 1977 et 1980 et ont été effectués par 43 conducteurs. Les véhicules étaient tous bien réglés et ont toujours fait l'objet d'un préchauffage de leur moteur d'une durée de 20 minutes. C'est là que se trouve le principal handicap de ces expérimentations : ainsi que S. COHEN le mentionne lui-même, "... la procédure utilisée pour les essais sur les trois véhicules à essence n'a peut-être pas permis de s'affranchir totalement des effets de surconsommation dus au démarrage à froid, notamment durant les essais à basse température". Les consommations réelles sont donc probablement surévaluées. Le rapport fournit des données pour 3 types de véhicule représentatifs du bas de gamme avec la R 5 TL (H1), du milieu de gamme avec la R 12 TL (H2) et du haut de gamme avec la 504 GL (H3). A partir de l'enquête transport INSEE 1974 et en utilisant des estimations provenant des travaux de l'ONSER, l'auteur a approché la répartition du kilométrage annuel en ville entre les 3 types de véhicule et élaboré ainsi un modèle unique représentatif d'un véhicule urbain moyen (H4). Les principaux résultats de ces essais sont consignés dans le tableau 2.2.

I - Essais R 12 TL à Lyon (ROUMEGOUX, 1981)

J.P. ROUMEGOUX a réalisé en 1981 des mesures de consommation sur une R 12 TL circulant à Lyon dans les conditions suivantes :

- véhicule parfaitement réglé,
- parcours unique utilisant plusieurs types de voirie, mais non représentatif des déplacements urbains en automobile (à Lyon),
- deux chauffeurs effectuant 15 fois chacun ce parcours,
- absence de pluie et de vent.

TABLEAU 2.2 : Consommations moyennes et modèles de consommation (en litres/100 km)

	Véhicule considéré	Aire géographique de l'étude	Température ambiante	Paramètre du modèle $C = a + \frac{b}{V}$		Vitesse moyenne (km/h)	Distance moyenne (km)	Consommation à vitesse moyenne (l/100km)	Consommations à différentes vitesses (l/100 km)			
				b	a				C ₁₀	C ₂₀	C ₂₅	C ₄₀
H1	R 5 TL	milieu urbain	effet neutralisé	79,5	8,02	26,5	6,0		16,0	12,0	11,2	10,0
H2	R 12 TL	milieu urbain	effet neutralisé	99,5	6,52	26,5	6,0		16,5	11,5	10,5	9,0
H3	504 GL	milieu urbain	effet neutralisé	130,75	7,87	26,5	6,0		20,9	14,4	13,1	11,1
H4	modèle unique	milieu urbain	effet neutralisé	100,5	7,47	26,5	6,0		17,5	12,5	11,5	10,0
I1	R 12 TL	Lyon	entre 10° et 20°C	70,2	6,7	27,0	2,1	9,8	13,7	10,2	9,6	8,5
I2	R 12 TL	Lyon	entre 10° et 20°C	60,8	7,4				13,5	10,4	9,8	8,9

Les conditions d'expérimentation sont quasi optimales, ce qui conduit sans doute à une légère sous-évaluation des consommations réelles. Un premier modèle (I1) a été calé à partir de l'ensemble des mesures, alors qu'un second (I2) n'a été calé qu'à partir des seuls parcours comportant au moins 2 arrêts au km, c'est-à-dire dans des conditions de circulation plus défavorables (cf. tableau 2.2).

1.2.3 - Analyse critique des modèles de la deuxième famille

Seuls les trois modèles relatifs à la R 12 TL (I1, I2, H2) sont véritablement comparables, le modèle unique de S. COHEN (H4) pouvant toutefois en être rapproché. Pour ce dernier, il s'agit d'un modèle relatif à un "véhicule moyen urbain", alors que la R 12 TL est un "véhicule moyen du parc" ; il n'y a donc pas équivalence entre les deux.

Les modèles I1 et I2 sont très proches : sur la plage de 10 à 30 km/h, l'écart entre les deux est en effet négligeable (0,2 l/100 km). Le modèle H2 conduit par contre à des consommations beaucoup plus élevées sur la même plage : de + 1 à + 3 l/100 km. A 40 km/h, I2 et H2 sont très similaires, alors que I1 est sensiblement en dessous (- 0,5 l/100 km). Enfin H4 est systématiquement supérieur de 1 l/100 km à H2.

Les trois modèles H2, I1 et I2 présentent malgré tout des différences (consommation H2 supérieure aux consommations I1 et I2), qui, nous semble-t-il, s'expliquent par plusieurs raisons :

- les surconsommations n'ont probablement pas toutes été éliminées dans l'étude de S. COHEN (§ H) ;
- les conditions atmosphériques sont idéales dans l'étude de J.P. ROUMEGOUX (§ I), ce qui n'est pas le cas chez S. COHEN ;
- de la même manière, la diversité des conducteurs chez S. COHEN traduit une meilleure approche de la situation réelle, alors que chez J.P. ROUMEGOUX la limitation à deux conducteurs peut tirer la consommation vers le bas.

En conclusion, on peut donc considérer que :

- J.P. ROUMEGOUX a calé ses modèles sur la base d'une situation idéale, ce qui peut conduire à des sous-estimations, et à partir d'un parcours urbain non représentatif des déplacements en automobile à Lyon ;
- S. COHEN, à l'inverse, a calé ses modèles dans des conditions climatiques et de circulation réelles ainsi que sur des parcours urbains représentatifs de la réalité nationale. Par contre, il n'a sans doute pas totalement gommé l'effet de surconsommation provoqué par le démarrage à froid.

Ces deux modèles, basés l'un sur la surestimation d'une situation réelle, l'autre sur la sous-estimation d'une solution idéale, présentent donc des imperfections mais ils nous semblent toutefois, par rapport à nos objectifs, les plus accomplis parmi ceux rencontrés dans la littérature.

2 - LA SURCONSOMMATION DUE A LA MISE EN TEMPERATURE DU MOTEUR

La surconsommation est la quantité de carburant nécessaire pour amener le groupe moto-propulseur d'un véhicule à sa température d'équilibre. Les causes de cette surconsommation liée au démarrage du moteur à froid sont multiples (DELSEY, BAC et VIDON, 1980) :

- la simple nécessité de réchauffer le moteur jusqu'à sa température optimale de fonctionnement ;
- les frottements sont plus élevés à froid qu'à chaud, d'où surcroît d'énergie mécanique à fournir ;
- la préparation, la répartition et la combustion du mélange ne sont pas optimisées, si bien que le rendement énergétique est faible ;
- l'incidence, sur la consommation, du fonctionnement des auxiliaires lors d'un départ à froid peut être considérable : "... c'est dans la phase de démarrage que l'on demande aux auxiliaires et accessoires un gros travail - période pendant laquelle le rendement mécanique du moteur est très faible. Toute demande supplémentaire de puissance se traduira au démarrage à froid par une surconsommation importante, surtout si le rendement intrinsèque des auxiliaires et accessoires est faible".

La surconsommation a été beaucoup moins étudiée que la consommation moteur chaud. Cependant les principaux facteurs l'influençant ont été bien isolés et, si elle n'a pas été modélisée, une étude expérimentale récente de l'IRT-CERNE fournit des résultats très intéressants pouvant contribuer au calage d'un modèle simple.

2.1 - Paramètres influençant la mise en température du moteur

Une approche théorique permet de mettre en évidence les paramètres jouant sur la montée en température du moteur :

- le type de moteur : un gros moteur, qui a un rapport superficie/masse relativement faible, s'échauffera plus vite qu'un petit. A l'inverse, un moteur à refroidissement à air s'échauffera nettement moins vite qu'un moteur à refroidissement à eau ;
- la température ambiante : plus elle sera élevée et plus, toutes choses égales par ailleurs, la surconsommation sera faible ;

- la température du moteur au moment du démarrage et, en conséquence, la température ambiante qui intervient dans le refroidissement du moteur. Cette température du moteur au démarrage dépend de son refroidissement depuis l'arrêt précédent, c'est-à-dire de son état thermique d'alors, de la masse et de la forme de son carter et de la température ambiante ;
- la longueur du déplacement lui-même (dans certains cas le temps) car s'il est trop court, on ne consommera pas toute la surconsommation à laquelle on pourrait s'attendre.

Les effets de ces paramètres sur la surconsommation ne sont pas indépendants les uns des autres et il est difficile de les isoler parfaitement.

2.2 - Etude expérimentale

Il s'agit d'une étude de DELSEY, BAC et VIDON (1980) réalisée sur banc à rouleaux et mettant en oeuvre des cycles Europe répétitifs. Les principales caractéristiques des essais sont les suivantes :

- le véhicule utilisé est le plus souvent (!) une Renault 12 TL bien réglée (véhicule de 1 300 cm³ représentatif du parc français à cette époque) ;
- chaque essai compte 16 cycles successifs, ce qui équivaut à une distance parcourue de $16 \times 1,013 = 16,208$ km ;
- les essais sont effectués à des températures ambiantes comprises entre 3 et 25°C, puis regroupées en quatre groupes: 3-4°C, 8-9°C, 11-15°C, 20-25°C ;
- le starter est utilisé au début de chaque essai : moins de 10 secondes par une température ambiante de 20°C et au moins 30 secondes par une température de 3-4°C.

Il est regrettable que n'apparaissent pas dans l'ouvrage de référence d'autres renseignements tels que le nombre total d'essais effectués, le nombre d'essais effectués pour chaque plage de température, l'identité du ou des conducteurs, l'autre ou les autres voitures utilisées.

Les conclusions les plus intéressantes de l'étude sont les suivantes :

- si le coût énergétique du "tour de clef" est de l'ordre de quelques cm³, par contre celui de la période de "pré-chauffage du moteur" à l'arrêt (dépendant du conducteur et de la température ambiante) peut varier de 25 à 100 cm³ ;
- dès que le véhicule parcourt 1 km, il existe une surconsommation de l'ordre de 0,2 à 0,3 l selon la température ambiante. Tout allongement du trajet, à température constante, se traduit par une augmentation de 10 à 20 % de cette surconsommation absolue ;

- la surconsommation pendant les deux premiers kilomètres est très forte, surtout si la température ambiante est basse ;
- sur un trajet de 10 km, la consommation des 5 premiers kilomètres est plus élevée que celle des 5 derniers :
 - . d'environ 45 % si la température ambiante est de 20-25°C,
 - . d'environ 70 % si la température ambiante est de 3-4°C ;
- enfin des abaques fournissent pour quatre plages de température ambiante l'évolution de la surconsommation en fonction de la distance parcourue lors du déplacement.

3 - LES FACTEURS AYANT UNE INCIDENCE SUR LA CONSOMMATION DE CARBURANT EN MILIEU URBAIN

On a vu dans les deux sous-sections précédentes que les formules de consommation moteur chaud ainsi que les mesures de surconsommation due au démarrage à froid intégraient un certain nombre de caractéristiques du véhicule et de son déplacement. D'autres facteurs peuvent néanmoins intervenir dans la consommation globale des automobiles, sans pour autant que l'on sache toujours en évaluer l'influence.

3.1 - Comment prendre en compte ces facteurs ?

L'ensemble des études ou des recherches qui visent à mesurer les effets de ces facteurs sur la consommation de carburant s'inspirent de la logique suivante :

- les consommations de carburant des automobiles en conditions de circulation réelle sont encore mal connues ;
- par rapport aux deux types de résultats suivants :
 - . ceux obtenus à partir de mesures faites sur banc à rouleaux,
 - . ceux obtenus à partir de mesures faites en condition de circulation réelle avec des véhicules instrumentés,il existe de très nombreux facteurs de surconsommation (ou sous-consommation) ;
- il est par conséquent nécessaire d'estimer les effets de ces facteurs sur les consommations réelles de véhicules de série.

Comme nous l'avons vu, la modélisation de la consommation de carburant des automobiles en milieu urbain s'effectue à partir de formules de type $CMC = f(\text{durée, longueur})$ et $\Delta C = g(\text{longueur, température ambiante})$, qui ont été calées au moyen d'ajustements statistiques sur des données résultant soit de simulations sur banc à rouleaux, soit d'expérimentations en situation réelle. La prise en compte des divers facteurs influençant la consommation

présente alors deux difficultés.

Le premier problème est de savoir quelles étaient pour chaque facteur les conditions de l'expérimentation utilisée lors du calage du modèle. Si elles n'ont pas permis de neutraliser ses effets, trois questions se posent alors :

- comment se situe le ou les véhicules expérimentaux par rapport à une situation de référence pour ce facteur ?
- connaît-on l'influence exacte du facteur sur la consommation de carburant ? (ex : pourcentage de surconsommation entraîné par un véhicule mal réglé par rapport à un véhicule bien réglé),
- connaît-on la distribution réelle du phénomène lié au facteur considéré, soit sur une population urbaine donnée, soit sur un parc de véhicules donnés ? (ex : % de véhicules mal réglés au sein du parc).

Le second problème touche lui à la combinaison des effets des différents facteurs. Supposons que le modèle retenu conduise à la nécessité de prendre en compte plusieurs facteurs additionnels, tels que le taux de mauvais réglage des moteurs et le taux de conducteurs ayant une conduite nerveuse. Ces facteurs se cumulent donc, pour autant leurs effets sont-ils indépendants et se multiplient-ils ? La question est d'autant plus délicate, qu'aucune étude ne semble avoir abordé ce problème. De fait, l'ensemble des études mesurent les effets de ces facteurs à partir de situations de référence, qui peuvent être des cycles Europe, des essais à vitesse stabilisée ou des expérimentations en situation réelle, dans lesquelles un certain nombre de facteurs sont neutralisés (on peut du reste ignorer lesquels). On voit par conséquent que les valeurs annoncées dans telle étude relative à tel type d'effet ne pourront pas toujours être appliquées de manière systématique.

La prise en compte des effets des facteurs ayant une incidence sur la consommation de carburant des automobiles peut alors s'effectuer en quatre étapes :

1. Choix des formules de consommation moteur chaud et de surconsommation due au démarrage à froid. Examen des conditions d'expérimentation.
2. Listage des facteurs qui peuvent avoir des effets sur la consommation globale. Repérage des facteurs pris en compte ou surtout non pris en compte lors des expérimentations.
3. Pour chaque facteur non pris en compte lors des expérimentations :
 - connaît-on sa distribution lors de l'expérimentation ?
 - connaît-on ses effets réels ?
 - connaît-on sa distribution statistique réelle ?
4. Si oui, après considérations sur les effets cumulés, choix des fourchettes de pourcentages représentant les effets des facteurs non pris en compte. Si non, abandon du facteur.

3.2 - Typologie des facteurs

L'OCDE a publié en 1982 un ouvrage sur les consommations énergétiques faisant le point des études menées dans ce domaine par les pays membres.

Trois familles de facteurs sont mises en évidence :

- utilisation et entretien des véhicules,
- infrastructure,
- comportement du conducteur et régulation du trafic.

Le tableau suivant reprend cette typologie et présente les résultats marquants des études recensées par l'OCDE. Quelques compléments ont été tirés de DELSEY, BAC et VIDON (1980), MERLIN (1977) et ROUMEGOUX (1979).

NATURE DU FACTEUR	CONDITIONS D'EXPERIMENTATION	INCIDENCE SUR LA CONSOMMATION DE CARBURANT
A - UTILISATION ET ENTRETIEN DES VEHICULES		
1. <u>Dispersion dans la fabrication</u>	Cyclo Europe	+ 4 à 5 % de surconsommation en conditions réelles par rapport au cycle Europe.
2. <u>Usure du moteur et du véhicule</u>	?	Peu de variation avec l'âge pour un véhicule bien entretenu ; pour les autres, aucune mesure.
3. <u>Mauvais entretien</u>		
31. mauvais réglage (décalage allumage; carburateur, encrassement filtre; tension courroie)	conditions réelles (Danemark)	Le réglage de l'ensemble des véhicules mal réglés du parc conduirait à une économie de 2,4 % sur une année.
32. parallélisme des roues	cycle urbain (Etats Unis) conditions réelles (Etats Unis)	Des différences de 2 mm dans le parallélisme entraînent des surconsommations de 3 %. Le défaut de parallélisme conduit à une surconsommation de 4 % limitée à 10 % des véhicules du parc.
33. taille de roue et type de pneumatique	?	Economie d'énergie avec la largeur de roue et la carcasse radiale.
34. gonflage des pneumatiques	? (Etats-Unis)	Un gonflage correct des pneumatiques des véhicules de l'ensemble du parc conduirait à une économie globale de 2,2 %.
35. réglage des freins	? (Etats-Unis)	Economies à attendre d'un réglage optimal des freins à disque ou à tambour.
36. lubrifiants	? (Etats-Unis)	Avec les nouvelles huiles pour moteur, des économies de l'ordre de 2 à 4 % à attendre par rapport à des huiles normales.
4. <u>Charge des véhicules</u>		
41. passagers	? (en ville)	Pour un véhicule de taille moyenne, augmentation de la consommation d'environ 4 % par passager moyen.
42. galerie de toit	essais à vitesse stabilisée (France)	A une vitesse de 90 km/h, la galerie vide provoque une surconsommation de 8 % et la galerie pleine de 21 %.

5. Utilisation des auxiliaires et accessoires

51. tous auxiliaires confondus

? (Europe)

Sur des parcours nocturnes, 5 % de surconsommation au printemps et en automne et 9 % en hiver.

52. phares

? (Europe)

0,6 à 0,8 l/100 km de surconsommation sur des véhicules courants.

6. Conditions climatiques

61. température ambiante

Cycle Europe (France)

- Consommation moteur chaud : 0,1 à 0,2 % de surconsommation par degré Celsius pour toute diminution de la température ambiante entre 20-25°C et 7-8°C ; si la température ambiante est comprise entre 6°C et 0°C, la surconsommation sera de 0,5 % par °C.
- Surconsommation due aux démarrages moteur froid : l'influence de la température ambiante a été présentée précédemment (§ 2.2).

B - INFRASTRUCTURE

1. Qualité du revêtement des chaussées

essais à vitesse stabilisée

Surconsommation sensible à vitesse élevée.

2. Sinuosité de la route

circulation routière (France)

Effet probablement négligeable en milieu urbain.

3. Régularité des vitesses de croisière

circulation routière (Grande Bretagne, France)

En milieu urbain, l'impossibilité de circuler à des vitesses constantes, entraîne des surconsommations non négligeables (cf. infra C).

4. Effet de pente

circulation routière (France)

Surconsommation d'environ 0,9 l/100 km par % de pente moyenne. Pour certaines villes la surconsommation serait donc importante.

C - COMPORTEMENT DU CONDUCTEUR ET REGULATION DU TRAFIC

1. Style de conduite

essais sur piste (France)

Dispersion des résultats de consommation
- 9 % pour un même conducteur
- 29 % entre différents conducteurs.

11. vitesse de conduite et défauts d'anticipation

?

A vitesses moyennes égales et entre comportements de conduite extrêmes : 40 % de différence entre les consommations.

12. utilisation de la boîte de vitesse

?

A vitesses moyennes égales, écarts de 20 % de la consommation entre différents conducteurs (attention : facteur fortement corrélé au précédent).

2. Régulation du trafic

circulation urbaine (Canada et Grande Bretagne)

Les systèmes de régulation les plus favorables permettraient de 1 à 4 % d'économie. (attention : les coefficients a et b du modèle CMC = aL + bT tiennent déjà compte des conditions de circulation).

II - LES TRANSPORTS COLLECTIFS

Quatre types de transport collectif urbain sont utilisés dans l'agglomération lyonnaise : taxi, autobus, trolleybus et métro. Examinons-les successivement. Si pour les modèles nous présenterons tous ceux que nous avons rencontré, nous nous limiterons en matière de consommations spécifiques et unitaires aux seules valeurs relatives à l'agglomération lyonnaise.

1 - LES TAXIS

Ils ont donné lieu à peu d'études sous l'angle énergétique. A. FRYBOURG (1979) propose quelques valeurs de consommations unitaires et spécifiques fournies par le Syndicat des Taxis Parisiens mais rien n'existe en ce qui concerne l'agglomération lyonnaise. Nous ne nous intéresserons pas plus à ce mode dont l'usage est d'ailleurs très faible.

2 - LES AUTOBUS

Différents véhicules sont présents sur le réseau lyonnais et leurs consommations spécifiques sont suivies par la société concessionnaire T.C.L. Parallèlement, des tentatives de modélisation ont eu lieu, notamment à la RATP et à l'IRT.

2.1 - Consommations spécifiques et unitaires

Pour 1978, TCL a estimé la consommation de ses autobus à 40,6 litres de gazole aux 100 kilomètres (cité dans FRYBOURG, 1979), soit 3,7 gep par place-kilomètre offerte (gep/pko). En évaluant le coefficient de remplissage à 0,18, on arrive ainsi à une consommation unitaire moyenne de 21,0 gep/pkt. Les mêmes sources précisent que ces indicateurs peuvent différer sensiblement d'un modèle d'autobus à un autre : en termes de gep/pko, la consommation varie entre 3,3 et 3,9.

Dans un article de 1979, J.P. MICHELET propose une valeur légèrement plus faible mais cependant cohérente pour la consommation unitaire rapportée au trafic. Il la situe à 19,1 gep/pkt en

moyenne journalière, les consommations en heures creuses et heures de pointe lui étant respectivement inférieure et supérieure de 25 %.

2.2 - Les modèles disponibles

La modélisation s'est jusqu'ici beaucoup plus portée sur les automobiles que sur les autobus. Ainsi il n'existe pas, en ce qui concerne les essais, de procédure normalisée analogue au cycle Europe utilisé pour les véhicules légers.

Deux familles de modèle sont actuellement utilisées en France : les modèles issus de simulation (modèles théoriques) et ceux provenant d'essais sur piste ou en conditions réelles (modèles empiriques). Sauf indication contraire, les travaux indiqués par la suite sont issus d'un rapport de J.P. ROUMEGOUX de 1981 auquel on se reportera pour de plus amples précisions.

2.2.1 - Les modèles théoriques

La consommation d'énergie est étudiée à partir d'une simulation sur ordinateur du comportement du moteur. Un cycle de marche est défini pour le véhicule dont on connaît par ailleurs les caractéristiques physiques. En se donnant le profil géométrique du parcours et la loi de remplissage du bus, il est alors possible de connaître à chaque instant la consommation instantanée du véhicule.

R.V.I. dispose ainsi du modèle SIMAVERO, conçu pour des poids lourds mais adapté aux autobus urbains. Une comparaison des résultats de la simulation avec des essais en circulation a montré l'excellente qualité des résultats obtenus. Mais le programme nécessite des paramètres jamais saisis dans les enquêtes de mobilité et difficilement reconstituables : la longueur entre les arrêts, la durée moyenne de ceux-ci, le remplissage moyen.

J.P. ROUMEGOUX propose une série de modèles valables pour l'agglomération lyonnaise. Comme SIMAVERO, ils exigent toutefois des paramètres liés à la marche du véhicule (temps d'arrêt, fréquence d'arrêt, vitesse de roulage, ...) et sont donc passibles du même handicap.

Enfin, l'IRT-CERNE a pu mettre en relation la vitesse moyenne et la consommation. Pour un autobus PR 100 chargé à 75 %, la consommation en litres aux cent kilomètres serait ainsi égale à $28 + 339/V$, la vitesse V étant en kilomètres-heure.

2.2.2 - Les modèles empiriques

A partir de mesures effectuées en conditions réelles de circulation, la RATP évalue la consommation d'un autobus SC10 (en litres aux cent kilomètres) en fonction de sa vitesse moyenne (en kilomètres-heure) à partir de l'expression
$$\frac{14 V + 1230}{V + 20}$$
.

Cette formule est difficilement comparable avec celle proposée par l'IRT-CERNE, le type de véhicule et les conditions de circulation différant sensiblement.

Enfin, S. COHEN a pu mettre au point plusieurs modèles à l'occasion de stages d'initiation à la conduite rationnelle, effectués sur le réseau marseillais (COHEN, 1982). L'autobus est ici un PR 100 PA, que l'on retrouve, comme d'ailleurs le SC 10, sur le réseau lyonnais. Par rapport aux autres expériences (simulations ou essais), celle-ci présente la particularité d'avoir été effectuée avec un départ moteur chaud (l'écart entre moteur chaud et moteur froid étant estimé à 8 litres par 100 kilomètres). Le modèle le plus simple exprime la consommation (litres par 100 kilomètres) en fonction de la vitesse moyenne (kilomètres par heure) sous la forme $30,8 + 116/V$. Là encore, la comparaison avec les expressions précédentes est hasardeuse. Notons que le modèle peut être affiné en ayant recours à d'autres indicateurs, notamment le nombre de coups de ralentisseurs donnés par le chauffeur (nombre de décélérations et d'accélération), mais se pose alors le problème de leur reconstitution.

3 - LES TROLLEYBUS

Deux points peuvent expliquer le faible intérêt porté jusqu'ici aux trolleybus :

- ils sont bien moins utilisés que les autobus et tous les réseaux n'y recourent pas ;
- l'énergie qu'ils utilisent est électrique et n'est pas forcément d'origine pétrolière.

Nous n'avons ainsi découvert en ce qui les concerne qu'une évaluation de leur consommation unitaire (FRYBOURG, 1979). Celle-ci est très sensible au type de véhicule considéré mais, en moyenne pour le réseau lyonnais, elle est estimée pour 1978 à 6,4 gep/pko. Le coefficient de remplissage des véhicules n'étant pas fourni, il est impossible de la rapporter au trafic (gep/pkt).

Si nous nous intéressons non plus aux seuls trolleybus mais à l'ensemble du réseau de surface (autobus et trolleybus), nous pouvons disposer, pour le réseau de Lyon, des consommations unitaires

moyennes pour deux années récentes (CETE de LYON, 1982). De 1977 à 1979, elles passeraient ainsi de 4,05 gep/pko à 4,27 gep/pko. Ici aussi, le coefficient de remplissage moyen n'est pas connu. On peut toutefois penser que le chiffre de 0,18 cité par A. FRYBOURG pour les seuls autobus n'est pas sensiblement modifié par la péréquation des deux modes de surface.

4 - LE METRO

Nous retrouvons pour le métro les deux références utilisés pour les trolleybus. Bien que la source soit commune (TCL), les résultats sont assez dissemblables (tableau 2.3).

TABLEAU 2.3 : Consommations unitaires du métro de Lyon (gep/pko)

SOURCE		A. FRYBOURG 1979	CETE DE LYON 1982
Lignes A et B	énergie de traction	6,7	6,07
	énergie des auxiliaires		3,39
			9,46
Ligne C	énergie de traction	18,2	14,05
	énergie des auxiliaires		5,20
			19,26
Ensemble	énergie de traction		6,25
	énergie des auxiliaires		3,43
			9,68

Il semble difficile de ne considérer que l'énergie de traction pour définir la consommation unitaire puisque l'énergie des auxiliaires (utilisée dans les ateliers et en station) contribue directement au fonctionnement du mode "métro". Selon le rapport du CETE de Lyon, elle représente, les trois lignes confondues, 35 % de l'énergie consommée, sa part étant toutefois plus faible (27 %) pour la seule ligne C (profil plus pentu et nombre de stations plus faible). En plus de consommations unitaires rapportées à l'offre, A. FRYBOURG propose une évaluation des coefficients de remplissage : 0,164 pour les lignes A et B et 0,259 pour la ligne C. Les consom-

mations unitaires rapportées au trafic sont alors de 41,0 gep/pkt pour les lignes A et B et de 70,4 gep/pkt pour la ligne C, soit respectivement 2 et 3,5 fois plus que pour les autobus.

Nous n'avons pas rencontré de modulation entre heures de pointe et heures creuses.

III - LES DEUX-ROUES

La modélisation de la consommation des deux-roues à moteur est inexistante et peu d'informations existent sur leurs consommations unitaires ; en particulier elles ne sont pas connues pour l'agglomération lyonnaise. Nous allons toutefois reprendre ici les valeurs moyennes fournies par A. FRYBOURG (1979) en suivant la décomposition fondée sur la cylindrée des véhicules.

Les cyclomoteurs ont une cylindrée inférieure à 50 cm³. Suivant les marques, la consommation unitaire rapportée au trafic se situe entre 9,1 et 17,5 gep/pkt (le conducteur est généralement seul sur le véhicule).

Si la cylindrée est comprise entre 50 et 125 cm³, le véhicule est un vélomoteur et offre deux places. Le nombre moyen de personnes transportées est mal connu mais peut cependant être estimé à 1,1 personnes. La consommation dépend fortement du type de moteur utilisé : les moteurs à deux temps (60 % du parc) consomment 28,6 gep/pkt alors que les moteurs à quatre temps (40 % du parc) sont plus économes, leur consommation s'élevant à 23,8 gep/pkt.

Enfin, les motocyclettes, avec une cylindrée supérieure à 125 cm³, constituent le haut de gamme (capacité deux personnes). Si leur consommation moyenne n'est pas connue, on sait toutefois qu'elle est extrêmement sensible au style de conduite et se situe dans les cas les plus défavorables entre 8 et 10 litres de super aux 100 kilomètres. En faisant l'hypothèse d'un taux d'occupation de 1,1, on peut penser que la consommation unitaire rapportée au trafic est comprise dans les cas les plus défavorables entre 54 et 68 gep/pkt.

Plus encore que celles des transports collectifs, les consommations des deux-roues sont à considérer avec précaution.

48



DEUXIEME PARTIE

Il s'agit maintenant de pouvoir affecter à chaque déplacement une distance et une consommation les plus proches possibles des distance et consommation réelles.

Des méthodes simples existent pour reconstituer les distances de déplacement mais leurs limites sont connues, notamment vis-à-vis des plus faibles parcours. Il nous faut donc définir une méthode de reconstitution plus fiable. Ce sera l'objet du chapitre III.

Une fois chaque déplacement muni d'une distance, il suffit alors de lui appliquer un modèle pour déterminer la consommation correspondante. Mais quel modèle ? L'examen de la littérature a montré que, suivant les modes, on passait d'une grande variété de modèles à une quasi-pénurie, aucun d'ailleurs paraissant parfaitement adapté à nos besoins. Le chapitre IV sera l'occasion d'élaborer la batterie de modèles qui nous est indispensable.

So

CHAPITRE III

RECONSTITUTION DES DISTANCES DE DEPLACEMENT

La méconnaissance de la distance réelle de chaque déplacement recensé lors de l'enquête nous impose de recourir à une méthode de reconstitution de cette distance. Si, de toute évidence, la valeur obtenue ne saurait être la valeur réelle, il convient toutefois de tenter de l'évaluer le plus exactement possible. Or le réalisme de cette reconstitution est directement fonction du réalisme de la formalisation de l'espace dans lequel s'effectuent les déplacements.

Une réflexion sur les différentes approches mathématiques de la notion de distance et sur les hypothèses de représentation de l'espace dont elles découlent va nous permettre d'élaborer une méthode de reconstitution. Cette méthode sera ensuite utilisée sur les déplacements dont nous disposons. Enfin, les résultats obtenus seront comparés à ceux issus d'autres méthodes plus traditionnelles.

I - CHOIX D'UNE METHODE DE RECONSTITUTION

Les mathématiciens donnent un sens très précis à la notion de distance en l'associant à une certaine forme de représentation de l'espace (ensemble de points). D'autres conceptualisations de l'espace existent qui, si elles ne permettent pas de définir une telle distance, autorisent une mesure de la non-coïncidence, de l'écart entre deux points. Afin de délimiter les méthodes potentielles, il faut donc recenser ces différentes représentations en mesurant avantages et inconvénients. Il sera alors possible de se donner la méthode optimale (par rapport à notre objectif) et d'en connaître les limites.

1 - LES METHODES DISPONIBLES

1.1 - Approches mathématiques de la notion de distance

1.1.1 - Les espaces métriques

Un ensemble de points E qui a été muni d'une structure spatiale s'appelle espace topologique. Cette structure spatiale, qui peut prendre de multiples formes, traduit les phénomènes ayant lieu au voisinage de chacun de ces points. Les espaces topologiques peuvent être plus ou moins structurés. Sur les espaces les plus structurés, et les plus intéressants pour nous, il est possible de définir une fonction distance d ; on se trouve alors en présence d'espaces métriques. L'application d fait correspondre à tout couple (x,y) de E^2 un nombre d_{xy} de R^+ vérifiant $\forall (x,y,z) \in E^3$:

$$d_{xy} = 0 \iff x = y \quad (1) \text{ propriété de séparation}$$

$$d_{xy} = d_{yx} \quad (2) \text{ propriété de symétrie}$$

$$d_{xy} \leq d_{xy} + d_{yz} \quad (3) \text{ inégalité triangulaire}$$

La plupart des métriques utilisées en économie spatiale appartiennent à la famille des métriques de MINKOWSKI. Elles peuvent se mettre sous la forme $d_{xy} = [(x_1 - y_1)^p + (x_2 - y_2)^p]^{1/p}$ pour un espace de dimension 2 ($p \geq 1$).

La distance euclidienne traditionnelle, plus connue sous le nom de distance à vol d'oiseau, correspond à $p = 2$, la distance rectilinéaire (parfois appelée distance de Manhattan) à $p = 1$. En moyenne, la distance rectilinéaire est égale à 1,27 fois la distance euclidienne. Les autres métriques de MINKOWSKI sont moins employées, bien que, selon LUNDBERG et EKMAN (cités dans MULLER, 1979), la perception subjective des

distances géographiques correspond à une distance de MINKOWSKI de paramètre environ égal à 3.

1.1.2 - La théorie des graphes

Une autre approche revient à considérer l'ensemble E comme muni d'une application multivoque Γ de E (Γ associe donc à tout élément de E zéro, un ou plusieurs éléments de E) : le couple (E, Γ) est alors appelé graphe. Les éléments de E sont les sommets du graphe entre lesquels Γ trace des arcs. Un chemin est une succession d'arcs adjacents permettant de passer d'un sommet à un autre. Enfin, on peut associer à chaque arc a un nombre $l(a)$ appelé "longueur" de l'arc a . Si pour tout couple (a_1, a_2) de sommets, il existe au moins un chemin allant de a_1 à a_2 et un chemin de a_2 à a_1 , le graphe est fortement connexe. On peut alors considérer que la longueur du plus court chemin de a_1 à a_2 mesure la distance de a_1 à a_2 . Mais il ne s'agit plus d'une distance au sens défini plus haut car $d(a_1, a_2)$ peut être différent de $d(a_2, a_1)$.

1.2 - Pertinence des diverses approches

Les différentes distances (au sens usuel) présentées plus haut présupposent une certaine conception de l'espace. Lorsque l'on s'intéresse à des déplacements, l'usage de tel type de distance sera pertinent si la structure du réseau de transport s'adapte à cette conception.

La distance euclidienne renvoie à un espace homogène et continu :

- le réseau de transport existe en chaque point de l'espace ;
- on se déplace entre chaque couple de points (x, y) sur une ligne droite et tous les points du segment xy appartiennent donc à l'espace (hypothèse de convexité de l'espace) ;
- le réseau permet de se déplacer entre les deux points dans les deux sens.

Cette schématisation des réseaux réels de transport est presque caricaturale, mais cette distance est couramment utilisée, notamment lors de l'exploitation des enquêtes ménages. L'agglomération est divisée en zones (de plus en plus étendues à mesure que l'on s'éloigne du centre) et chaque zone est assimilée à son centroïde. La longueur d'un déplacement est alors la distance à vol d'oiseau entre les centroïdes des zones de départ et d'arrivée si elles sont distinctes, une distance conventionnelle sinon.

La distance rectilinéaire ne bénéficie pas de la même faveur

que la distance euclidienne. Fondée sur des hypothèses similaires, elle permet cependant une meilleure représentation de l'espace urbain, notamment pour des villes en forme de damier. En effet, sa valeur dépend du système d'axes orthonormés retenu pour la mesurer et celui-ci peut donc être déterminé en fonction de directions privilégiées existant sur le territoire. Même si les axes du réseau de transport sont orientés aléatoirement, la distance de Manhattan semble plus satisfaisante, en moyenne, que la distance euclidienne : certains géographes multiplient les distances vol d'oiseau par un coefficient correcteur de 1,3, coefficient égal à la valeur moyenne du rapport de la distance rectilinéaire à la distance euclidienne (citée dans DERYCKE, 1979). Enfin, l'hypothèse de convexité de l'espace devient moins rigide car un point x et un point y sont reliés par une infinité de chemins acceptables et non pas par une unique ligne droite. Il n'existe pas à notre connaissance d'utilisation de cette méthode pour la détermination des distances de déplacement. Pourtant sa mise en oeuvre n'est guère plus difficile que celle de la distance euclidienne et une enquête réalisée avec un carroyage fin du territoire s'y prêterait très bien.

Vis-à-vis de problèmes de transport, toutes les métriques présentent au moins un défaut majeur lié à la propriété de symétrie. Celle-ci implique en effet que si le réseau de transport admet une liaison de x à y , alors cette liaison peut également être utilisée pour aller de y à x . L'existence de sens uniques dans la totalité des agglomérations va à l'encontre de cette hypothèse, l'aller pouvant, en termes de distance, être sensiblement différent du retour.

Ces hypothèses peuvent être levées si l'on considère l'espace comme un collection de points distincts reliés entre eux, chaque liaison permettant d'aller d'un point a_1 à un point a_2 (sans que la liaison inverse existe nécessairement). L'espace n'a plus besoin d'être continu en tout point mais seulement le long des axes de transport ; deux points peuvent être reliés par zéro, un ou plusieurs chemins de longueurs différentes. La théorie des graphes peut s'appliquer parfaitement à une telle formalisation, le réseau d'infrastructures de transport étant représenté par les axes du graphe. A chaque arc, on peut associer la longueur géographique exacte de la portion de réseau qu'il représente.

La pertinence du recours à la théorie des graphes dépend ainsi uniquement du nombre de sommets et d'arcs considérés dans le graphe associé à l'espace urbain. Notamment il est possible d'utiliser un graphe distinct pour chaque mode, mieux adapté à ses spécificités (sens uniques, couloirs réservés pour les bus,...)

1.3 - Une grande variété de méthodes

Le détour par quelques réflexions mathématiques a montré qu'il existait une grande variété de formalisations de la notion de distance. Chacune, au prix d'hypothèses plus ou moins réductrices, est théoriquement susceptible de fournir une méthode de reconstitution des

distances. Pratiquement, la qualité des informations enregistrées lors de l'enquête va limiter la palette des choix potentiels.

L'inscription du déplacement dans l'espace géographique est spécifiée par deux composantes : d'une part l'origine et la destination, d'autre part l'itinéraire emprunté. L'un comme l'autre peut être ou non connu. Le tableau 3.1 montre alors dans chaque cas quelles sont les méthodes disponibles.

TABLEAU 3.1 : Méthodes de calcul des distances de déplacement selon la qualité de l'information disponible.

Itinéraire	Origine et destination	
	non ou mal connues	connues
mal connu ou inconnu	1 - zonage, métrique euclidienne 2 - zonage, métrique non euclidienne 3 - zonage, plus court chemin dans un graphe	1,2,3 4 - métrique euclidienne 5 - métrique non euclidienne 6 - plus court chemin dans un graphe
connu	sans objet	1,2,3,4,5,6 7 - longueur du chemin associé à l'itinéraire parcouru

Certaines sont couramment utilisées. Le CETUR emploie généralement lors du traitement des enquêtes ménages la méthode 1. Les modèles d'affectation d'une demande TC de la SEMALY (TERESE par exemple) reposent sur la méthode 3 (CETE de Lyon, SEMALY et IRMA, 1975), comme d'ailleurs la détermination de certains indicateurs d'accessibilité géographique.

Une méthode de reconstitution des distances semble échapper à ce cadre : le recours à une typologie des vitesses (utilisable pour des enquêtes de type mobilité puisque la durée est connue). Mais l'élaboration de cette typologie nécessite, à moins de recourir à une enquête en circulation réelle enregistrant distance et durée, un calage préalable

qui, de fait, amène à retenir une des méthodes présentées ci-dessus.

2 - LA METHODE DE RECONSTITUTION

Des sept méthodes définies dans le tableau 3.1, une peut déjà être éliminée au vu des renseignements saisis : la septième, la meilleure, puisqu'elle nécessite la connaissance exacte des itinéraires. De plus, un rapide examen des questionnaires montre que les adresses n'ont pas toujours été parfaitement saisies.

Nous allons tout d'abord procéder à une première partition du fichier (cf. figure 3.1). Certains déplacements ne sont pas internes à l'agglomération. Voulant étudier les consommations urbaines ils ne peuvent nous intéresser. Dans la suite, les seuls déplacements considérés seront ceux ayant origine et destination dans l'agglomération.

Plutôt que d'adopter systématiquement l'une des méthodes 1,2 ou 3 (méthode avec zonage), nous avons préféré partitionner à nouveau à ce stade le fichier étudié afin de pouvoir utiliser, lorsque cela était possible, les méthodes sans zonage. Nous obtenons ainsi deux sous-fichiers : le premier (sous-fichier "A") constitué de déplacements à origine et destination précises (si le déplacement est constitué de plusieurs trajets, ceci doit être vrai pour chacun d'entre eux) ; le second regroupant les autres déplacements (sous-fichier "B").

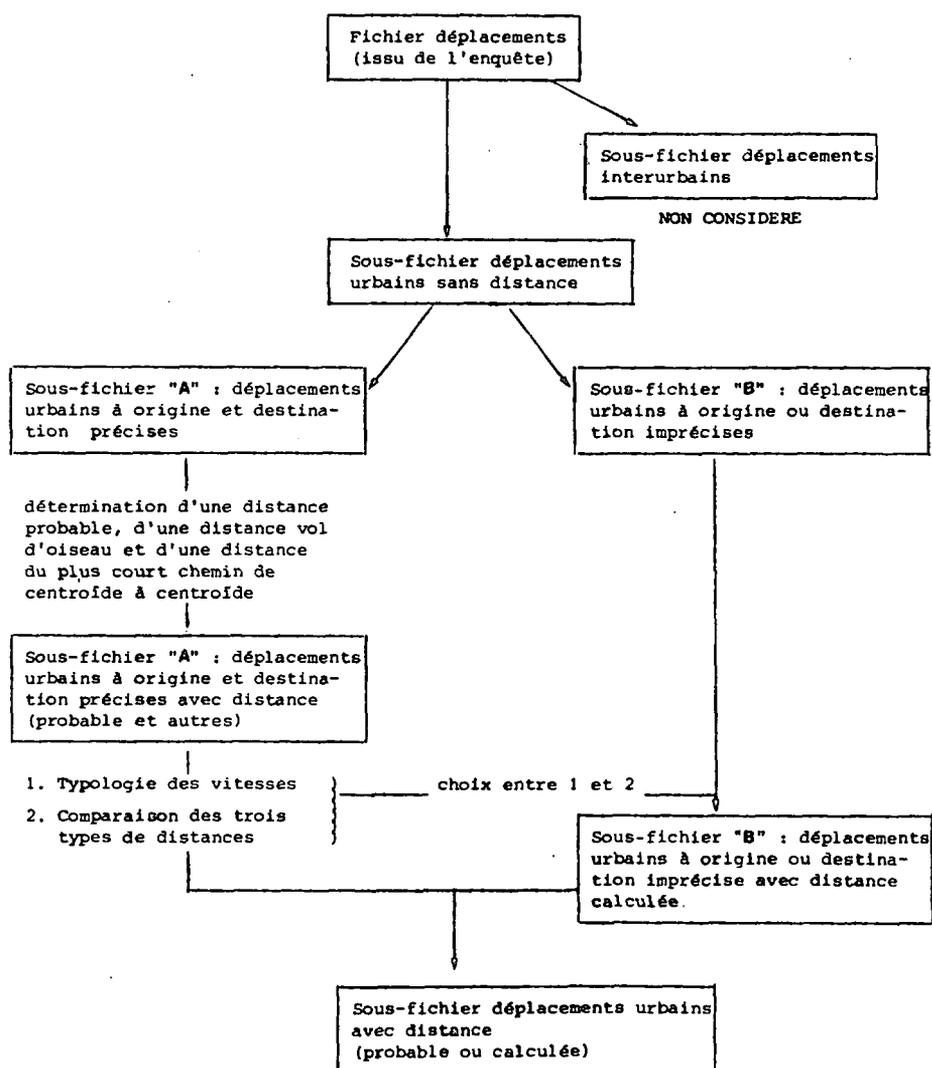
L'étape suivante est alors relative au premier sous-fichier. Tout d'abord, chaque déplacement va se voir attribuer une distance probable, calculée sur une carte à l'aide d'un curvimètre. Par distance probable, nous entendons longueur de l'itinéraire paraissant le plus adapté au mode utilisé, après regroupement des modes en cinq catégories : marche à pied (MAP), deux roues (2R), transports en commun (TC), voiture particulière (VP), complexe (utilisation des TC et de la VP). Cet itinéraire tient compte, lorsqu'il y a lieu, des sens uniques, du tracé des lignes de TC, des temps de parcours, ... Il est en fait très proche du plus court chemin dans le graphe associé à l'agglomération (méthode 6). De plus, on affecte à chaque déplacement, la distance à vol d'oiseau réelle (distance euclidienne entre l'origine et la destination exactes - méthode 4) et la distance du plus court chemin (utilisation d'une matrice de distances réalisée par la SEMALY) entre les centroïdes des zones d'arrivée et de départ lorsqu'elles sont distinctes (méthode 3). Le sous-fichier "A" ayant été enrichi de ces données, il est alors possible d'une part de comparer les trois distances retenues entre elles et d'autre part de mettre en évidence des typologies des vitesses pertinentes (vitesses porte à porte).

Ces résultats vont nous servir pour calculer des longueurs à affecter aux déplacements du second sous-fichier "B". Si la typologie des vitesses permet de mieux reconstituer la distance probable que le calage par rapport à la distance du plus court chemin entre centroïdes de zones (la distance euclidienne entre l'origine et la destination exactes n'est, par définition, pas disponible pour les déplacements du

sous-fichier "B"), on calcule alors la longueur parcourue à partir de la formule $\text{distance} = \text{vitesse} \times \text{temps}$. Dans le cas contraire, on utilise les calages mis en évidence. Chaque déplacement du sous-fichier "B" dispose ainsi à l'issue de cette étape d'une distance calculée.

Il ne reste plus qu'à réunir les deux sous-fichiers pour obtenir le fichier des déplacements urbains, caractérisés notamment par une distance parcourue (probable ou calculée).

FIGURE 3.1 Schéma de la méthode de reconstitution des distances de déplacement.



3 - LES LIMITES DE LA METHODE

La méthode retenue est susceptible de deux types de critiques : des critiques internes et des critiques externes, ces dernières liées au matériau sur lequel elle est utilisée.

3.1. - Critiques internes

Les premières se rapportent à la détermination de la distance probable et sont de deux ordres : théoriques et pratiques.

Ainsi que nous l'avons vu précédemment, la longueur du plus court chemin (même si c'est un chemin probable) dans le graphe associé est en fait une minoration de la distance réelle due à l'absence de prise en compte du choix par l'individu de son itinéraire. C'est à la fois une critique interne, car dépendant de la méthode, et externe, car commune à toutes les méthodes utilisables (avec les données existantes). Il faut également remarquer qu'un phénomène tel que la recherche d'une place de parking est totalement ignoré. Pourtant, il joue systématiquement dans le sens d'une augmentation des distances. Il est de plus probable que de tels biais grèvent plus lourdement les petites distances que les grandes. Enfin, les erreurs effectuées ici sont impossibles à quantifier.

Sur le plan pratique, l'utilisation d'un curvimètre ne permet pas de mesurer des distances parfaitement exactes. Le fond de plan utilisé joue également un grand rôle et peut entraîner des biais. Il est difficile de déterminer dans quel sens jouent ces différentes sources, mais, là encore, il est probable que les déplacements à courte distance sont les plus affectés. Très probablement, les distances probables sont globalement plus faibles que les réelles.

En ce qui concerne la VP, l'utilisation du curvimètre et d'un plan au 1/25 000 amène à affecter aux déplacements des distances inférieures, en moyenne, d'environ 5 % aux distances réelles (mesures effectuées sur une trentaine de déplacements dont la longueur avait été lue au compteur du véhicule - cf. annexe III). Sans bien sûr considérer pour autant que la différence distance réelle - distance probable est d'un ordre de grandeur analogue, on peut remarquer que la méthode des distances du plus court chemin entre centroïdes à partir d'un découpage de l'agglomération en 141 zones (découpage SEMALY) conduit à affecter aux déplacements effectués entre zones adjacentes des distances dont la moyenne est, en périphérie, de 4 300 mètres. L'erreur peut alors se chiffrer en centaines de %.

D'autres problèmes apparaissent lors du choix de la meilleure méthode de reconstitution. La méthode de comparaison des types de distances ne fournit aucun renseignement pour des déplacements internes à une zone.

La méthode de typologie des vitesses fournit des vitesses probables plus faibles, en moyenne, que les vitesses réelles (puisque vitesse = distance/temps, en supposant les temps de déplacement correctement déterminés). De plus, les deux méthodes présentent un caractère normatif qui ne peut qu'augmenter les incertitudes nées de la méconnaissance des itinéraires et nuire à la mise en évidence des déterminants individuels de la mobilité. L'univers subjectif de choix est purement et simplement assimilé à l'univers objectif de choix et les spécificités individuelles disparaissent donc.

Enfin, ce caractère normatif va se trouver encore amplifié lors de la détermination de la distance calculée. Celle-ci est, très probablement, plus faible, en moyenne, que la distance réelle mais l'enquête dont nous disposons ne permet ni de confirmer, ni d'infirmer le raisonnement tenu pour arriver à cette conclusion.

3.2 - Critiques externes

Tout d'abord, le fichier non redressé ne regroupe que 5 200 déplacements. Comme seule une minorité pourra donner lieu à la détermination d'une distance probable, les typologies retenues verront leur finesse limitée et les comparaisons entre types de distance porteront sur de faibles effectifs (rappelons que seuls les déplacements entre zones bénéficient d'une distance de centroïde à centroïde).

La critique externe la plus forte concerne les durées des activités et des déplacements. D'une part ces durées sont non pas des temps réels mais des temps perçus et l'on sait que les différences peuvent être sensibles. D'autre part toutes sont des multiples de cinq minutes. Là encore, le problème est plus aigu pour les déplacements de faible durée (5 minutes et moins) qui sont également les plus courts. Les vitesses calculées risquent ainsi d'être biaisées sans qu'il soit possible de déterminer dans quel sens. Enfin l'utilisation de la méthode de typologie des vitesses dans la dernière phase de reconstitution des distances se traduit alors par l'affectation aux déplacements concernés d'une distance multiple du rapport

$$d_{\min} = \text{vitesse issue de la typologie (en km/h)} \times 5/60$$

où d_{\min} correspond à un déplacement de cinq minutes. Les courbes [nombre de déplacement, distances] qui s'en déduisent présentent ainsi des paliers. On peut cependant présumer que les courbes réelles sont continues et les approximer par un lissage des courbes expérimentales. Une nouvelle source de biais est alors introduite mais elle est mineure par rapport au problème, plus fondamental, des itinéraires.

3.3 - Opérationnalité de la méthode retenue

Arrivé à ce stade, nous disposons d'une méthode de reconstitution des distances. Ses phases peuvent être interprétées comme la détermination d'un modèle de calcul des distances (étape d'analyse), le calage de ce modèle et enfin son utilisation (étape de prévision). Il convient donc de s'interroger sur son opérationnalité.

Selon BONNAFOUS (1973), l'opérationnalité repose sur la conjonction de trois propriétés nécessairement contradictoires : la cohérence, la pertinence et la mesurabilité.

Partant d'une enquête existante, nous avons été conduits à négliger la pertinence au profit de la mesurabilité. L'absence de prise en compte des itinéraires, l'utilisation, ensuite, de méthodes normatives afin de pouvoir affecter une distance à chaque déplacement ont pour conséquence de réduire l'adéquation du modèle au réel tel qu'il a été appréhendé. Ainsi la distinction entre univers objectif de choix et univers subjectif de choix est, en partie, vidée de son sens. La cohérence, tant interne que par rapport aux objectifs du modèle, nous semble quant à elle bien respectée.

Ne s'agissant ici que d'une étude exploratoire, nous nous satisfaisons de la méthode proposée et utiliserons les défauts relevés à la définition de types d'enquête plus adaptés à notre propos (chapitre VIII), essayant ainsi de trouver un autre équilibre entre cohérence, pertinence et mesurabilité, assurant mieux la seconde.

II - RECONSTITUTION DES DISTANCES DE DEPLACEMENT

L'utilisation de la méthode de reconstitution présentée dans les pages précédentes nous a conduit à isoler dans le fichier de base un sous-fichier regroupant les déplacements à origine et destination saisies précisément. Avant de présenter les résultats obtenus sur ce sous-fichier en matière de comparaisons de distances et de typologie des vitesses et d'indiquer les choix effectués pour l'affectation d'une distance aux autres déplacements, nous allons d'abord présenter les quelques caractéristiques générales de cette base de données.

1 - LE SOUS-FICHER

Le sous-fichier regroupe 30 % des déplacements urbains recensés lors des enquêtes (avant redressement). 1565 déplacements se sont ainsi vu affecter une distance probable.

1518 déplacements (97 %) sont du type origine-destination, 1 est une promenade et 46 sont des services passager (3%).

La marche à pied est utilisée 331 fois (21,1 %), les deux roues 72 fois (4,6 %), les transports en commun 322 fois (20,6 %). La voiture est le mode dominant, emprunté pour 811 déplacements (51,8 %). Enfin le mode complexe (utilisation dans un même déplacement de la voiture et des TC) a donné lieu à reconstitution dans 29 cas (1,9 %). Par rapport au fichier de base, une distance probable a été affectée à 18 % des déplacements à pied, à 28 % des déplacements deux roues, à 39 % des déplacements transport collectif, à 33 % des déplacements en voiture et à 85 % des déplacements en mode complexe. La marche est donc le mode le plus défavorisé par la reconstitution. Or c'est aussi le mode de prédilection des petites distances. Les plus petits déplacements (de quelques dizaines de mètres) sont en effet difficilement repérables et mesurables sur une carte.

213 déplacements (13,6 %) durent cinq minutes, 255 (16,3 %) durent dix minutes et 18 % seulement sont plus longue que la demi-heure.

Le tableau 3.2 montre la ventilation des déplacements entre les différents types de liaison, pour deux définitions du centre de l'agglomération. Dans les deux cas, chacun des quatre types est, en nombre, correctement représenté.

16,9 % des déplacements ont une distance probable strictement inférieure à 1 km, et 41,3 % une distance probable inférieure à 3 km.

TABLEAU 3.2 : Ventilation des déplacements à distance probable, selon le type de liaison, pour différentes définitions du Centre (%)

	Centre - Centre	Périphérie - Centre	Centre - Périphérie	Périphérie - Périphérie
Centre = Lyon	25,7	17,8	16,6	39,9
Centre = Lyon + Villeurbanne	29,0	18,2	16,9	35,9

La vitesse moyenne tous modes est de 15,3 km/h. Le rapport de la distance probable à la distance à vol d'oiseau (en abrégé DPDV) est, en moyenne, égal à 1,35. Le rapport de la distance probable à la distance de centroïde à centroïde (en abrégé DPDC) est légèrement plus faible, toujours en moyenne (DPDC = 1,27). Ce dernier ratio n'est calculé que sur 1 194 déplacements, à zones origine et destination distinctes.

Ainsi que l'on pouvait s'y attendre, les vitesses moyennes par mode sont nettement différentes (tableau 3.3). Mais les rapports DPDC et, moins clairement, DPDV sont également sensibles à une typologie des déplacements par mode. Aussi allons-nous étudier séparément chacun des modes retenus ici, en tenant compte, lorsque les effectifs le permettent, du type de déplacement considéré.

TABLEAU 3.3 : Vitesse moyenne, rapports DPDV et DPDC, selon le mode.

	MAP	2R	TC	VP	Complexe
Vitesse moyenne (km/h)	4,3	21,0	10,4	21,4	13,6
DPDV	1,32	1,34	1,38	1,36	1,35
DPDC	0,99	1,42	1,33	1,30	1,33

2 - ETUDE DES DISTANCES ET DES VITESSES DES DEPLACEMENTS DU SOUS-FICHER

La démarche a été identique pour chaque mode :

- l'étude des deux rapports DPDV et DPDC est basée sur une ventilation des déplacements en fonction du type de liaison.
- la recherche d'une typologie des vitesses moyennes repose sur l'analyse de l'influence d'une vingtaine de critères socio-économiques et spatiaux caractéristiques du déplacement et de l'individu l'effectuant. Nous n'avons retenu ici que celui fournissant les meilleurs résultats (analyse de variance).
- le choix de la grille de calcul appliquée aux déplacements à origine ou destination imprécise(s) peut alors être effectué.

2.1 - La marche à pied

Le rapport DPDV varie assez peu (tableau 3.4). Sa plus faible valeur au centre de l'agglomération peut s'expliquer par la plus forte densité du réseau d'infrastructure. Le rapport DPDC est par contre extrêmement sensible au type de liaison. Ce résultat n'a rien d'étonnant si l'on se rappelle que la distance moyenne entre zones contiguës est de 700 mètres au centre de l'agglomération et de 4 300 mètres en périphérie ! Or les déplacements à pied, tout au moins en périphérie, sont effectués dans leur très grande majorité soit à l'intérieur même d'une zone (cas éliminé ici), soit entre zones contiguës.

TABLEAU 3.4 : Rapports DPDV et DPDC pour les déplacements MAP, selon le type de liaison (Centre = Lyon).

	Centre - Centre	Périphérie - Centre	Centre - Périphérie	Périphérie - Périphérie
DPDV	1,27	s.o.	s.o.	1,36
DPDC	1,18	s.o.	s.o.	0,35

s.o. = sans objet.

Sur les 331 déplacements à pied à distance reconstituée, 307 sont de type origine-destination, 23 sont des services passager et un seul est une promenade.

Le tableau 3.5 montre une très nette influence du secteur dans lequel a lieu le déplacement origine-destination sur la vitesse moyenne à pied. C'est probablement l'effet de l'agrégation de divers facteurs (âge, motif, structure du réseau, ...) mais il n'a pas été possible de le mettre en évidence.

TABLEAU 3.5 : Vitesse moyenne MAP pour les déplacements origine-destination, selon le secteur (km/h)

	Lyon	Villeurbanne	Secteur Nord	Secteur Sud-Est	Secteur Nord-Ouest
Vitesse moyenne	3,9	2,1	6,2	4,0	3,4

La vitesse moyenne des déplacements de type service passager (3,0 km/h) est plus faible que celle des déplacements origine-destination (4,2 km/h). L'accompagnement concernant généralement des enfants en bas âge, ce résultat n'est guère étonnant. Vu la minceur de l'échantillon, aucune décomposition a été faite.

2.2 - Les deux roues

Nous n'avons pas comparé ici les différents types de distance, la décomposition de l'échantillon selon la liaison conduisant à des classes extrêmement réduites.

Les 72 déplacements sont de type origine-destination et la meilleure typologie des vitesses correspond à une partition suivant l'âge de l'individu (tableau 3.6).

TABLEAU 3.6 : Vitesse moyenne 2R, selon l'âge (km/h)

	10	14	16	18	25	30	40	50	60	65 et +
	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	14	16	18	25	30	40	50	60	65	+
Vitesse moyenne	12,4	16,5	17,4	19,3	31,4	49,4	28,9	11,2	17,4	24,1

La croissance de la vitesse moyenne jusque vers quarante ans s'explique par le passage progressif d'un usage exclusif du vélo à une forte utilisation des deux roues à moteur (en particulier motos). Deux points sont cependant à noter : les effectifs des cinq premières classes varient entre 7 et 15, ceux des cinq dernières entre 2 et 6 ; il est pour le moins regrettable de n'avoir pu séparer les différents types de deux roues...

2.3 Les transports collectifs

On retrouve dans le tableau 3.7 quelques tendances mises en évidence pour les déplacements pédestres.

Le rapport DPDV varie assez peu. Il est légèrement plus faible sur les liaisons radiales, à distance moyenne élevée.

Le rapport DPDC est, par contre, fortement lié au type de liaison. Il est particulièrement élevé en périphérie, là où l'offre TC est la plus mauvaise et oblige l'individu à des détours importants.

TABLEAU 3.7 : Rapport DPDV et DPDC pour les déplacements TC, selon le type de liaison (Centre = Lyon)

	Centre - Centre	Périphérie - Centre	Centre - Périphérie	Périphérie - Périphérie
DPDV	1,41	1,34	1,34	1,44
DPDC	1,32	1,25	1,26	1,57

En ce qui concerne les vitesses moyennes, la meilleure partition des 322 déplacements (tous de type origine-destination) est fournie par une ventilation selon le type de liaison.

TABLEAU 3.8 : Vitesse moyenne TC, selon le type de liaison (km/h)
(Centre = Lyon)

	Centre - Centre	Périphérie - Centre	Centre - Périphérie	Périphérie - Périphérie
Vitesse moyenne	6,8	13,0	12,2	11,7

La hiérarchie des types de liaison qui découle du tableau 3.8 nous semble intéressante, et peut reposer sur un arbitrage entre deux paramètres : d'une part la qualité de service perçue sous le seul angle des fréquences (temporelles) et d'autre part les conditions de circulation ainsi que le nombre moyen d'arrêts et leur plus ou moins grand éloignement. Il est en tout cas important de remarquer que les vitesses TC porte à porte (incluant donc les trajets terminaux à pied) sont particulièrement faibles en centre ville.

2.4 - La voiture particulière

DPDV, s'il prend des valeurs proches de celles rencontrées jusqu'ici pour les liaisons radiales et orthoradiales, est extrêmement élevé pour les liaisons internes au centre (tableau 3.9). L'existence d'un plan de circulation aux nombreux sens uniques n'est probablement pas étrangère à ce phénomène.

Enfin, DPDC confirme sa forte sensibilité au type de liaison. Il est faible sur les liaisons radiales (à distance moyenne importante) et élevé pour les autres types de liaison.

TABLEAU 3.9 : Rapports DPDV et DPDC des déplacements VP, selon le type de liaison (Centre = Lyon)

	Centre - Centre	Périphérie - Centre	Centre - Périphérie	Périphérie - Périphérie
DPDV	1,56	1,28	1,29	1,35
DPDC	1,51	1,19	1,17	1,40

La quasi-totalité des déplacements automobiles (97 %) est de type origine-destination.

La vitesse moyenne de ces déplacements est de 21,5 km/h, mais, ainsi que dans le cas des TC, la prise en compte du type de liaison permet d'affiner sensiblement le résultat. La meilleure typologie est fournie ici par l'identification du centre de l'agglomération avec les deux villes de Lyon et Villeurbanne (tableau 3.10).

TABLEAU 3.10 : Vitesse moyenne VP pour les déplacements OD, selon le type de liaison (km/h) (Centre = Lyon + Villeurbanne)

	Centre - Centre	Périphérie - Centre	Centre - Périphérie	Périphérie - Périphérie
Vitesse moyenne	12,1	25,9	26,1	20,4

Les conditions de circulation apparaissent ainsi nettement moins bonnes dans le centre de l'agglomération qu'en périphérie. Les liaisons radiales, par l'existence d'un certain nombre de grands axes, permettent des vitesses moyennes très élevées, sans que des problèmes liés aux pointes apparaissent clairement.

Les déplacements de type service passager ont une vitesse moyenne relativement faible (16,4 km/h) que la taille de l'échantillon (23) ne permet pas de mieux connaître.

2.5 - Le mode complexe

Les 29 déplacements en transport collectif et voiture particulière sont de type origine-destination. Leur vitesse moyenne est de 13,6 km/h, intermédiaire donc entre les vitesses VP et TC (mais plus proche de cette dernière). Ici encore, l'affinement qu'apporterait telle ou telle décomposition ne pourrait être qu'illusoire.

2.6 - Les grilles de calcul

Il est maintenant possible de choisir une grille de calcul permettant d'estimer la longueur des déplacements à origine ou destination imprécise(s).

Nous n'avons en fait que deux options possibles puisqu'en dépit des résultats relativement corrects qu'elle fournit, la distance à vol d'oiseau (qui est, rappelons-le, la distance exacte entre l'origine et la destination) n'est bien évidemment pas disponible pour les déplacements concernés.

La distance de centroïde à centroïde apparaît comme totalement inadéquate, dans un travail dont la problématique appelle une reconstitution fine des distances. Son choix ne pourrait que conduire à des aberrations. Il faut d'ailleurs remarquer que nous ne nous sommes attachés ici qu'aux seuls déplacements à zones d'origine et de destination distinctes : il resterait encore à résoudre le cas des déplacements intra-zones !

La meilleure solution nous semble donc le choix d'une typologie des vitesses. Cette méthode n'est bien évidemment pas sans inconvénient et nous en avons mentionné certains dans la section précédente : lissage du comportement des individus, problèmes liés à une enquête par pas de cinq minutes. Un autre problème est apparu à l'issue de la détermination des distances probables : peu de déplacements service passager et une seule promenade se sont vus affecter une distance probable. Si pour les services passager, les échantillons sont suffisants pour fournir des valeurs moyennes acceptables, ce n'est pas le cas des promenades. Postulant que leur vitesse moyenne est plus faible que celle des déplacements O-D, nous les confondrons, lorsque cela sera possible, avec les services-passager.

Le tableau 3.11 récapitule pour chaque mode les grilles retenues. Les typologies utilisées ont été présentées dans les pages précédentes, sauf en ce qui concerne les deux roues pour lesquels nous

avons préféré simplifier la partition effectuée selon l'âge : chaque classe dispose ainsi d'effectifs plus conséquents. Le tableau 3.12 présente les vitesses moyennes retenues pour ce mode.

TABLEAU 3.11 : Grilles de calcul, selon le mode et le type de déplacement

Mode Type de déplacement	Marche à pied	Deux roues	Transports collectifs	Voiture particulière	Complexe
Origine - destination	typologie basée sur le secteur géographique (tableau 3.5)	typologie basée sur les contraintes légales d'accès aux différents véhicules à moteur (tableau 3.12)	typologie basée sur le type de liaison avec Centre = Lyon (tableau 3.8)	typologie basée sur le type de liaison avec Centre = Lyon + Villeurbanne (tableau 3.10)	vitesse moyenne constante : 13,6 km/h
Promenade	assimilé à Service passager	assimilé à Origine - destination	sans objet	assimilé à Service passager	sans objet
Service passager	vitesse moyenne constante : 3 km/h	assimilé à Origine-destination	sans objet	vitesse moyenne constante : 16,4 km/h	sans objet

TABLEAU 3.12 : Vitesse moyenne 2R, selon l'âge : typologie simplifiée (km/h)

	10-14 ans	14-18 ans	+ de 18 ans
Vitesse moyenne	12,4	17,1	24,4

III - DISTANCES DE DEPLACEMENT ET VITESSES MOYENNES DANS L'AGGLOMERATION LYONNAISE

Il est intéressant pour terminer ce chapitre de tenter une comparaison entre les vitesses moyennes obtenues à l'aide de notre méthode de reconstitution et celles issues de méthodes plus traditionnelles. Notre référence sera ici l'enquête ménages effectuée à Lyon en 1976. Toute comparaison de ce type est difficile, la méthode d'enquête aussi bien que l'échantillonnage différant sensiblement. Un autre handicap s'ajoute ici : le décalage temporel. Mais la confrontation des vitesses moyennes peut révéler des écarts importants, conséquences de choix méthodologiques opposés. Nous présenterons tout d'abord une synthèse de l'étude des rapports entre les trois types de distance qui éclairera ensuite l'analyse des vitesses.

1 - LES TROIS TYPES DE DISTANCE

Le rapport de la distance probable à la distance à vol d'oiseau varie peu en fonction du type de liaison (tableau 3.13). Sa valeur légèrement plus faible pour les liaisons de type centre-périphérie s'explique à la fois par la structure du réseau d'infrastructures de transport à la tendance radiale prononcée et par la forte longueur moyenne des déplacements de ce type. Il est d'autre part remarquable de constater que la valeur moyenne sur l'agglomération (1,35) est très proche du rapport moyen de la distance rectilinéaire à la distance vol d'oiseau (en cas de distribution aléatoire des déplacements) soit 1,27. Une comparaison entre distance rectilinéaire et distance probable, qui n'a malheureusement pas pu être effectuée ici, présenterait donc un grand intérêt.

TABLEAU 3.13. : Rapports DPDV et DPDC selon le type de liaison
(Centre = Lyon)

	Centre - Centre	Périphérie - Centre	Périphérie - Périphérie	Ensemble
DPDV	1,36	1,30	1,36	1,35
DPDC	1,22	1,20	1,02	1,17

Le rapport de la distance probable à la distance de centroïde à centroïde est, par contre, très dépendant du type de liaison. On peut voir là un effet de la longueur moyenne de déplacement qui varie beaucoup entre les trois types de liaison mais aussi et surtout une conséquence des choix méthodologiques effectués pour la reconstitution des distances. De plus, les valeurs moyennes présentées ici cachent des disparités importantes entre les modes. La faible valeur en périphérie est ainsi due à deux phénomènes antagonistes qu'explique l'effet de frontière. Les déplacements à pied, ont lieu pour la plupart entre zones contigües et concernent des points proches de la frontière commune, alors que les déplacements effectués à l'aide des autres modes présentent, au contraire, une plus grande diversité. La distance entre centroïdes surestime donc les distances à pied et sous-estime les autres.

Le caractère illusoire des valeurs moyennes, en ce qui concerne le rapport DPDC, se retrouve dans le tableau 3.14.

TABLEAU 3.14. : Rapports DPDV et DPDC, selon le mode.

	MAP	2R	TC	VP
DPDV	1,30	1,35	1,39	1,39
DPDC	0,92	1,41	1,33	1,37

En effet, le bon résultat obtenu pour la marche à pied n'est que l'agrégation de données particulièrement médiocres qui, par exemple, conduisent en périphérie à multiplier par 3 (en moyenne) les distances parcourues. L'effet de frontière joue ici pleinement.

On retrouve en revanche, la bonne stabilité de DPDV. La plus forte flexibilité des itinéraires marche à pied par rapport à ceux effectués avec d'autres modes se traduit par une valeur du rapport légèrement plus faible en ce qui concerne ce mode.

Enfin, si distance à vol d'oiseau et distance entre centroïdes semblent très similaires pour les transports collectifs et la voiture, l'étude de leur sensibilité au type de liaison montre que ce n'est pas là encore qu'un effet d'agrégation : pour ces deux modes DPDC est plus faible que DPDV sur les liaisons radiales et plus élevé sur les liaisons internes au centre ou à la périphérie.

Que retenir de cette comparaison des distances ?

La distance à vol d'oiseau entre l'origine et la destination exactes du déplacement, si elle est plus faible en moyenne que la distance probable, semble cependant, de par la faible variabilité du rapport DPDV,

être un indicateur fiable permettant, notamment, des comparaisons globales entre modes.

La distance entre centroïdes est par contre difficilement utilisable. Sa dépendance très forte aussi bien du mode que du type de liaison ne peut que biaiser toute tentative d'analyse. De plus, elle est totalement inadéquate en ce qui concerne les faibles distances.

2 - VITESSES MOYENNES DE DEPLACEMENT

Les vitesses moyennes de déplacement (vitesses probables porte à porte) sont très dépendantes du type de liaison (tableau 3.15). Le rapport est en effet de un à deux entre la vitesse Centre-Centre et la vitesse Périphérie-Périphérie, et de un à trois entre les vitesses Centre-Centre et Centre-Périphérie. C'est d'abord l'effet de différences importantes au sein de la répartition modale (le rapport des vitesses est du même ordre que celui des pourcentages de déplacements en voiture). Toutefois la ventilation de ces moyennes selon les quatre modes principaux montrerait une forte différence, pour chacun des modes motorisés, entre les liaisons Centre-Centre, lentes, et les autres, beaucoup plus rapides. Les conditions de circulation semblent donc plus difficiles à Lyon que dans le reste de l'agglomération.

TABLEAU 3.15. : Vitesses moyennes de déplacement, selon le type de liaison (Centre= Lyon)

	Centre - Centre	Centre - Périphérie	Périphérie - Périphérie	Ensemble
Vitesses tous modes (km/h)	6,2	20,4	13,8	11,2

Si l'on observe maintenant les vitesses moyennes par mode (tableau 3.16), on constate qu'elles diffèrent très sensiblement de celles fournies par l'enquête-ménages. La comparaison de la distance probable et de la distance entre centroïdes nous a montré les limites de cette dernière et sa faible fiabilité. Les résultats obtenus alors ne peuvent cependant pas être appliqués directement ici. En effet, le découpage de l'agglomération utilisé dans l'enquête ménages ne coïncide pas exactement avec le notre ; de plus, les distances entre centroïdes y sont calculées à vol d'oiseau et non selon le plus court chemin. Les ordres de grandeur obtenus lors des comparaisons entre distances subsistent néanmoins et permettent

de comprendre, par exemple, la plus faible vitesse pédestre. La forte évolution des vitesses des transports collectifs et des automobiles entre les deux enquêtes s'explique essentiellement par ces apports méthodologiques mais certaines améliorations dans les conditions de circulation peuvent y jouer un rôle : restructuration du réseau TC, étalement des points de trafic....

TABLEAU 3.16. : Vitesses moyennes de déplacement, selon le mode, et comparaison avec l'enquête ménages Lyon 1976. (km/h)

	MAP	2R	TC	VP
Vitesses	3,8	21,4	9,0	18,8
Vitesses enquête ménages	4,4	9,9	6,3	11,4

L'écart entre les deux vitesses moyennes automobiles nous semble particulièrement significatif. La prise en compte de considérations énergétiques vient encore en conforter l'intérêt :

- s'intéressant aux déplacements urbains des véhicules dans une perspective de modélisation de leur consommation d'énergie, COHEN (1981) note que dans les agglomérations de province de plus de 100 000 habitants, la vitesse automobile moyenne est de 25 km/h (28 km/h en région parisienne). La valeur que nous obtenons est cohérente avec ce résultat puisqu'il s'agit d'une vitesse porte à porte, incluant les trajets terminaux à pied, donc nécessairement moins élevée que la vitesse réelle moyenne du véhicule qui est celle mesurée par COHEN. La valeur enquête ménages apparaît par contre beaucoup trop faible.
- la vitesse moyenne obtenue ici est très proche de la vitesse moyenne du cycle Europe (19 km/h). Or, les consommations spécifiques des véhicules particuliers sont calculées après que les véhicules ont parcouru un certain nombre de ces cycles. Les essais sur banc à rouleaux sont également bien souvent, une simulation de cycle Europe. La modélisation qui en découle présuppose alors une vitesse urbaine moyenne de 19 km/h que l'on retrouve pratiquement dans cette étude mais qui est fort éloignée de la vitesse moyenne enquête ménages.

74



CHAPITRE IV

LES MODELES DE CONSOMMATION

Après avoir affecté une distance à chaque déplacement urbain, il reste maintenant à déterminer les consommations énergétiques correspondantes. Le chapitre II a montré l'inégal développement de la modélisation entre les différents modes motorisés. Mais même en ce qui concerne le mieux loti (la voiture particulière) nous ne disposons pas, à l'issue de l'étude bibliographique, d'un modèle complet, directement opérationnel.

L'objet du présent chapitre sera donc d'élaborer, pour chaque mode motorisé, un modèle de consommation applicable à l'agglomération lyonnaise et susceptible d'être informatisé. Nous envisagerons successivement la voiture particulière, les transports collectifs et les deux roues. Enfin, nous présenterons la solution retenue pour les déplacements nécessitant à la fois l'usage de la voiture et des transports collectifs (le mode complexe des chapitres précédents). La dernière étape consistera à déterminer les règles d'affectation des consommations véhicules aux individus.

I - LES VEHICULES LEGERS

Le modèle complet élaboré ici s'articule autour de quatre éléments :

- les lois d'échauffement et de refroidissement du moteur, permettant de suivre son histoire thermique et donc de calculer la surconsommation
- le modèle de surconsommation due au démarrage à froid
- le modèle de consommation moteur chaud
- la prise en compte de certains facteurs influençant la consommation globale du véhicule.

Rappelons que nous ne tiendrons pas compte des véhicules diesel, les assimilant aux véhicules à essence, et que le modèle ne s'applique qu'aux seuls déplacements urbains.

Enfin, les données nécessitées par le modèle ne correspondant pas toujours exactement à celles disponibles dans l'enquête, nous définirons une palette de simulations atténuant cet inconvénient.

1 - LES LOIS D'ECHAUFFEMENT ET DE REFROIDISSEMENT DU MOTEUR

Nous nous appuyons ici essentiellement sur l'étude de DELSEY et alii (1980). Nous admettrons que les moteurs sont en général thermostatés pour une température d'équilibre T_E d'environ 90°C, et que cette dernière est indépendante de la température ambiante T_A .

1.1 - La loi d'échauffement

A la suite d'une étude théorique des phénomènes d'échange de chaleur, DELSEY propose comme loi d'échauffement d'un moteur en fonction du temps la formulation suivante :

$$T = T_E - (T_E - T_A) e^{-Kt}$$

avec T température du moteur à l'instant t ($t = 0$: démarrage)

T_E température d'équilibre du moteur

T_A température ambiante

K constante (dépendant du type de véhicule)

En fait cette formulation minore le terme dT/dt . Nous l'utiliserons malgré tout pour notre modèle en remplaçant cependant l'expression Kt par $K'L$, où L est la longueur déjà parcourue par le véhicule et K' une constante.

En substituant L à t , on émet l'hypothèse implicite que le véhicule s'est déplacé à vitesse constante tout de suite après son démarrage.

Pour calculer K' , nous nous sommes appuyés sur deux expérimentations qui donnent les valeurs successives de la température d'huile d'un moteur de véhicule moyen lors de cycles Europe répétitifs avec démarrage moteur froid:

Essai d'un constructeur français sur un véhicule moyen récent
(1 400 cm³)

$$\left. \begin{array}{l} T_E = 90^\circ\text{C} \\ T_A = 20^\circ\text{C} \\ T = 60^\circ\text{C pour } L = 3 \text{ km} \end{array} \right\} K' = 0,28$$

Essais cités par DELSEY (1980) sur R 12 TL (1 300 cm³)

$$\left. \begin{array}{l} T_E = 90^\circ\text{C} \\ T_A = 0^\circ\text{C} \\ T = 60^\circ\text{C pour } L = 10 \text{ km} \end{array} \right\} K' = 0,10$$

Malgré l'influence évidente de la température ambiante sur le terme exponentiel (l'abaissement de la température ambiante ralentit l'échauffement du moteur), nous n'en tiendrons pas compte pour modéliser la loi d'échauffement, du fait de l'absence de données suffisantes. Comme par ailleurs les enquêtes de mobilité à partir desquelles nous calculerons les consommations de carburant ont été effectuées à une période où la température ambiante moyenne se situait aux environs de 9-10°C, nous avons choisi de prendre pour K' , une valeur intermédiaire entre les deux précédentes, soit 0,20.

La formule définitive devient donc :

$$T = T_E - (T_E - T_A) e^{-0,2 L} = f(T_A, L)$$

avec $T_E = 90^\circ\text{C}$

T, T_A en °C ; L en km

Par la suite nous admettrons que le moteur est à sa température d'équilibre quand T atteint 85 °C, ce qui permet de calculer, en fonction de la température ambiante, la distance correspondante que nous appellerons distance de référence L_R . Celle-ci vérifie :

$$85 = 90 - (90 - T_A) e^{-0,2 L_R}$$

soit
$$L_R = 5 \text{ Log } \frac{90 - T_A}{5}$$

L_R en km ; T_A en °C

Si donc la longueur du déplacement est supérieure à L_R , le moteur est considéré comme étant à l'équilibre thermique.

1.2 - La loi de refroidissement

Un calcul analogue à celui mené par DELSEY pour l'échauffement permet d'écrire la loi de refroidissement du moteur sous la forme :

$$T = T_S + (T_E - T_S) e^{-KT}$$

T température du moteur

T_S température du lieu de stationnement

T_E température d'équilibre du moteur pour le déplacement précédent

K constante (dépendant du type de véhicule).

L'estimation de K s'effectue de la manière suivante. Soit t_R le temps nécessaire au refroidissement complet du moteur. On considère que ce dernier est atteint lorsque le terme exponentiel ne vaut plus que 5 %, soit

$$e^{-Kt_R} = 0,05$$

On a ainsi
$$K \approx \frac{3}{t_R}$$

et donc :
$$T = T_S + (T_E - T_S) e^{-3 \frac{t}{t_R}} = g(t, T_S)$$

T, T_S, T_E en °C ; t, t_R en heures

En suivant MAURIN (1982), nous adopterons pour t_R les valeurs suivantes (les temps sont en heures) :

- Véhicule garé dans un espace libre

$$\cdot \text{ si } T_S > 15^\circ\text{C} \quad t_R = 3$$

$$\cdot \text{ si } 0^\circ\text{C} < T_S < 15^\circ\text{C} \quad t_R = 2 + \frac{T_S}{15}$$

$$\cdot \text{ si } T_S < 0^\circ\text{C} \quad t_R = 2$$

- Véhicule garé dans un local à l'abri des conditions atmosphériques

$$\cdot \text{ si } T_S > 15^\circ\text{C} \quad t_R = 6$$

$$\cdot \text{ si } 0^\circ\text{C} < T < 15^\circ\text{C} \quad t_R = 4 + \frac{2 T_S}{15}$$

$$\cdot \text{ si } T_S < 0^\circ\text{C} \quad t_R = 4$$

1.3 - La mise en oeuvre des formules

On notera d'abord que les lois retenues sont indépendantes du type de véhicule. Mais, là encore, les données empiriques manquent pour espérer mettre au point un modèle plus fin.

1.3.1 - La loi d'échauffement

Posons

T_D température du moteur au démarrage

L_D longueur du déplacement effectué par le véhicule

T_A température ambiante

T_M température du moteur à l'issue du déplacement

T_D, T_A, T_M en $^\circ\text{C}$; L_D en km.

Trois cas peuvent se présenter :

$$- T_D = T_A$$

$$\cdot \text{ si } L_D \leq L_R$$

$$T_M = f(T_A, L_D)$$

$$\begin{aligned}
 & \cdot \text{ si } L_D > L_R \quad T_M = T_E \\
 - T_D > T_A & \\
 & \text{ Soit } L' \text{ tel que } T_D = f(T_A, L') \\
 & \cdot \text{ si } L_D + L' \leq L_R \quad T_M = f(T_A, L_D + L') \\
 & \cdot \text{ si } L_D + L' > L_R \quad T_M = T_E \\
 - T_D < T_A & \\
 & \text{ Soit } L'' \text{ telle que } T_A = f(T_D, L'') \\
 & \cdot \text{ si } L_D \geq L'' \quad \cdot \text{ si } L_D - L'' \leq L_R \quad T_M = f(T_A, L_D - L'') \\
 & \quad \quad \quad \cdot \text{ si } L_D - L'' > L_R \quad T_M = T_E \\
 & \cdot \text{ si } L_D < L'' \quad T_M = f(T_D, L_D)
 \end{aligned}$$

1.3.2 - La loi de refroidissement

Soit T_M température du moteur à l'issue du précédent déplacement

t_A durée de l'arrêt

T_S température du lieu de stationnement

T_D température du moteur à la fin de l'arrêt (et donc au démarrage du déplacement suivant)

Deux cas peuvent se présenter :

$$\begin{aligned}
 - T_M = T_E & \\
 & \cdot \text{ si } t_A < t_R \quad T_D = g(t_A, T_S) \\
 & \cdot \text{ si } t_A \geq t_R \quad T_D = T_S \\
 - T_M < T_E & \\
 & \text{ Soit } t' \text{ tel que } T_M = g(t', T_S) \\
 & \cdot \text{ si } t_A + t' < t_R \quad T_D = g(t_A + t', T_S) \\
 & \cdot \text{ si } t_A + t' \geq t_R \quad T_D = T_S
 \end{aligned}$$

2 - LE MODELE DE SURCONSOMMATION DUE AU DEMARRAGE A FROID

Ici encore, nous nous appuyons sur l'ouvrage déjà cité de DELSEY et alii (1980), étude basée sur la répétition de cycles Europe. Certes, ce cycle n'est que peu représentatif des conditions réelles de circulation urbaine, mais nous restons tributaires d'un manque évident d'expérimentations.

La figure 4.1 (tirée de DELSEY) rend compte de l'évolution de la surconsommation en fonction de la distance parcourue, pour un moteur de véhicule moyen. Le départ a lieu à la température ambiante, quatre plages de température ayant été retenues. A partir de ces résultats expérimentaux, il convient donc de mettre au point un formulaire. Du fait de la procédure expérimentale (le cycle Europe mesure 1,013 mètres), nous traiterons séparément dans une première étape les déplacements de plus d'un kilomètre de ceux plus petits.

2.1 - Les déplacements de plus d'un kilomètre

En l'absence d'informations sur la forme théorique des courbes, la validation du modèle se trouvera dans la confrontation entre la surconsommation observée et la valeur prédite par le modèle.

L'aspect des courbes de la figure 4.1 incite à poser :

$$\Delta C(L, T_A) = C_1(T_A) + (C_\infty(T_A) - C_1(T_A)) (1 - e^{- (L-1) h(T_A)})$$

avec L distance parcourue (km)

T_A température ambiante (°C)

$\Delta C(L, T_A)$ surconsommation absolue des L premiers kms à T_A fixée (litre)

$C_1(T_A)$ surconsommation absolue au premier km (litre)

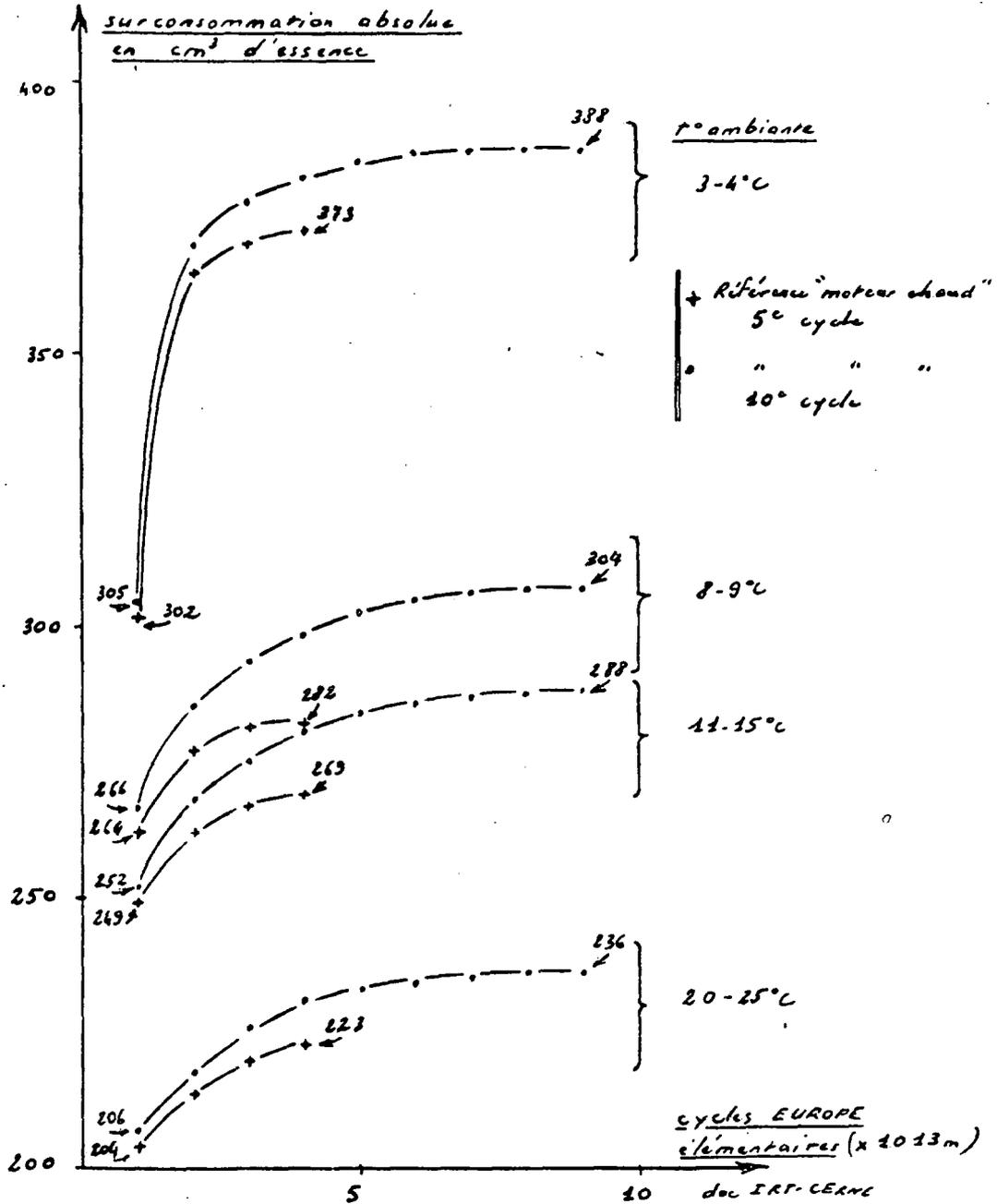
$C_\infty(T_A)$ surconsommation absolue totale (litre)

$h(T_A)$ fonction traduisant l'influence de la température ambiante sur la pente de ΔC

Il faut donc déterminer C_1 , C_∞ et h en fonction de T_A :

- C_1 est donné, pour les températures considérées, par l'ordonnée de la courbe au premier kilomètre : $\Delta C(1, T_A) = C_1(T_A)$

FIGURE 4.1 : Résultats expérimentaux de mesures de la surconsommation due aux démarrages moteur froid



Surconsommation absolue en cm³ d'essence après départ froid après 1, 2, ... 10 Km en utilisation urbaine (cycles Europe) et selon que la référence "moteur chaud" est fournie par la consommation au cours du 5^eme ou du 10^eme Km (Véhicule 1300 cm³).

Exemple : après 4 Km avec départ froid et avec une température ambiante de 3-4°C le véhicule a consommé 821 cm³ (414 cm³ au 1^{er} Km, 175 au 2^eme, 118 au 3^eme, 114 au 4^eme) ce qui représente une surconsommation réelle de 373 cm³ en se basant sur la consommation au cours du 5^eme Km (soit 112 cm³) et de 383 cm³ en se basant sur la consommation au cours du 10^eme Km (soit 109,7 cm³).

- C_{∞} sera assimilé, pour les températures considérées, à l'ordonnée au 10ème km, soit $\Delta C(10, T_A)$. Si, selon DELSEY, $\Delta C(15, T_A)$ paraît sensiblement différent de $\Delta C(10, T_A)$, les résultats expérimentaux disponibles paraissent cependant moins cohérents. Le choix retenu de $\Delta C(10, T_A)$ conduit ainsi à une légère sous-estimation de C_{∞} .
- La fonction h peut être calculée, toujours pour les températures considérées, à l'aide de la pente de la tangente à la courbe au point d'abscisse 1. En effet, cette pente est égale à :

$$\left(\frac{\partial \Delta C(L, T_A)}{\partial L} \right)_{L=1} \text{ et donc à } (C_{\infty}(T_A) - C_1(T_A)) \cdot h(T_A)$$

La figure 4.1 fournit les valeurs de C_1 , C_{∞} et de la pente au point d'abscisse 1 pour quatre plages de température ambiante. Elles sont reprises dans le tableau 4.1, ainsi que les valeurs résultantes de h .

TABEAU 4.1 : C_1 , C_{∞} et h pour différentes plages de température ambiante.

T_A (°C)	3-4	8-9	11-15	20-25
C_1 (litre)	0,305	0,266	0,253	0,206
C_{∞} (litre)	0,388	0,307	0,288	0,236
pente au point 1	134	30	19	12
h	1,61	0,73	0,53	0,40

L'utilisation des valeurs du tableau 4.1 dans le modèle proposé donne de très bons résultats, puisque l'écart relatif de la surconsommation prédite à la surconsommation observée est toujours inférieur à 2 % pour les plages de température considérées et quel que soit la longueur du déplacement.

Nous allons maintenant mettre les termes $C_1(T_A)$, $C_\infty(T_A)$ et $h(T_A)$ sous forme analytique.

La surconsommation disparaît totalement lorsque le moteur a atteint son équilibre thermique, d'où $C_1(90) = C_\infty(90) = 0$. On pose alors :

$$C_1(T_A) = \alpha(90 - T_A)^p \quad \text{et} \quad C_\infty(T_A) = \beta(90 - T_A)^\delta$$

Un ajustement par la technique de la régression linéaire donne les résultats suivants :

$$\text{Log } 10^3 C_1(T_A) = 1,42 \text{ Log } (90 - T_A) - 0,62 \quad (R^2 = 0,94)$$

$$\text{Log } 10^3 C_\infty(T_A) = 1,68 \text{ Log } (90 - T_A) - 1,63 \quad (R^2 = 0,91)$$

T_A en °C; C_1 et C_∞ en litre.

Les coefficients des régressions sont significativement différents de 0 au seuil de 95 %.

Finalement, on a donc :

$$C_1(T_A) = 0,54 \cdot 10^{-3} (90 - T_A)^{1,42}$$

$$C_\infty(T_A) = 0,20 \cdot 10^{-3} (90 - T_A)^{1,68}$$

T_A en °C; C_1 et C_∞ en litre.

Les résultats obtenus sont assez satisfaisants dans la mesure où l'écart relatif entre les valeurs observées (tableau 4.1) et les valeurs calculées reste toujours inférieur à 10 %.

Il n'est pas possible de faire pour $h(T_A)$ la même hypothèse que pour C_1 et C_∞ , c'est-à-dire $h(90) = 0$; plus exactement, rien ne permet de le justifier. Aussi, s'est-on limité ici à rechercher le meilleur calage statistique. Deux formulations ont été testées :

$$h(T_A) = a e^{bT_A} \quad \text{et} \quad h(T_A) = a \left(1 - \frac{T_A}{90}\right)^b$$

La première conduit à un R^2 de 0,79 et la seconde à un R^2 de 0,76. En fait, les deux modélisations conduisent à des calages satisfaisants pour les températures élevées (au-delà de 8°C), mais s'écartent sensiblement des valeurs observées pour les températures les plus faibles. Le première formule fournit les meilleurs résultats sur la plage 3-4°C. Pour $a = 1,32$ et $b = 0,056$, on obtient en effet $h(3) = 1,12$ et $h(4) = 1,05$.

Il est alors possible de calculer pour chacune de ces températures l'écart maximal entre les surconsommations calculées à partir des valeurs observées de h (cf. tableau 4.1), que l'on

nommera $\Delta C^\circ(L, T_A)$, et les surconsommations calculées à partir des valeurs calculées de h , que l'on nommera $\Delta C^C(L, T_A)$. Si l'on pose $E(L) = \Delta C^\circ(L, T_A) - \Delta C^C(L, T_A)$, l'écart maximal (à T_A fixé) est donné par $E(L_0)$ où L_0 vérifie $E'(L_0) = 0$. En n'envisageant ici que le cas le plus défavorable (c'est-à-dire $T_A = 4^\circ\text{C}$), on a alors $L_0 = 1,76$ km et $E(L_0) = 0,0081$, soit en valeur relative 2,4 %. La sous-estimation provenant de la modélisation de $h(T_A)$ est donc faible sur la plage 3-4°C. La marge d'erreur est cependant probablement beaucoup plus élevée sur les températures inférieures à 0°C. Ne disposant pas d'expériences pour ces températures, on se contentera d'un modèle de la forme :

$$h(T_A) = 1,32 e^{-0,056 T_A}$$

En résumé, le modèle adopté pour le calcul des surconsommations dues au démarrage à froid (déplacements de plus d'un kilomètre) est le suivant :

Pour $L \geq 1$ km :

$$\Delta C(L, T_A) = C_1(T_A) + (C_\infty(T_A) - C_1(T_A)) (1 - e^{-(L-1) h(T_A)})$$

avec $h(T_A) = 1,32 e^{-0,056 T_A}$

$$C_1(T_A) = 0,54 \cdot 10^{-3} (90 - T_A)^{1,42}$$

$$C_\infty(T_A) = 0,20 \cdot 10^{-3} (90 - T_A)^{1,68}$$

L en km ; T_A en °C et C_1 , C_∞ et ΔC en litre.

Nous avons cherché à évaluer les performances de ce modèle sachant que les fluctuations autour des valeurs observées de chacun des termes C_1 , C_∞ et h jouent ici de façon simultanée. A cette fin nous avons calculé pour différentes valeurs de la température ambiante, la distance L_0 pour laquelle l'écart entre la surconsommation observée lue sur la figure 4.1 et la surconsommation calculée est maximal. Les résultats de cette analyse sont consignés dans le tableau 4.2. Les valeurs observées et calculées des termes C_1 , C_∞ et h s'y trouvent aussi pour mémoire. La lecture de la dernière colonne de ce tableau montre qu'en dessous de 4-5°C, le modèle a tendance à légèrement sous-estimer ΔC , qu'au-delà et jusqu'à 22°C c'est l'inverse, pour à nouveau sous-estimer ΔC au delà de 23 °C. Mais on retiendra surtout que l'écart reste toujours faible en valeur relative : il est maximal à 4°C, température pour laquelle il ne dépasse pas 10 %.

TABLEAU 4.2. : Performances du modèle global de calcul de la surconsommation due au démarrage à froid.

Température ambiante T_A	Terme $C_1 (T_A)$		Terme $C_\infty (T_A)$		Terme $h (T_A)$		Valeur de L pour laquelle l'écart est max. L_0	Surconsommation ΔC		$\frac{\Delta C^\circ}{\Delta C}$
	observé	calculé	observé	calculé	observé	calculé		observé C°	calculé C	
3	0,305	0,307	0,388	0,363	1,61	1,119	2,48	0,374	0,352	0,94
4	0,305	0,302	0,388	0,356	1,61	1,055	1,76	0,368	0,331	0,90
8	0,266	0,282	0,307	0,328	0,73	0,843	2,27	0,288	0,312	1,08
9	0,266	0,277	0,307	0,322	0,73	0,797	2,31	0,282	0,306	1,06
11	0,252	0,267	0,288	0,308	0,53	0,713	2,62	0,273	0,295	1,08
12	0,252	0,262	0,288	0,302	0,53	0,674	2,67	0,273	0,289	1,06
13	0,252	0,258	0,288	0,295	0,53	0,637	2,72	0,273	0,283	1,04
14	0,252	0,253	0,288	0,289	0,53	0,603	2,77	0,273	0,277	1,01
15	0,252	0,248	0,288	0,283	0,53	0,570	2,82	0,275	0,270	0,98
20	0,206	0,225	0,236	0,252	0,40	0,431	3,41	0,228	0,242	1,06
21	0,206	0,221	0,236	0,246	0,40	0,407	3,48	0,228	0,236	1,03
22	0,206	0,216	0,236	0,240	0,40	0,385	3,55	0,228	0,231	1,01
23	0,206	0,212	0,236	0,234	0,40	0,364	3,62	0,229	0,225	0,98
24	0,206	0,207	0,236	0,228	0,40	0,344	3,69	0,229	0,220	0,96
25	0,206	0,203	0,236	0,222	0,40	0,325	3,77	0,230	0,214	0,93

2.2 - Les déplacements de moins d'un kilomètre

La carence des données expérimentales nous contraint à formuler deux hypothèses :

- le véhicule ne se met pas en mouvement dès l'instant précis où le moteur commence à tourner ; un temps de latence existe (véhicule arrêté, moteur tournant) qui dépend d'ailleurs très probablement de la température ambiante. A ce temps de latence correspond un coût énergétique qui peut être appréhendé comme un coût fixe de surconsommation. La littérature étant très pauvre à ce sujet, nous avons adopté comme référence les seules valeurs mentionnées par DELSEY lors d'essais non purement urbains : "la quantité d'essence nécessaire au démarrage varie entre 25 et 100 cm³". Pour notre part, nous avons choisi une valeur unique indépendante de la température ambiante et égale à 0,05 l. Remarquons que cette valeur est très largement supérieure au coût du même démarrage effectué moteur chaud, lequel se situe entre 0,005 et 0,02 l.

- on assimile la courbe de surconsommation sur le premier kilomètre à une droite, ce qui constitue très certainement un biais important, mais qui présente l'indéniable avantage de simplifier le modèle en l'absence de données expérimentales. Pour les déplacements de moins d'un kilomètre le modèle est alors le suivant :

Pour $L \leq 1$ km :

$$\Delta C(L, T_A) = C_0 + (C_1(T_A) - C_0) L$$

avec $C_0 = 0,05$ litre

$$C_1(T_A) = 0,54 \cdot 10^{-3} (90 - T_A)^{1,42}$$

L en km; T_A en °C et $C_0, C_1, \Delta C$ en litre.

2.3 - La mise en oeuvre des formules

Les formules proposées, comme dans le cas des lois d'échauffement et de refroidissement, sont indépendantes du type de véhicule. Ici aussi, la faute en est au manque de données empiriques.

Posons

- T_D température du moteur au démarrage
- L_D longueur du déplacement
- T_A température ambiante
- ΔC surconsommation à l'issue du déplacement

T_D, T_A en °C ; L_D en km et ΔC en litre.

Deux cas peuvent se présenter :

$$- T_D = T_A$$

$$\cdot \text{ si } L_D \leq 1 \quad \Delta C = C_0 + (C_1(T_A) - C_0) L_D$$

$$\cdot \text{ si } L_D > 1 \quad \Delta C = C_1(T_A) + (C_\infty(T_A) - C_1(T_A)) (1 - e^{-(L-1)h(T_A)})$$

$$- T_D > T_A$$

Soit L' vérifiant $T_D = f(T_A, L')$

$$\cdot \text{ si } L_D + L' \leq 1 \quad \Delta C = (C_1(T_A) - C_0) L_D$$

$$\cdot \text{ si } L_D + L' > 1$$

$$\cdot \text{ si } L' \geq 1 \quad \Delta C = (C_\infty(T_A) - C_1(T_A)) (e^{-(L'-1)h(T_A)} - e^{-(L_D+L'-1)h(T_A)})$$

$$\text{si } L' < 1 \quad \Delta C = C_1(T_A) - C_0 + (C_\infty(T_A) - C_1(T_A)) \cdot (1 - e^{-(L_D + L' - 1)h(T_A)}) \\ + (C_0 - C_1(T_A)) \cdot L'$$

3 - LE MODELE DE CONSOMMATION MOTEUR CHAUD

Le chapitre II a montré qu'il n'était pas possible de disposer d'un modèle de consommation moteur chaud adapté à la région lyonnaise. Nous avons cependant retenu les deux familles de modèles paraissant les plus satisfaisantes par rapport à nos préoccupations:

- un modèle issu d'essais réalisés par ROUMEGOUX (1981) sur une R 12 TL à Lyon.
- un groupe de modèles proposé par COHEN (1981) correspondant à un ensemble de déplacements représentatif des déplacements urbains des français et concernant les trois gammes de véhicules (d'où découlait un modèle unique pour le véhicule moyen).

Sans revenir sur les conclusions émises alors, rappelons que les modèles de COHEN conduisent probablement à une surestimation des consommations réelles à Lyon alors qu'au contraire celui de ROUMEGOUX les sous-estime.

Notre choix s'est finalement porté sur le modèle de ROUMEGOUX. Les raisons, sans toutefois qu'aucune soit véritablement convaincante, sont multiples :

- le modèle de ROUMEGOUX est calé sur Lyon (sans être représentatif des déplacements des lyonnais) alors que ceux de COHEN concernent, d'une certaine manière, une agglomération française "moyenne".
- il est plus facile de nuancer une sous-estimation qu'une surestimation en prenant en compte des paramètres écartés du modèle initial.
- COHEN n'a pas éliminé totalement l'effet surconsommation due à l'échauffement du moteur. Or cet effet est pris en compte de façon autonome dans le modèle que nous élaborons.

La température ambiante influe sensiblement sur la consommation du moteur chaud (DELSEY et alii, 1980). Le modèle de ROUMEGOUX ayant été calibré sur la plage de température 10°C-20°C, nous appliquerons une correction $ET(T_A)$ pour tenir compte de cet effet.

La fonction $ET(T_A)$ prend la forme suivante :

- $T_A < 7^\circ\text{C}$ $ET(T_A) = 1,003 + 0,005 \times (7 - T_A)$
- $7^\circ\text{C} \leq T_A < 10^\circ\text{C}$ $ET(T_A) = 1 + 0,001 \times (10 - T_A)$
- $10^\circ\text{C} \leq T_A \leq 20^\circ\text{C}$ $ET(T_A) = 1$
- $T_A > 20^\circ\text{C}$ $ET(T_A) = 1 - 0,001 \times (T_A - 20)$

Le modèle final de consommation moteur chaud s'écrit ainsi $ET(T_A) \times CMC$ avec $CMC = 0,702 t_D + 0,067 L_D$ où t_D , durée du déplacement, est en heure, L_D , longueur du déplacement, en kilomètre et CMC en litre.

4 - LA PRISE EN COMPTE DES DIVERS FACTEURS INFLUENCANT LA CONSOMMATION

Le chapitre II montre la diversité de ces facteurs. Pour autant leur prise en compte est limitée par un certain nombre de conditions. Certains sont en effet déjà intégrés dans les modèles retenus par les conditions d'expérimentation elles-mêmes. D'autres n'ont fait l'objet d'aucune évaluation, ce qui interdit toute possibilité d'intégration, ou encore ces évaluations ne sont que très partielles (méconnaissance de la distribution du phénomène sur une population expérimentale). Enfin, une dernière classe de facteurs intervient, mais sans qu'on puisse déterminer le sens de variation de ses effets (majoration ou minoration).

L'analyse bibliographique conduit à ne retenir que quatre facteurs qui jouent tous sur la consommation totale (moteur chaud + démarrage à froid). Il s'agit :

- du mauvais réglage des moteurs
- du mauvais gonflage des pneumatiques
- de la charge des véhicules
- de l'utilisation des phares

Rappelons que les effets dus aux conditions climatiques sont bien évidemment intégrés dans les modèles eux-mêmes (prise en compte de la température ambiante). Les études considérées dans la suite sont toutes citées dans le rapport de 1982 du Groupe de Recherche Routière de l'O.C.D.E.

4.1 - Le mauvais réglage des moteurs

Ne disposant d'aucune estimation sur le parc français, nous avons adopté les conclusions d'une étude européenne, qui évalue à 2,4 % de la consommation totale le surcoût engendré par le mauvais réglage des moteurs. Aussi, nous retiendrons le facteur correcteur suivant :

$$RM = 0,024$$

4.2 - Le mauvais gonflage des pneumatiques

Une étude réalisée au Etats-Unis montre qu'un gonflage correct des pneumatiques (forte proportion de pneus sous-gonflés) conduirait à une économie de 2,2 % de la consommation totale de carburant. Faute d'une étude similaire sur le parc français, nous adopterons cette valeur comme coefficient correcteur :

$$GM = 0,022.$$

4.3 - La charge des véhicules

Pour un véhicule moyen, le surcoût de consommation dû à un passager moyen est de l'ordre de 4 %. Aussi la consommation totale sera-t-elle multipliée par le facteur :

$$CV = 0,03 (NP-1).$$

où NP représente le nombre d'individus à l'intérieur du véhicule. Les poids des enfants étant surévalué par une telle formulation, on a pris un surcoût légèrement inférieur à celui observé.

4.4 - L'utilisation des phares

Diverses expériences ont montré que l'utilisation des phares conduisait à un surcoût de 0,4 à 0,8 1/100 km pour un véhicule moyen. Par ailleurs, compte tenu de la période d'enquête, seront pénalisés par ce coefficient les seuls déplacements réalisés avant sept heures le matin et après 19 heures le soir. En considérant des valeurs moyennes, nous adopterons alors comme coefficient correcteur :

début du déplacement avant 7 heures ou après 19 heures :

$$UP = 0,05$$

début du déplacement entre 7 heures et 19 heures :

$$UP = 0,00$$

4.5 - Combinaison des quatre facteurs

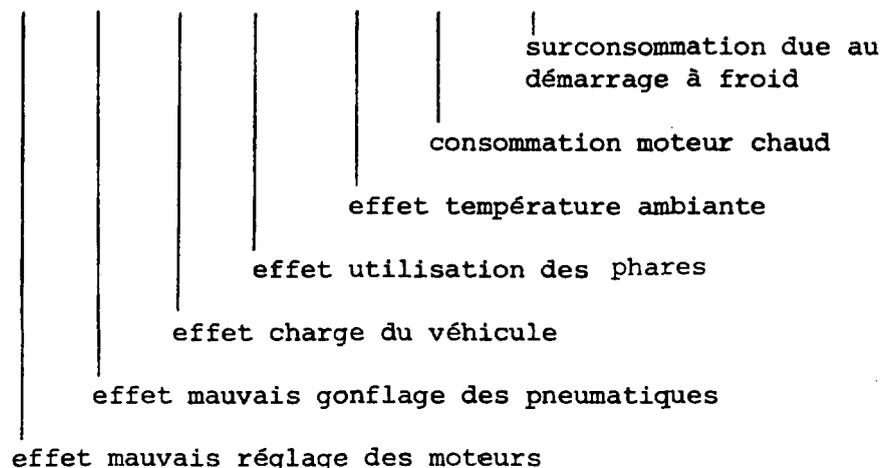
A la question de savoir si ces effets se cumulaient entre eux ou si au contraire ils étaient indépendants les uns des autres, nous avons opté pour la deuxième solution en tenant compte, d'une part de la différence de nature entre les quatre facteurs envisagés, et de l'autre du fait que les estimations de leurs effets ont dû vraisemblablement être menées par rapport à des situations optimales de référence.

L'effet des divers facteurs influençant la consommation est ainsi appréhendé par l'expression $1 + RM + GM + CV + UP$.

5 - LE MODELE COMPLET DE CONSOMMATION DES VEHICULES LEGERS

En reprenant les notations définies précédemment, le modèle de consommation se présente sous la forme suivante :

$$C = (1 + RM + GM + CV + UP) \times (ET \times CMC + \Delta C)$$



où :

- RM, GM, CV et UP sont des constantes
- ET dépend de la température ambiante
- CMC dépend de la durée et de la longueur du déplacement
- ΔC est fonction de la température ambiante, de la longueur du déplacement et indirectement, de la température du lieu de stationnement, de la durée de l'arrêt précédant le déplacement et de l'état thermique du moteur à l'issue de l'ultime déplacement.

Le calcul de la surconsommation, et donc de la consom-

mation totale, nécessite le suivi temporel du véhicule particulier.

Il a ainsi fallu, pour chaque ménage, créer à partir du fichier disponible un fichier véhicule retraçant l'histoire de son ou ses automobile(s). Cette reconstitution s'est effectuée manuellement, à partir des bordereaux d'enquête. Dans le cas d'utilisation de véhicules n'appartenant pas au ménage, nous avons systématiquement considéré que le premier déplacement avait lieu avec un démarrage moteur froid.

Enfin, le modèle exprime la consommation en litres de carburant. Pour la convertir en gep, nous utiliserons un coefficient d'équivalence énergétique égal à 744 (1 litre = 744 gep). Proposé par FRYBOURG (1980), il représente une moyenne pondérée des coefficients relatifs à l'essence ordinaire et au super carburant.

6 - LES SIMULATIONS

A côté d'un certain nombre de paramètres caractérisant l'état thermique du véhicule et de son environnement, le modèle complet élaboré jusqu'ici nécessite la connaissance de la durée et de la longueur de chaque déplacement du véhicule. Or les données disponibles dans l'enquête (saisies auprès des individus ou calculées ultérieurement) correspondent aux déplacements des individus et donc, le plus souvent à des trajets de porte à porte. Il n'y a pas concordance entre les exigences du modèle et les indicateurs disponibles.

Après la reconstitution des distances de déplacement, après l'adoption d'un modèle de consommation présentant diverses simplifications, cette inadéquation risque encore d'ajouter aux incertitudes déjà présentes. Comment mesurer la fiabilité des résultats que nous obtiendrons ?

Moins qu'une quantification exacte des phénomènes, cette recherche qui ne se veut qu'exploratoire a pour ambition la mise en évidence des déterminants principaux des consommations énergétiques et de la mobilité à faible distance. Il s'agit de pouvoir apercevoir des tendances lourdes, des comportements structurels. Cette exigence désigne une méthode permettant de dépasser les incertitudes introduites ici : le recours à un ensemble de simulations au fil desquelles nous pourrions tester la stabilité des tendances lourdes observées sur le fichier de base.

TABLEAU 4.3 : Prise en compte des trajets terminaux
(Centre = Lyon + Villeurbanne)

	Le déplacement a :		
	aucune extrémité dans le centre	une extrémité dans le centre	deux extrémités dans le centre
durée du trajet automobile : t_a	$t_a = t_d$	<ul style="list-style-type: none"> • $t_d = 5$ $t_a = t_d$ • $10 \leq t_d \leq 20$ $t_a = 0,8 t_d$ • $20 < t_d$ $t_a = t_d - 5$ 	<ul style="list-style-type: none"> • $t_d = 5$ $t_a = t_d$ • $10 \leq t_d \leq 20$ $t_a = 0,7 t_d$ • $20 < t_d$ $t_a = t_d - 8$

t_d : durée du déplacement porte à porte (mn)

6.1 - Des phénomènes ignorés

Le déplacement de porte à porte est nécessairement plus long (en temps et en distance) que le trajet en véhicule particulier. Il s'agit donc de diminuer la durée et la distance du déplacement. De manière arbitraire, nous avons décidé de jouer sur la durée, sachant que la distance en automobile est ensuite recalculée par application à la nouvelle durée de la typologie des vitesses définie au chapitre précédent. Le tableau 4.3 indique le mode précis de prise en compte des trajets terminaux. Le schéma de calcul repose sur l'hypothèse simplificatrice suivante : les trajets en périphérie s'effectuent de porte à porte.

La phase de reconstitution des distances de déplacement a ignoré l'allongement du trajet dû à la recherche d'un lieu de stationnement du véhicule. Ce phénomène, qui influe uniquement sur les distances parcourues, joue, en général, plus nettement au centre de l'agglomération qu'en périphérie. C'est pourquoi nous l'avons ignoré pour les déplacements se terminant dans la banlieue lyonnaise (Tableau 4.4).

TABLEAU 4.4. : Prise en compte de la recherche de stationnement (centre = Lyon + Villeurbanne)

	Le déplacement se termine au centre	
	OUI	NON
Distance du trajet automobile : l_a	$l_a = l_d + 0,3$	$l_a = l_d$

l_d : longueur du déplacement porte à porte (km)

La recherche d'un lieu de stationnement peut se combiner à la nécessité d'effectuer des parcours terminaux. Ces deux éléments (pris conjointement ou séparément) se traduisent nécessairement par un accroissement de la vitesse moyenne du déplacement automobile. Aussi, plutôt que d'essayer de les appréhender à travers les grilles présentées ci-dessus, il est possible d'appliquer aux vitesses observées dans l'enquête un coefficient multiplicateur (bien évidemment arbitraire lui aussi) permettant de les intégrer directement dans la distance du déplacement. Ce coefficient a été volontairement choisi

élevé (1,20), afin d'obtenir ainsi un cas limite : la vitesse moyenne automobile atteint en effet plus de 23 kilomètres par heure.

Enfin, le modèle de consommation des véhicules légers s'applique à un véhicule moyen. Or, selon l'enquête Transport de l'INSEE (1977) il existe une relation forte entre revenus annuels du ménage et puissance fiscale du véhicule. Il convient alors de pondérer la consommation par un facteur correctif. En intégrant aux modèles de COHEN la vitesse moyenne issue de l'enquête, nous obtenons les valeurs suivantes : 1,00 pour la gamme basse, 0,96 pour la gamme moyenne et 1,20 pour le haut de gamme. Enfin, l'échelle des revenus proposée dans l'enquête étant simplifiée, il en résulte le tableau 4.5 .

TABLEAU 4.5 : Prise en compte de l'effet de gamme

	Revenus du ménage motorisé (francs 1979)			Ménage multi- motorisé
	< 55.000	> 55.000 et < 90.000	> 90.000	
Coefficient correcteur	1,0	0,96	1,20	1,00

6.2 - Les sept simulations

En combinant la prise en compte des trajets terminaux, de la recherche d'un lieu de stationnement et l'effet de gamme, nous avons ainsi défini les sept simulations suivantes qui viennent s'ajouter au jeu de données de base :

- prise en compte des trajets terminaux
- prise en compte des trajets terminaux et de la recherche d'un lieu de stationnement
- multiplication de la vitesse par un coefficient correcteur
- effet de gamme
- prise en compte des trajets terminaux et effet de gamme
- prise en compte des trajets terminaux, de la recherche d'un lieu de stationnement et effet de gamme
- multiplication de la vitesse par un coefficient correcteur et effet de gamme.

Enrichi de ces simulations le modèle de consommation des véhicules légers est enfin opérationnel.

II - LES AUTRES MODES MOTORISES

Les modèles correspondant aux transports collectifs et aux deux roues seront beaucoup plus simples que celui élaboré pour la voiture particulière. Ainsi que l'a montré l'analyse bibliographique, les bases empiriques sont en effet beaucoup plus réduites et ne se prêtent pas à une réexploitation ayant comme objectif une modélisation fine (ainsi que nous l'avons fait pour le modèle de surconsommation due à l'échauffement du moteur). Il est toutefois indispensable de pouvoir affecter aux déplacements correspondants une consommation énergétique. Aussi allons-nous maintenant sélectionner pour chacun de ces modes la meilleure solution disponible. Nous envisagerons ensuite le cas du déplacement en mode complexe (usage conjoint des transports collectifs et de la voiture particulière).

1 - LES TRANSPORTS COLLECTIFS

Si l'on met à part les taxis, qui doivent être traités comme des véhicules particuliers, trois types de transport collectif coexistent dans l'agglomération lyonnaise : autobus, trolleybus et métro. Or chacun de ces types se révèle hétérogène en ce qui concerne les matériels utilisés : le parc évolue peu à peu et regroupe des véhicules de générations différentes aux performances énergétiques sensiblement inégales.

Les consommations unitaires et spécifiques proposées par TCL sont alors des moyennes cachant une importante variabilité. Il n'est toutefois pas envisageable de leur opposer de modèle issu d'essais en circulation réelle, les rares modèles empiriques existant ayant été calés sur des véhicules bien particuliers et hors de l'agglomération lyonnaise. Quant aux modèles théoriques, ils nécessitent des paramètres impossibles à reconstituer.

En toute rigueur, il conviendrait d'affecter à chaque type de transport collectif sa consommation unitaire moyenne rapportée à la demande, si possible ventilée suivant la période de la journée pour tenir compte des disparités entre heures creuses et heures de pointe. Mais nous avons vu (chapitre II) que cette consommation n'est pas disponible pour les trolleybus, une estimation existant toutefois pour l'ensemble du réseau.

Nous avons finalement opté pour une consommation unitaire unique, indépendante du mode. La valeur retenue, 23 gep/pkt, surestime légèrement la consommation du réseau de surface et sous-estime plus nettement celle du métro. Le principal avantage du

modèle ainsi constitué est son extrême simplicité et son principal défaut est bien évidemment corrélatif, l'élimination de toutes les spécificités (type de transport, de véhicule, position dans la journée ...). Des raffinements ne seraient toutefois qu'illusoire en l'état actuel des choses.

2 - LES DEUX ROUES

Nous n'avons pas d'autre choix pour les deux roues que l'usage des consommations unitaires citées par FRYBOURG. Toutefois nous modulerons les conclusions tirées de l'étude bibliographique en remarquant que dans l'enquête disponible, le taux d'occupation est pratiquement égal à 1 et non à 1,1. Les valeurs obtenues au chapitre seront donc revues en hausse .

Les consommations disponibles sont ventilées par type de véhicule. Or celui-ci n'a pas été saisi lors de l'enquête. Cependant nous ne pouvons pas adopter ici la solution retenue pour les transports collectifs (une valeur unique pour les différents types). En effet, des contraintes légales reposant sur l'âge du conducteur pèsent sur l'accès à ces véhicules. Aussi avons-nous basé le modèle sur une typologie liée à cet âge :

- si le conducteur a moins de 14 ans, le véhicule est nécessairement une bicyclette, de consommation nulle ;
- de 14 à 15 ans, le conducteur peut utiliser un cyclomoteur, dont la consommation moyenne est évaluée à 15,4 gep/pkt ;
- enfin, un conducteur de plus de seize ans a les différents types de véhicule à sa disposition. Nous lui affecterons la consommation moyenne du véhicule le plus utilisé (vélomoteur 2 temps), soit 31,5 gep/pkt.

Ce modèle est, bien évidemment, peu satisfaisant. N'importe qui (ou presque), quelque soit son âge, peut utiliser une bicyclette et donc ne pas consommer d'énergie. Or, ici, les plus de 14 ans se déplacent nécessairement avec un deux roues à moteur. Il semblerait donc que les consommations deux roues soient surestimées par le modèle ; toutefois, le vélomoteur 2 temps étant moins énergophage que la plupart des motocyclettes, la valeur retenue pour les plus de seize ans est, probablement, une sous-estimation de la consommation des deux roues à moteur. Globalement, l'ordre de grandeur doit cependant être correct.

3 - LE MODE COMPLEXE

La consommation des déplacements effectués successivement en transport collectif et en voiture particulière peut être calculée en combinant les modèles retenus pour ces deux modes : le déplacement est séparé en ses deux trajets, chaque trajet se voit alors affecter une dépense énergétique, la consommation totale étant obtenue ensuite par simple sommation. Nous avons préféré définir un modèle spécifique pour ces déplacements, de même que leur distance avait été déterminée à l'aide d'une typologie spécifique des vitesses.

Le modèle repose sur une consommation unitaire du mode complexe, pondération des consommations unitaires des transports collectifs et de la voiture particulière :

- la pondération s'effectue au prorata des temps de déplacement (60 % en transport collectif, 40 % en voiture particulière)
- la consommation unitaire moyenne est issue, pour la voiture, de l'utilisation de la vitesse moyenne de déplacement dans le modèle de consommation de ce mode, le taux d'occupation étant pris égal à 2 (forte proportion d'accompagnement).

La valeur obtenue est de 30 gep/pkt.

4 - CONCLUSION

Les modèles définis dans cette section sont, au regard du modèle consacré à la voiture particulière, bien peu satisfaisants. Leurs faiblesses sont dues à la méconnaissance du comportement énergétique des différents modes (transports collectifs, deux roues) en circulation réelle. Le recours à des consommations unitaires comme les disparités individuelles, dont le modèle VP, sans pour autant être parfait, rendait mieux compte. Il n'y avait cependant pas d'autre alternative.

III - L'AFFECTATION DES CONSOMMATIONS AUX INDIVIDUS

Les différents modèles présentés dans les pages précédentes affectent à chaque déplacement la consommation d'énergie correspondante. Se pose alors le problème de l'affectation de cette consommation aux individus effectuant le déplacement. Plusieurs approches sont en effet possibles. Mais la situation des différents modes n'est cependant pas similaire.

De par la forme même des modèles retenus, le passage de la consommation calculée à la consommation de l'individu s'effectue sans aucune difficulté en ce qui concerne les déplacements en transport collectif et en deux roues. En effet, le modèle affecte à chaque déplacement la consommation unitaire correspondante, c'est-à-dire le coût énergétique du véhiculage d'un individu.

A l'opposé, le modèle utilisé pour les automobiles fournit la consommation spécifique imputable au déplacement du véhicule. Il importe donc de se donner une clef de répartition de cette consommation entre les différents individus présents dans le véhicule. Trois méthodes peuvent être envisagées :

- chaque individu se voit attribuer la totalité de la consommation du déplacement. On considère ainsi que l'individu est seul utilisateur du véhicule. La sommation de l'énergie consommée par les différents individus d'un ménage ou d'une agglomération conduit à des comptes multiples.
- chaque individu se voit affecter la totalité de la consommation s'il conduit le véhicule, une consommation nulle s'il n'est que passager. Cette approche, qui peut éventuellement être nuancée pour certains types de déplacement (le service passager), n'entraîne pas de doubles comptes.
- enfin la consommation totale est répartie également entre les différents individus, éventuellement au prorata de la distance qu'ils parcourent avec le véhicule (si son taux d'occupation change durant le déplacement). Les comptes multiples sont également évités.

Ces trois méthodes conduisent à des résultats identiques lorsque le conducteur est seul dans son véhicule. Par contre, elles aboutissent à des conclusions divergentes lorsque l'on enregistre des pratiques d'accompagnement. La première méthode majore alors la consommation, les deux autres fournissant des valeurs qu'il est difficile de situer par rapport aux consommations réelles engendrées par chaque individu. En fait, c'est la notion même de consommation réelle de l'individu qui pose problème et ne permet pas de définir avec rigueur une méthode d'affectation.

Chacune des trois méthodes présente ainsi avantages et inconvénients. Pour la commodité de l'analyse, nous avons dû en privilégier une. Par analogie avec les modèles utilisés pour les autres modes motorisés, nous retiendrons dans la suite la troisième

méthode qui fournit, pour les véhicules particuliers, l'équivalent d'une consommation unitaire.

Le budget énergétique transport est alors la somme des consommations afférentes à l'ensemble des déplacements de l'individu sur une période de 24 heures . Il se décompose en trois parties : un budget énergétique voiture particulière, un budget énergétique transport collectif et un budget énergétique deux roues.

La première méthode d'affectation des consommations en voiture particulière se traduit, nous l'avons vu, par une surestimation de la consommation de l'individu. Tout se passe comme si chacun des passagers éventuels de l'automobile effectuait seul le déplacement dans un véhicule identique au véhicule commun : il n'y a plus de passagers, seulement des conducteurs. Le rapport entre les consommations issues de ce mode d'affectation et celles provenant de la méthode retenue ici est ainsi analogue à un taux d'occupation. Nous le désignerons dans la suite par l'expression d'"équivalent énergétique du taux d'occupation des véhicules particuliers".

Ces deux indicateurs sont très similaires à ceux définis par ORFEUIL (1980); seule la méthode d'affectation des consommations diffère.

TROISIEME PARTIE

A l'issue des parties précédentes, nous disposons d'une base de données susceptible de nous éclairer sur les déterminants des consommations énergétiques et la place des petits déplacements.

Cette base de données s'est construite à partir d'un certain nombre de méthodes et de modèles. Nous essaierons dans le chapitre V d'évaluer les biais ainsi introduits.

L'analyse sera ensuite menée en deux étapes.

Dans la première phase, nous allons tester l'influence sur la consommation d'énergie d'un certain nombre de variables traditionnellement retenues pour l'analyse de la mobilité (chapitre VI).

Fort de cet acquis, nous essaierons ensuite de synthétiser et approfondir ces résultats en élaborant des macro-variables à partir des comportements observés en matière énergétique et d'une typologie des déplacements fondée sur la distance. Il sera alors possible de mettre en regard petits déplacements et consommations d'énergie (chapitre VII).

Enfin, nous tirerons un bilan de cette analyse dans un dernier chapitre, bilan double puisqu'il portera sur les résultats obtenus et sur les améliorations méthodologiques à apporter pour affiner ces derniers.

102



CHAPITRE V

ELEMENTS D'EVALUATION DES METHODES D'ENRICHISSEMENT DES DONNEES

La seconde partie de ce travail a permis de proposer diverses méthodes (reconstitution des distances, simulations,...) visant à pallier l'inadéquation du matériau empirique disponible. La pertinence des résultats présentés dans cette troisième partie peut toutefois être remise en cause par certains artifices dus à ces méthodes. Il convient donc tout d'abord d'étudier rapidement leurs effets. Nous envisagerons successivement l'influence de la méthode de calcul des distances avant de peser les conséquences des diverses hypothèses fondant les simulations.

Pour des raisons de commodité de calcul, nous ne prendrons toutefois en compte dans ce chapitre que les seuls déplacements de moins de vingt kilomètres (ils représentent cependant plus de 99 % de l'échantillon urbain).

I - METHODES LIEES AUX DISTANCES : EFFETS DE LA RECONSTITUTION

La méthode de reconstitution des distances de déplacement, présentée et testée dans une précédente partie de ce travail, s'appuie notamment sur la détermination de typologies pertinentes des vitesses porte à porte. Mais l'application de ces vitesses à des déplacements dont la durée a été recensée par pas de cinq minutes conduit à des distances de déplacement multiples de quelques distances de base.

Les courbes "nombre de déplacements (selon telle ou telle caractéristique) - distance" apparaissent ainsi discontinues et présentent des paliers. Un lissage semble alors s'imposer mais il ne doit pas conduire à l'introduction de nouveaux inconvénients. Nous présenterons donc la stratégie retenue, avant d'en étudier la fiabilité sur un exemple concret.

1 - METHODE DE LISSAGE

La méthode repose sur une approche modale. En effet, le chapitre III a montré l'importance du mode de transport en ce qui concerne la distance parcourue ; or les typologies des vitesses se fondent d'abord sur une séparation des différents modes. Les courbes "nombre de déplacements - distance" résultent ainsi de l'agrégation de ces mêmes courbes construites pour chacun des modes.

Les modes sont alors regroupés en quatre catégories : la marche à pied (MAP), les deux roues (2R), les transports en commun qui incluent le mode complexe de la partie précédente (TC), et la voiture particulière (VP).

La méthode de lissage retenue est bien entendu similaire pour les quatre modes et consiste en un lissage manuel des courbes "pourcentage cumulé de déplacements-distance".

Un lissage manuel parce qu'un lissage automatique n'aurait rien apporté. D'une part, le gain de précision qu'entraîne l'utilisation de l'ordinateur est ici illusoire : la première partie a montré les limites de la méthode de reconstitution des distances et la faiblesse du fichier au point de vue statistique. D'autre part, la main permet plus facilement de prendre en compte certaines spécificités que l'automatisation risque de gommer.

Les courbes "pourcentage de déplacements cumulé-distance" parce qu'elles autorisent mieux, nous semble-t-il, que les courbes "nombre de déplacements-distance" d'apprécier quelle part d'une "bosse" ou d'un "creux" est un artefact et quelle part traduit

un phénomène effectivement observé.

Ainsi, l'étude de l'influence de telle ou telle caractéristique va-t-elle nécessiter la succession des phases suivantes, pour chacune de ses modalités :

- à partir d'un listing fournissant le nombre de déplacements par pas d'un kilomètre, construction de la courbe "pourcentage cumulé de déplacements-distance" pour chacun des modes ;
- lissage manuel de ces courbes. On dispose alors, pour chaque mode, du nombre de déplacements inférieurs à telle ou telle distance ;
- détermination, pour chaque mode, d'une courbe "pourcentage de déplacements-distance" ;
- cumul des quatre courbes modales.

Si la méthode est simple, elle est cependant assez longue à mettre en oeuvre.

La principale critique tient à la difficulté de séparer les phénomènes artificiels de ceux qui résultent de l'observation du réel tel qu'il a été appréhendé. Ce sont les conséquences de cette difficulté que nous allons essayer d'appréhender maintenant.

2 - ETUDE DE LA COURBE "POURCENTAGE CUMULE DE DEPLACEMENTS-DISTANCE"

La méthode de lissage n'a d'intérêt que si elle permet d'obtenir un même résultat par des chemins différents. La courbe "pourcentage cumulé de déplacements-distance" pour l'ensemble de l'échantillon peut être obtenue directement (c'est-à-dire par simple décomposition suivant les quatre modes), mais aussi en cumulant les courbes obtenues pour chacune des modalités de telle ou telle variable.

Nous avons retenu ici quatre courbes "pourcentage cumulé de déplacements-distance" : celle obtenue directement et celles agrégées résultant des trois variables "type de liaison", "motif" (typologie enquête-ménages) et "statut de l'individu" (respectivement 3, 3 et 10 modalités).

La figure 5.1 et le tableau 5.1 permettent de comparer les quatre courbes retenues. Elles apparaissent très similaires. Leurs différences sont cependant plus sensibles à partir de deux kilomètres, ce qui montre la bonne qualité de la méthode sur les petites distances. L'écart maximal se rencontre à 3 kilomètres. Selon la courbe motif, 64 % des déplacements font moins de 3 kms, alors que selon la courbe statut, ce n'est le cas que de 61 % ; la différence est en valeur absolue de 3 % et en valeur relative de moins de 5 %.

FIGURE 5.1 : Etude de la robustesse de la méthode de lissage

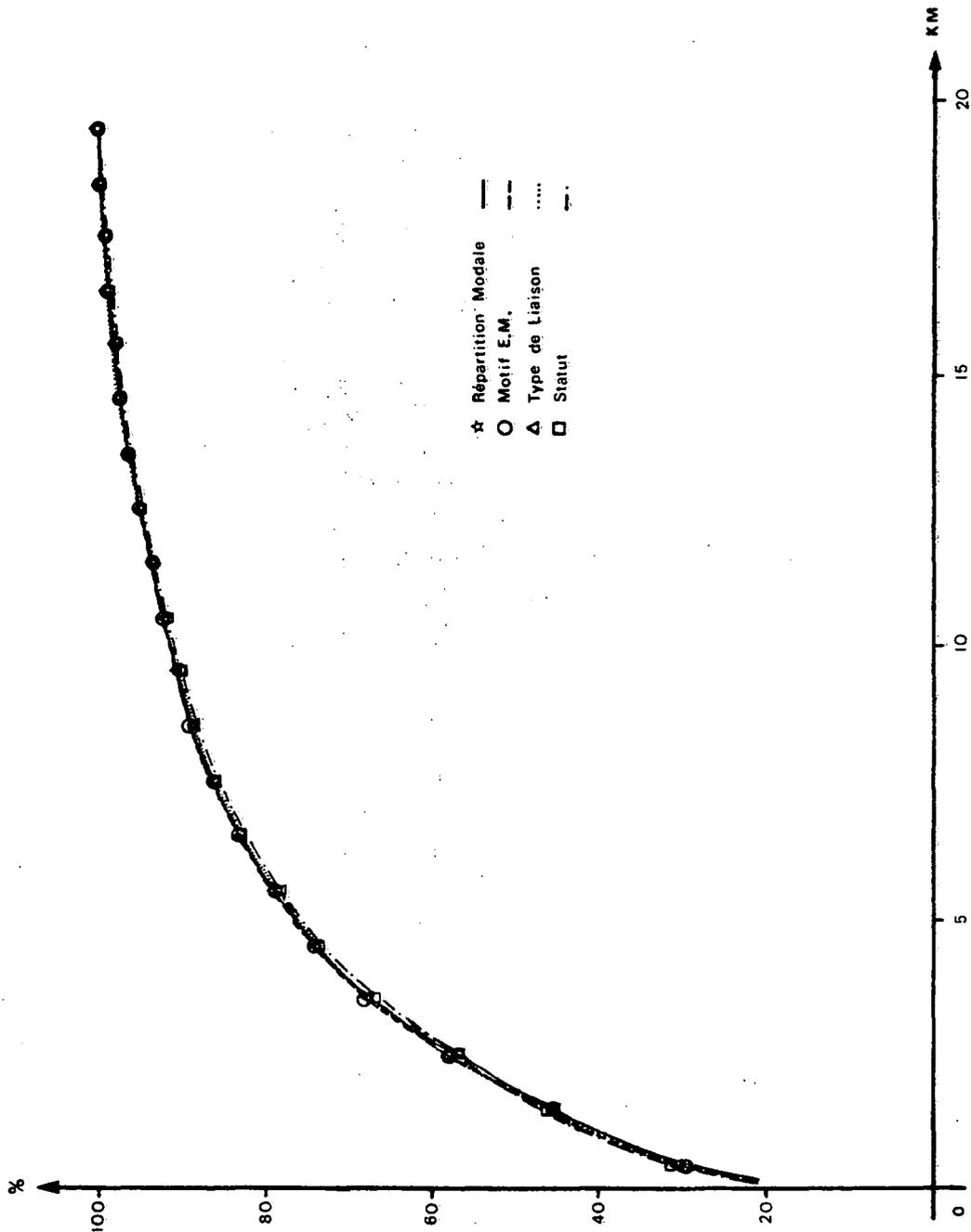


TABLEAU 5.1 : Etude de la robustesse de la méthode de lissage.

	% de déplacements ayant une distance inférieure à				
	1 km	3 km	5 km.	8 km.	10 km.
courbe "directe"	38	63	77	88	92
courbe "liaison"	38	63	77	87	91
courbe "motif"	39	64	77	87	91
courbe "statut"	39	61	76	87	91

Globalement, la courbe "statut" a d'ailleurs un comportement légèrement différent de celui des autres courbes. L'explication réside dans la très forte désagrégation de l'échantillon qui a présidé à sa constitution ; elle provient en effet du lissage de 38 courbes (10 modalités x 4 modes = 40 courbes, moins deux inexistantes dû au non usage de certains modes par certaines catégories) !

La méthode fournit donc des résultats légèrement différents suivant les cas dans lesquels elle est utilisée. Ces fluctuations, déjà marginales, deviennent tout à fait négligeables si l'on se souvient des réserves qui ont été faites précédemment sur la représentativité statistique de l'échantillon.

Si l'on en revient à la figure 5.1, il convient de remarquer le poids, tous modes confondus, des déplacements courts au sein de l'ensemble des déplacements : un déplacement sur trois fait moins de 750 mètres, un sur deux moins de 2 kilomètres, deux sur trois moins de 3 kilomètres. Simultanément, sur dix déplacements un seul fait plus de 9 kilomètres. En dépit de la grande taille de l'agglomération, les petits déplacements tiennent donc une place très importante. Nous ne disposons malheureusement pas des données qui permettraient de mesurer l'importance de ce facteur de taille.

II - METHODES LIEES AUX CONSOMMATIONS : EFFETS DES SIMULATIONS

Les simulations avaient pour ambition de suppléer à notre méconnaissance des distances et durées réelles de déplacement en automobile (seules les valeurs correspondant à des parcours porte à porte ont été reconstituées).

Huit jeux "distance, durée" ont donc été définis :

- SIM1 (qui nous servira de référence) renvoie aux valeurs porte à porte,
- SIM2 intègre un effet trajet terminal,
- SIM3 considère l'effet trajet terminal auquel s'ajoute la recherche de stationnement,
- SIM4 se fonde sur une multiplication de la vitesse de déplacement par un coefficient 1,2,
- SIM5, SIM6, SIM7, SIM8 correspondent respectivement à SIM1, SIM2, SIM3, SIM4 enrichis d'un effet de gamme (cf. chapitre IV).

Chaque déplacement s'est vu affecter ici la totalité de la consommation du véhicule sans prise en compte du taux d'occupation correspondant : nous nous intéressons ici à la sensibilité des consommations spécifiques, non à celle des consommations unitaires.

1 - APPROCHE GLOBALE

L'influence des simulations peut tout d'abord être évaluée à partir des différentes consommations moyennes obtenues pour l'ensemble des déplacements en voiture particulière.

TABLEAU 5.2 : Distances moyennes, consommations absolues moyennes, consommations en litres aux cent kilomètres par simulation (SIM1 = 100)

	SIM1	SIM2	SIM3	SIM4	SIM5	SIM6	SIM7	SIM8
Distance	100	96,6	98,9	120,0	100	96,6	98,9	120,0
Consommation absolue	100	95,4	96,5	109,6	101,0	96,3	97,4	110,7
Consommation kilométrique	100	98,8	97,5	91,3	101,0	99,7	98,5	92,2

L'effet des simulations semble à la lecture du tableau 5.2 assez faible, si toutefois l'on écarte les deux valeurs correspondant à une nette augmentation de la vitesse (SIM4 et SIM8). Les distances moyennes diminuent au plus de 3,4 % (par rapport à la solution de référence) tandis que les consommations absolues (exprimées en gep) évoluent entre + 1 % et - 4,6 %. Ces phénomènes ne se cumulant pas, la consommation kilométrique se situe dans une fourchette très resserrée : SIM3 se place à 97,5 et SIM5 à 101,0 (SIM1 étant à 100).

Une forte augmentation des vitesses VP (SIM4 et SIM8) conduit cependant à une baisse sensible de la consommation kilométrique : - 7,8 % et - 8,7 %. Mais ces deux simulations constituent, nous semble-t-il, des cas limites : en effet, elles correspondent à une vitesse moyenne, pour la voiture particulière (déplacement porte à porte) de 22,6 km/h, pratiquement double de celle obtenue lors de l'exploitation de l'enquête ménages (11,4 km/h). Même si la méthode de reconstitution des distances retenue conduit probablement à une sous-estimation des vitesses automobiles, celle-ci n'est probablement que de quelques pour cent et ne risque guère d'approcher vingt pour cent. Ces simulations fournissent ainsi une borne extrême qui ne saurait être atteinte.

L'approche globale montre donc que les simulations ne remettent pas véritablement en cause les résultats obtenus avec les données disponibles dans l'enquête. Précisons enfin qu'il n'y a pas là validation du modèle de consommation retenu et donc des niveaux absolus de consommation obtenus, mais plutôt, à modèle donné, stabilité de ces niveaux.

2 - APPROCHE DESAGREGEE

L'approche globale n'est pas suffisante pour appréhender l'impact des simulations. L'analyse des facteurs déterminants des consommations conduit en effet à rechercher l'influence des différentes modalités de telle ou telle variable sur les niveaux moyens de consommation et pour une variable explicative donnée (le sexe par exemple) à ordonner les modalités en fonction de ces niveaux moyens (proposition 1 : "les hommes consomment, en moyenne, plus que les femmes"). Mais la consommation d'énergie, au moins dans une première approche, est un indicateur quantitatif et l'on peut vouloir mesurer précisément les écarts entre niveaux moyens (proposition 2 : "les hommes consomment, en moyenne, deux fois plus d'énergie que les femmes, alors qu'ils effectuent 1,5 fois plus de déplacements"). Les simulations ont pour objectif de tester la qualité des résultats obtenus et de déboucher sur une évaluation de la précision des écarts observés entre niveaux moyens. Peut-on quantifier plus ou moins exactement ces écarts (proposition 2), faut-il se limiter à la mise en évidence de hiérarchies des modalités

(proposition 1) ou ne peut-on même pas observer de régularités structurelles parce que d'une simulation à l'autre les tendances s'inversent (tantôt les hommes consomment plus que les femmes, tantôt le contraire) ? L'examen de trois variables susceptibles d'influencer le niveau de consommation et qui illustrent bien ces trois alternatives va nous permettre de répondre. Il s'agit du lieu d'habitat, du statut de l'individu et du motif du déplacement. Les consommations absolues moyennes par déplacement, calculées en gep, seront saisies à l'aide d'indices.

Le lieu d'habitat a été regroupé en deux grandes catégories, le centre (Lyon et Villeurbanne) et la périphérie. Les déplacements des individus habitant en périphérie nécessitent en moyenne moins d'énergie que ceux des lyonnais et villeurbannais, si l'on se réfère au jeu de données de base (tableau 5.3).

TABLEAU 5.3 : Influence du lieu d'habitat sur les niveaux moyens de consommation par déplacement.

	Centre	Périphérie
SIM1	100,0	98,0

L'écart entre les deux niveaux obtenus est cependant très faible (2 %) et semble non significatif (rappelons ici les réserves émises sur la précision des distances reconstituées, précision qui est loin d'être aussi bonne !). Conclure à une équivalence de ces niveaux semble plus sage, ce que viennent confirmer les résultats des sept simulations. Dans trois cas (SIM4, SIM5 et SIM8), les habitants du centre sont les plus économes alors que dans les quatre autres (SIM2, SIM3, SIM6 et SIM7) la situation est inverse ; les écarts maxima restent toutefois réduits, la périphérie se situant à 96,0 pour SIM5 et à 103,9 pour SIM2 (Centre = 100).

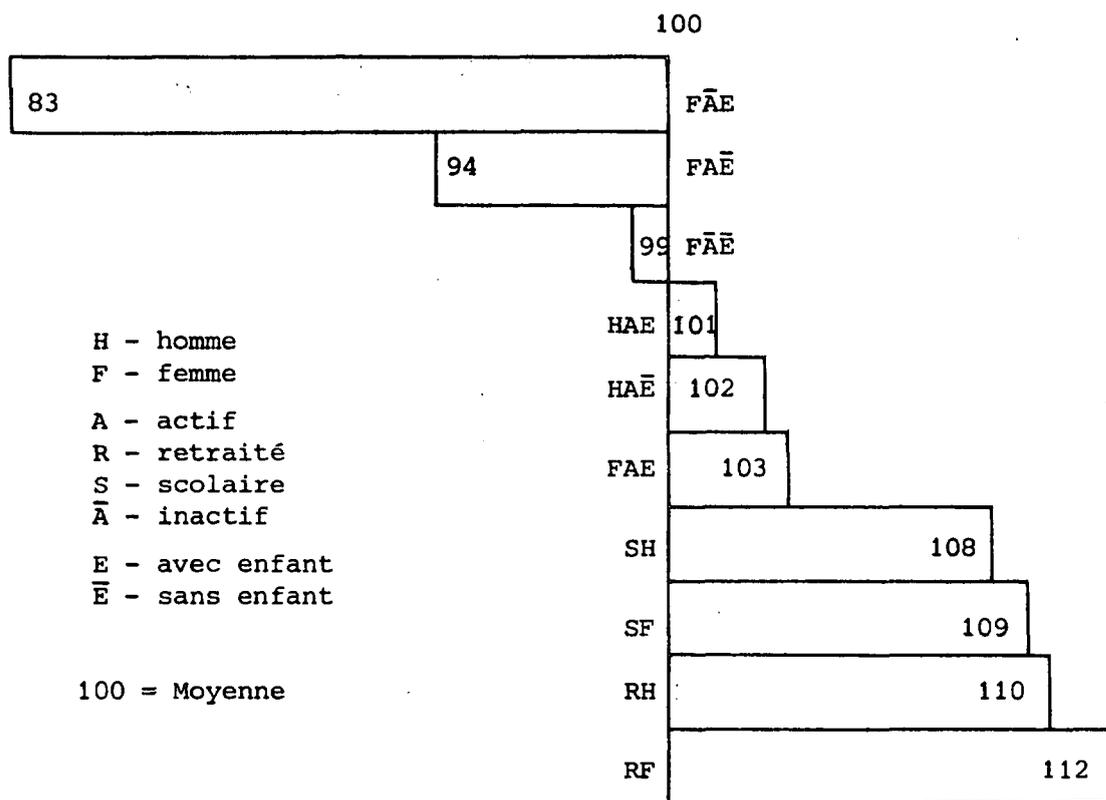
Un écart minime entre les niveaux de consommation de référence ne permet donc pas de mettre en évidence une hiérarchie des modalités, puisque le signe de cet écart n'est pas stable.

La prise en considération du statut de l'individu montre que des écarts plus importants ne sont pas sujets à ces péripéties (figure 5.2). Cette macro-variable qui intègre le sexe, le type d'activité et la présence d'enfant dans le ménage conduit en effet à mettre en évidence à partir du jeu de données de référence quatre catégories assez bien séparées :

- groupe 1 : les femmes inactives avec enfant (indice 83),
- groupe 2 : les femmes actives sans enfant (indice 94),
- groupe 3 : les femmes inactives sans enfant, les hommes actifs avec ou sans enfant et les femmes actives avec enfant (indice

- compris entre 99 et 103),
 - groupe 4 : les scolaires hommes et femmes et les retraités hommes et femmes (indice compris entre 108 et 112).

FIGURE 5.2 : Influence du statut sur le niveau moyen de consommation par déplacement (données de base).



Le tableau 5.4 montre la bonne stabilité de ces catégories lorsque l'on fait intervenir les diverses simulations : en particulier, leurs frontières ne présentent pas de chevauchement.

Une mesure des écarts entre groupes peut même être avancée : le groupe 3 étant pris comme référence, le groupe 1 conduit à des valeurs nettement inférieures (-20 %) tandis que les groupes 2 et 4 ont un comportement symétrique (-8 % et +8 % respectivement).

Mais la hiérarchie à l'intérieur des groupes peut être remise en cause d'une simulation à l'autre (figure 5.3). Ainsi, dans le groupe 3, les hommes actifs avec enfant consomment plus que ceux n'en ayant pas selon SIM6 et SIM7 et moins dans les six autres cas (valeurs dans la situation de référence : 101,2 et 102,5). De même, dans le groupe 4, les scolaires hommes consomment plus que les scolaires femmes dans cinq cas et dépassent même les retraités

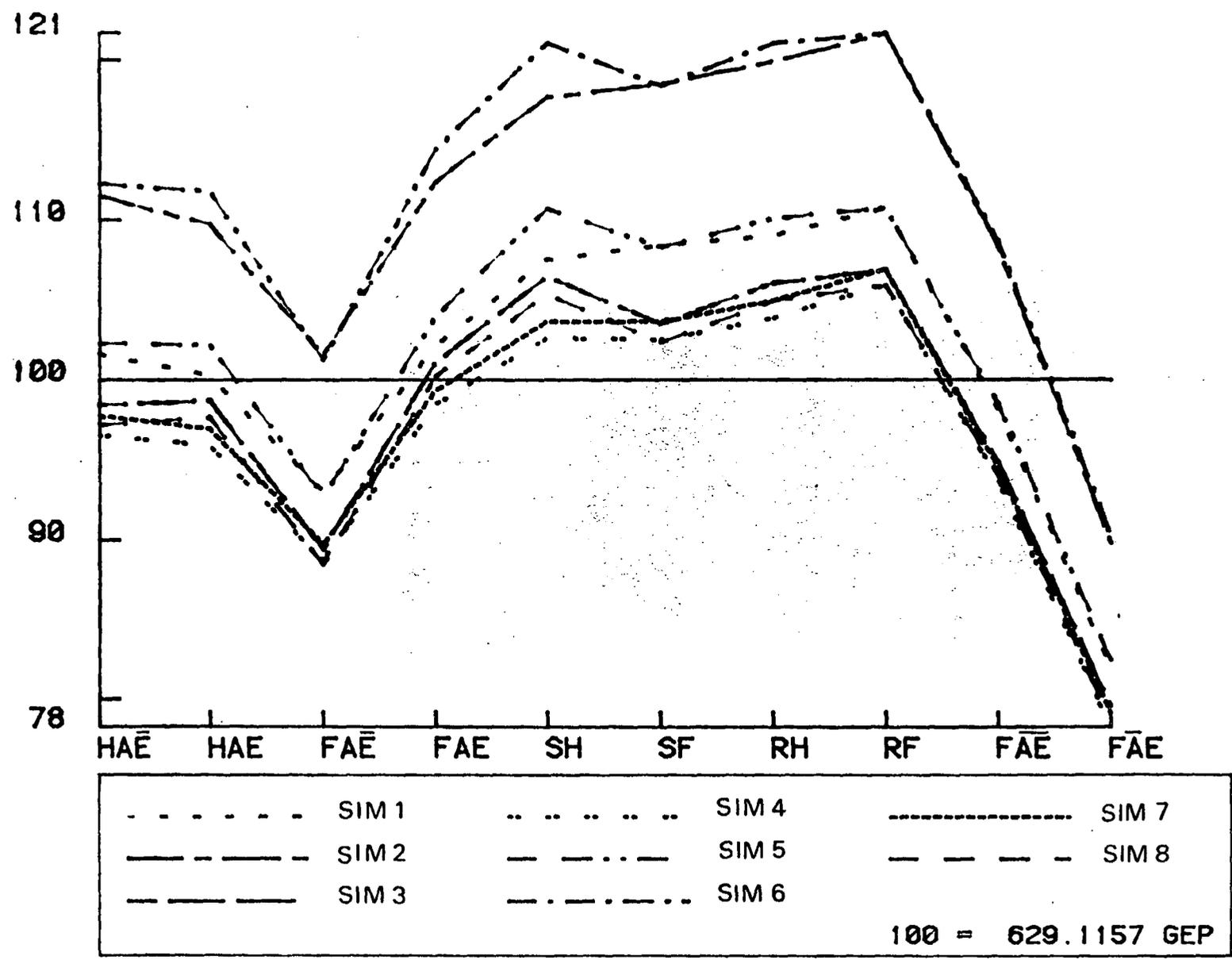


FIGURE 5.3 : CONSOM. VP SELON LE STATUT

hommes dans trois cas (valeurs dans la solution de départ 108,5, 109,4 et 110,0).

TABLEAU 5.4 : Intervalle de variation des niveaux moyens de consommation par déplacement, selon le statut (pour chaque simulation, l'indice 100 correspond à la consommation moyenne).

GROUPE	STATUT	INTERVALLE
1	F \bar{A} E	82,3 - 82,8
2	FA \bar{E}	92,2 - 93,8
3	F \bar{A} \bar{E}	98,3 - 99,7
	HAE	101,0 - 102,3
	HAE \bar{E}	101,8 - 102,6
4	FAE	103,1 - 105,0
	SH	108,3 - 110,6
	SF	107,2 - 109,4
	RH	109,8 - 110,3
	RF	110,6 - 112,0

L'examen de l'influence du statut précise ainsi les résultats obtenus lors de l'étude de l'impact du lieu d'habitat : des écarts de quelques pour cent sont très fluctuants et ne résistent pas toujours aux simulations mais dès qu'ils dépassent les cinq points, ils sont plus fiables et autorisent alors la mise en évidence de hiérarchies pour lesquelles les écarts entre niveaux peuvent être quantifiés.

L'analyse en termes de motif du déplacement confirme ces enseignements. La typologie retenue (qui sera explicitée par la suite) se traduit par des consommations moyennes par déplacement bien différenciées, sauf peut-être pour les déplacements domicile-travail et domicile-école. (Figure 5.4).

Cette hiérarchisation des motifs perdure au fil des simulations. Les valeurs obtenues, rapportées à la consommation moyenne tous motifs confondus, évoluent peu et les intervalles de variation ne se recoupent pas, même dans le cas le plus défavorable : la consommation moyenne école est toujours supérieure à la consommation moyenne travail (tableau 5.5). Mais il serait hasardeux de vouloir préciser trop cet écart, et les deux consommations peuvent être considérées comme équivalentes.

FIGURE 5.4 : Influence du motif sur le niveau moyen de consommation par déplacement (données de base).

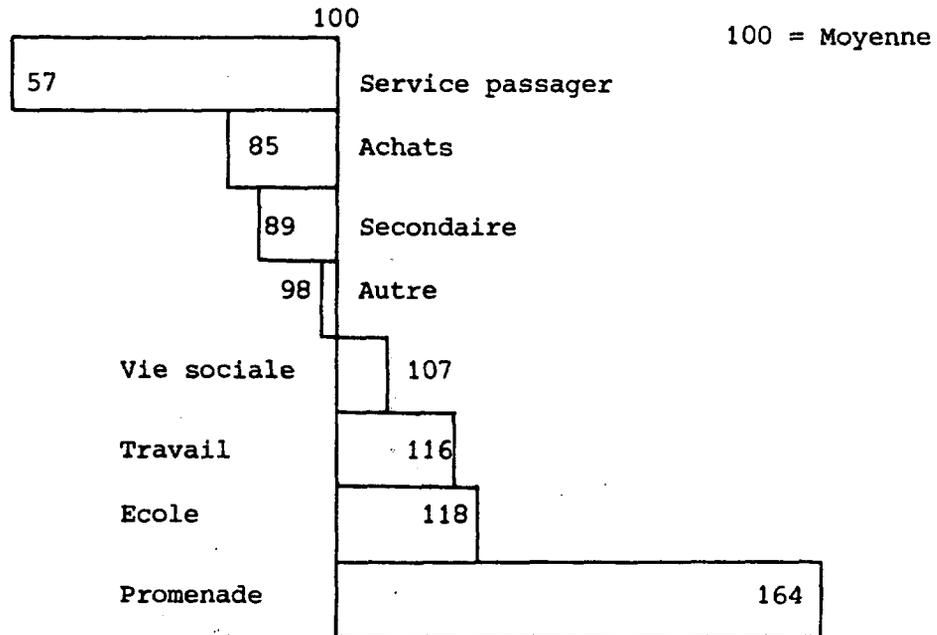


TABLEAU 5.5 : Intervalles de variation des niveaux moyens de consommation par déplacement selon le motif (pour chaque simulation, l'indice 100 correspond à la consommation moyenne).

MOTIF	INTERVALLE	MOTIF	INTERVALLE
Service passager	56,0 - 58,2	Vie sociale	105,9 - 106,7
Achats	84,4 - 86,3	Travail	115,5 - 116,0
Secondaires	88,8 - 90,0	Ecole	117,2 - 119,2
Autres motifs	97,1 - 98,9	Promenade	162,5 - 166,9

Ainsi, dans le cas du motif, la hiérarchie issue des données de base n'est nullement modifiée par la prise en compte des différentes simulations : la figure 5.5 le montre clairement, s'il en était encore besoin. Qui plus est, les écarts entre motifs sont assez facilement quantifiables. L'examen des influences du lieu.

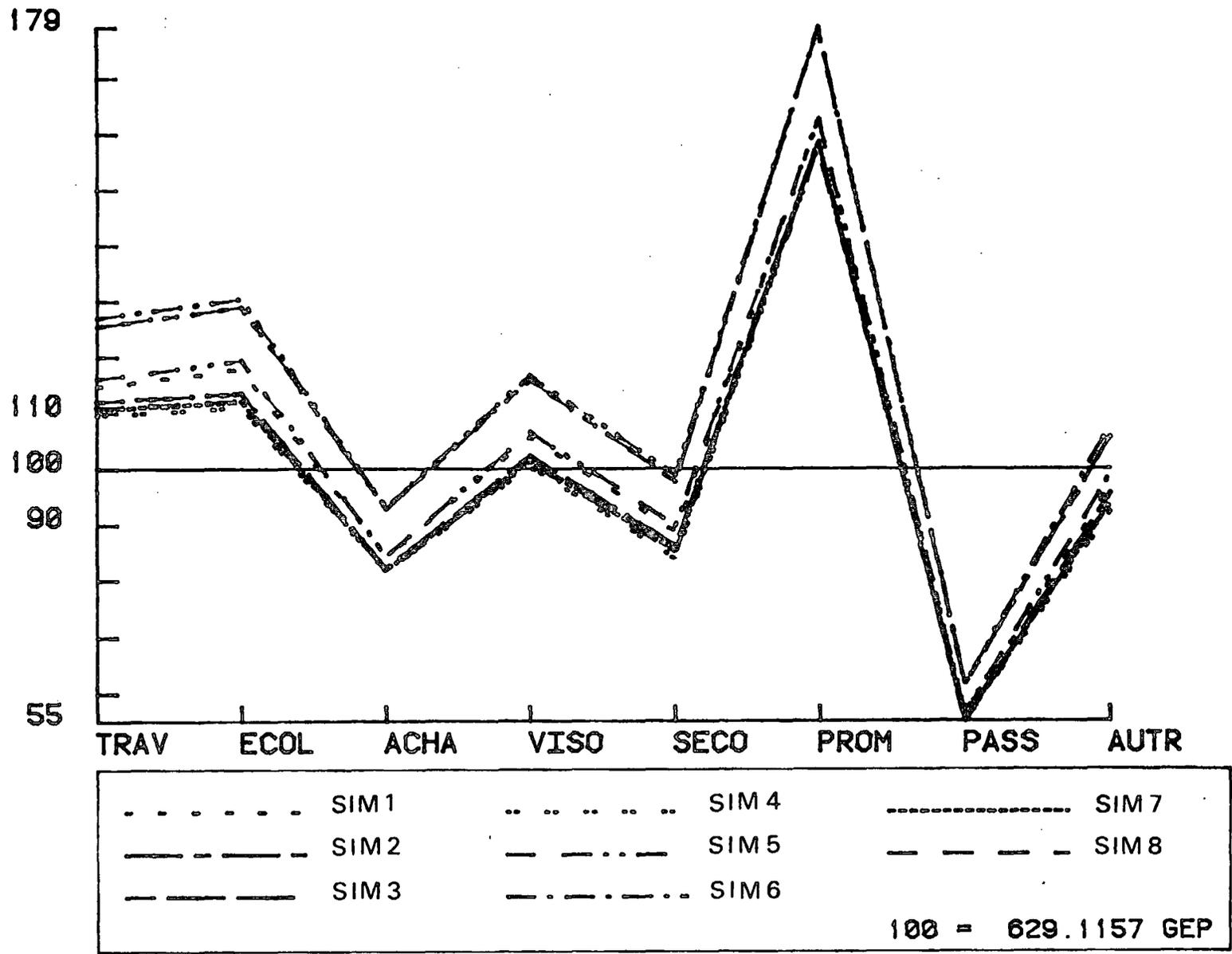


FIGURE 5.5 : CONSUM. VP SELON LE MOTIF

d'habitat et du statut incitent toutefois à une certaine prudence et des écarts trop faibles ne doivent pas être considérés.

3 - CONCLUSION

Les simulations étaient un moyen de tester la qualité de nos résultats. Aussi bien dans une approche globale que dans une approche désagrégée, ceux-ci ne sont pas remis en cause. Leur fiabilité semble même élevée : l'influence de tel ou tel indicateur socio-économique, dès lors qu'il conduit, pour ces diverses modalités, à des niveaux de consommation différenciés, apparaît nettement et les écarts entre ces niveaux peuvent être mesurés avec une précision satisfaisante. Les simulations nous montrent cependant que des écarts de quelques pour cent ne sont pas significatifs.

Il va donc nous être possible maintenant de rechercher les facteurs déterminants des consommations transport en ne nous intéressant qu'aux seuls résultats issus des données de base.