

| Certu

MODÉLISATION DES DÉPLACEMENTS URBAINS DE VOYAGEURS

Guide des pratiques

Mars 2003

Centre d'études sur les réseaux, les transports,
l'urbanisme et les constructions publiques

Direction des transports terrestres



Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE



ministère
de l'Équipement
des Transports
du Logement
du Tourisme
et de la Mer

Collection Références

Cette collection comporte les guides techniques, les ouvrages méthodologiques et les autres ouvrages qui, sur un champ donné assez vaste, présentent de manière pédagogique ce que le professionnel courant doit savoir.

Le sujet de l'ouvrage s'adresse plutôt aux professionnels confirmés.

Le Certu s'engage sur le contenu mais la nouveauté ou la difficulté des sujets concernés implique un certain droit à l'erreur.

Ce sont des documents permettant une transmission rapide de l'information grâce à une mise en page standardisée.

Le Certu publie aussi les collections : débats, dossiers, rapports d'étude, enquêtes et analyses.

Catalogue des publications disponible sur <http://www.certu.fr>.

Remerciements

Cet ouvrage a été rédigé par le bureau d'études SETEC, principalement par Alain Bloch (chap. 1, 2, 5 et 6), Jean-Christophe Gallician (chap. 3 et 4), et Didier Revillon (chap. 7).

Thierry du Crest (responsable de la publication) du Certu a participé à la rédaction.

La Direction des Transports Terrestres (DTT) – en les personnes d'Olivier Nalin et Nicolas Recotillon – a assuré le financement.

Le Certu a bénéficié des commentaires avisés de Patrick Bonnel (LET) et Eric Saliou (Cete de Lyon), tout au long de la rédaction de l'ouvrage ; nous leur présentons nos remerciements sincères.

Les personnes suivantes ont également accepté de relire l'ouvrage et de faire leurs commentaires au cours d'une journée d'échange le 5 mars 2002. Nous les remercions vivement.

Jimmy Armoogum (Inrets), Jacques Bognol (Cete de l'Ouest), Lionel Clément (Isis), Marilyne Combes (Dreif), Nicolas Crossonneau (Certu), Fabienne Dejean (Cete Méditerranée), Jean Delons (Cofiroute), Hugues Duchâteau (Stratec), Pascal Gabet (Cete Nord Picardie), Fabrice Hasiak (Cete Nord Picardie), Pierre-Yves Hennebel (Isis), Fabienne le Hellaye (Certu), Christian Lebondider (Certu), Fabien Laurent (Setra), Vincent Lichère (Semaly), Jean-Loup Madre (Inrets), Claudine Mazel (Ratp), André Moreau (Dde 59), Jane Noppe (Ademe), André Nourisson (Cete du Sud Ouest), Jacques Nouvier (Certu), Patrick Palmier (Lille Métropole), Julie Raffailac (Dreif), Charles Raux (Let), Henri Saisset (Systra), Catherine Saut (Ratp).

Sommaire

Introduction	5
Chapitre 1. La modélisation : pour quoi et comment faire ?	7
Chapitre 2. Zonage et réseaux	29
Partie A : Modélisation de l'aire d'étude : le zonage	31
Partie B : Modélisation des réseaux	36
Chapitre 3. Estimation de la demande en situation de référence	57
Chapitre 4. Estimation de la demande future	103
Chapitre 5. Choix modal	119
Chapitre 6. Affectations VP	149
Chapitre 7. Affectations TC	167
Annexes	189
Table des matières	229
Table des figures	240
Récapitulatif des tableaux	241

Introduction

La modélisation des déplacements de voyageurs en milieu urbain est au cœur des enjeux de planification et d'évaluation des projets. C'est un outil d'analyse des politiques urbaines et des projets de transport, au service de l'aide à la décision. Il n'existe pourtant pas à ce jour d'ouvrage de référence en français, sur la modélisation des déplacements.

Le Certu a souhaité combler ce vide avec ce document qui fait le point sur la pratique des différents modèles que l'on peut mettre en œuvre dans les logiciels classiques du marché.

Le document est un guide et non pas un livre de cours ou un outil de formation. Il s'adresse donc à des personnes ayant déjà les notions de base. En revanche, les auteurs ont souhaité apporter des réponses pratiques aux questions que peut se poser le modélisateur :

Quelles données ? Comment « caler » sérieusement ? Comment prendre en compte tel phénomène ? Y a-t-il d'autres méthodes que la mienne ? Quelles sont les limites de mon calcul ?

Le guide s'adresse donc en premier lieu aux praticiens, même si un maître d'ouvrage désireux de se plonger dans les aspects techniques pourra y trouver de quoi dialoguer avec les maîtres d'œuvre : vérifier le contenu des modèles proposés, préparer les données nécessaires, connaître les limites des modèles.

Le document aborde peu les questions théoriques, ce que fait un ouvrage tout à fait complémentaire en cours de publication. Il s'agit d'un manuel de formation accompagné d'un didacticiel réalisé dans le cadre du PREDIT¹. Si les chapitres qui suivent ne font pas explicitement référence à cet ouvrage, c'est qu'il n'était pas encore paru lors de la rédaction du présent guide. Dans notre esprit, toutefois, le manuel de formation et ce guide de modélisation sont cohérents et s'enrichissent mutuellement.

Le Certu responsable de la publication de cet ouvrage s'est résolument attaché à ce que l'ouvrage ne reflète pas une préférence pour telle ou telle méthode, mais en présente plutôt les principes et les zones de pertinence. Un bureau d'étude peut tout à fait avoir raison de préférer une méthode plutôt qu'une autre, dans la mesure où il est capable de le justifier et où son choix correspond aux souhaits du maître d'ouvrage et aux moyens mis en œuvre par celui-ci. Ainsi, nous avons souhaité être le plus complet possible pour ne pas défavoriser les pratiques de tel ou tel, et avons consulté les principaux bureaux d'études spécialisés en France pour nous en assurer.

Enfin, ajoutons qu'il serait préjudiciable à la modélisation de ne pas retenir telle ou telle méthode sur le seul fait de ses limites ; chaque méthode se base sur des principes comportementaux différents et raconte donc une histoire différente. Le choix de la méthode doit d'abord être dicté par la teneur des questions posées au modèle ; les limites doivent ensuite être considérées lors de l'analyse des résultats et de leur interprétation.

L'ouvrage est composé de 7 chapitres qui reprennent les grandes étapes de construction d'un modèle : architecture, constitution des zonages et réseaux, estimation de la demande actuelle et future, choix modal, affectation des déplacements en véhicules particuliers, affectation des déplacements en transports collectifs. Chaque chapitre présente les modèles les plus classiques, parce qu'ils sont faciles à mettre en œuvre, ou qu'ils sont disponibles dans les logiciels spécialisés. Pour tenter de cerner les avantages et limites de validité de ces modèles, chaque chapitre présente un tableau récapitulatif des différentes méthodes recensées. Enfin, nous abordons les questions de calage, de validation ou des problématiques particulières qui peuvent se présenter

¹ Travail réalisé par P. Bonnel (LET) pour le manuel et P. Odent (MVA) et H. Julien (IMTrans) pour le didacticiel [Bonnel, 2002].

couramment. Chaque chapitre se clôt par quelques références bibliographiques francophones ou anglophones pour le lecteur désireux d'en savoir plus.

Nous espérons que ce guide répond aux attentes des modélisateurs et remplit son objectif de clarté et de rigueur.

Chapitre 1. La modélisation : pour quoi et comment faire ?

Mots clés :	
<u>Modèle de déplacement</u>	Représentation schématique et mathématique des processus de déplacement, intégrant un ensemble d'hypothèses, de bases de données et d'outils mathématiques.
<u>Offre de transport</u>	Ensemble des moyens de transports existants ou projetés représentés dans un modèle par leurs caractéristiques physiques, tarifaires et/ou fonctionnelles (géométrie, capacité, vitesse, fréquence, effet d'image, etc.)
<u>Demande de déplacement</u>	Flux de déplacements, avérés ou potentiels, dans l'aire d'étude, généralement sous la forme de matrices origine-destination. Le terme « demande » peut aussi faire référence aux auteurs des déplacements.
<u>Logiciel</u>	Outil informatique permettant de mettre en œuvre des modèles de déplacement, de représenter le système d'offre de transport et d'affecter la demande sur le (ou les réseaux) de transport selon des algorithmes variés et de visualiser les résultats.
<u>Calage</u>	Reconstitution au mieux par le modèle des phénomènes réels tels qu'ils peuvent être mesurés (débit, temps de parcours, flux origine-destination, taux de correspondance pour un modèle TC, répartition modale pour un modèle multimodal)
<u>Validation</u>	Vérification de certains résultats du modèle dès sa constitution (ou peu de temps après) de manière à juger s'il est réaliste et cohérent

Le présent chapitre introductif s'interroge d'abord sur l'intérêt et la pertinence de la modélisation (§ 1), avant de décrire brièvement les principes généraux des modèles (§ 2) qui sont repris en détail dans les **chapitres 2 à 7**, puis évoque sommairement les différents outils existants (§ 3) avant de présenter les méthodes d'évaluation des risques et incertitudes inhérents à toute modélisation (§ 4).

1. L'utilité et l'usage de la modélisation des déplacements

1.1 Pourquoi des analyses de déplacements ?

Les réflexions en matière d'organisation des déplacements urbains et d'aménagement de la ville nécessitent des analyses permettant d'orienter et d'évaluer les différentes politiques possibles, d'apprécier la demande de déplacements tous modes, de concevoir au mieux les projets d'infrastructures et/ou d'exploitation des systèmes de transport qui s'en déduisent, en recherchant la meilleure adéquation offre/demande, tout en respectant d'autres objectifs parfois imposés par la loi (par exemple en termes d'effets sociaux et économiques, de rentabilité ou de limitation des nuisances dues au transport).

L'évolution de la planification urbaine dans le domaine des transports et de l'aménagement (PDU, SCOT, DTA, schémas de services) rend de plus en plus souvent indispensable une approche multimodale des problèmes (prise en compte des différents modes de transport). Parallèlement, les contraintes financières ou environnementales et le besoin de justifier les choix publics nécessitent une description quantifiée et rigoureuse du système de transport. Ainsi, alors que jusqu'à maintenant de très nombreuses études de déplacements se limitaient à des études de trafic monomodales et destinées à dimensionner les ouvrages, les modélisations des systèmes de transport urbain sont de plus en plus souvent multimodales et intermodales (on entend par pratique intermodale l'usage de plusieurs modes de transport au cours d'un même déplacement), et participent à des réflexions plus larges.

Concrètement, les analyses de déplacements répondent donc à divers besoins qui ont d'ailleurs évolué avec le temps, notamment :

- la stratégie en matière de politique de transport,
- l'élaboration de documents de planification (PDU, SCOT, ...),
- la programmation (échancier chiffré des investissements),
- la compréhension des comportements de mobilité, de l'usage des modes,
- l'évaluation économique,
- la rentabilité financière,
- la conception et le dimensionnement des réseaux,
- l'évaluation des impacts environnementaux des déplacements (bruit, pollution de l'air, etc.).

1.2 Pourquoi des modèles ?

Dans la plupart des cas, les décisions relèvent du politique et sont fondées sur une bonne connaissance du contexte local et sur une compréhension des mécanismes régissant les déplacements qui repose sur le bon sens, nécessaire, mais parfois trompeur. En particulier il est difficile pour un utilisateur d'un système de transport, ayant donc sa propre expérience et ses propres habitudes, d'avoir une bonne compréhension « statistique » des mouvements de masse. En effet, les phénomènes qui gouvernent le comportement des individus sont complexes, et des conséquences insoupçonnées, quelquefois contraires aux objectifs visés, peuvent découler des décisions en matière de transport et d'urbanisation. De plus, l'impact important de ces projets à la fois sur les finances publiques et sur le vécu des populations, rend encore plus nécessaire l'utilisation d'outils capables de quantifier et permettant de rationaliser les choix, et qui ont prouvé leur pertinence.

L'objectif d'un modèle est donc de schématiser le mieux possible des phénomènes complexes, souvent mal connus : comportements humains (qu'on suppose avoir une certaine pérennité), espace anisotrope, occupation du sol diversifiée, modes de transport multiples, véhicules variés, motifs de déplacement différents, revenus disparates, trafic variable selon la saison, le jour et l'heure de la journée, évolutions futures... et de contribuer à l'évaluation des choix publics. L'énoncé précédent laisse cependant supposer la difficulté de l'exercice et les critiques dont il peut être l'objet. Aussi, un modèle ne saurait se substituer au savoir-faire et au jugement de l'ingénieur et du décideur, ni occulter les autres outils utiles à l'évaluation (sur les plans social, économique, environnemental, politique...).

Il faut ici souligner l'absolue nécessité de réfléchir, avant tout développement et toute investigation technique, à l'usage qui sera fait du modèle envisagé, compte tenu des objectifs identifiés et de ceux qui pourraient apparaître ultérieurement. La tendance actuelle est en effet à la sophistication des modèles, favorisée par les nombreuses possibilités des outils du marché. Il ne s'agit pas tant ici de choisir le logiciel mais plutôt de définir la nature et le niveau de détail des résultats attendus et d'en déduire le type de modèle, la précision de ses composants, les recherches de données afférentes (nature, durée, coût) et l'organisation humaine et matérielle à mettre en place. Dans cet esprit, les facilités de maintenance et d'amélioration progressive du modèle constituent un critère de choix de première importance : un modèle doit « vivre ». Mentionnons enfin les premières expériences en France d'études de définition ou d'études d'opportunité dans le domaine de la modélisation des déplacements : ces études permettent d'exprimer préalablement l'ensemble des questions, de positionner le modèle existant ou à venir par rapport aux besoins de l'ensemble des acteurs de l'espace urbain concerné².

1.3 Des précautions à prendre

Qui dit schématisation suppose nécessairement simplification et risque de caricature, écueil qu'il faut éviter en s'appuyant le plus possible sur des relevés physiques ou des données d'enquêtes vérifiables, et en explicitant et contrôlant toutes les étapes du processus de modélisation : description, analyse et projection de la demande, description de l'offre de transport, hypothèses de croissance et d'évolution des réseaux, choix du modèle d'affectation et des principaux paramètres, calage,... Dans la limite du budget de l'étude, **tout ce qui peut être vérifié doit l'être au moyen de mesures, d'enquêtes et de reconnaissance de terrain !** Corrélativement, de manière à bien juger de la pertinence des résultats obtenus, il paraît indispensable que le modélisateur présente de façon complète, transparente et détaillée son recueil de données, le traitement qu'il en a effectué et les conséquences qu'il en a tirées pour sa modélisation.

1.4 La distinction entre modèle et logiciel

Le modèle est un processus global faisant appel à des hypothèses, des bases de données, des formulations mathématiques, et nécessitant un travail d'exploitation et d'interprétation des résultats. Il peut être constitué de sous-modèles plus ou moins complexes traitant des points particuliers de la problématique (par exemple pour tout ce qui touche aux répartitions modales). Le recours à l'outil informatique, c'est-à-dire à un ou des logiciels, est en premier lieu motivé par la multiplicité et la complexité des calculs. Celui-ci, il est vrai, offre également des modules d'exploitation des résultats

² Voir le document du CERTU, à paraître en 2003. "Engager une nouvelle modélisation multimodale. L'expérience toulousaine" (titre provisoire)

permettant une compréhension plus fine des résultats, mais les raffinements et la qualité des interfaces graphiques ne doivent pas conduire le modélisateur à négliger son travail de conception et de contrôle. Dans cet esprit, l'habitude fréquente d'assimiler le logiciel au modèle est abusive.

1.5 Un outil d'aide à la décision

Moyennant les précautions citées ci-dessus ainsi qu'une transparence totale (sur les hypothèses, les méthodes, les résultats), le modèle constitue un puissant outil d'aide à la décision qui, s'il est utilisé avec esprit critique, permet d'évaluer l'impact de telle ou telle option, et la sensibilité aux différents paramètres³.

2. Principes généraux des modèles

2.1 Les phases d'une étude de déplacements

2.1.1 Résumé de la démarche

- (i) Tout étude de déplacements à l'aide d'un modèle comprend :
 - un ou plusieurs zonages imbriqués, chaque zone étant supposée homogène (voir *chapitre 2*) ;
 - une représentation de l'offre de transport, souvent mais non nécessairement sous forme de graphe (arcs et nœuds) : longueur, vitesse, fréquence ou tables horaires pour les TC... (voir *chapitre 2*);
 - une représentation de la demande de déplacements, généralement⁴ sous forme de matrices origine-destination (OD) par période temporelle, entre les zones préalablement définies, et ce globalement et/ou pour chaque mode pris séparément (voir *chapitres 3, 4 et 5*);
 - une affectation de la demande sur le (ou les) réseau(x), (voir *chapitres 6 et 7*).
- (ii) Enfin, quand le modèle est calé, et si possible validé (voir §2.1.3), il convient de procéder à des projections à des horizons plus ou moins proches, en faisant évoluer la demande, l'offre et les différents paramètres régissant l'affectation (valeurs du temps...). Les calculs des évolutions en question peuvent eux-mêmes se référer à des modèles, en particulier en ce qui concerne les évolutions probables de la demande. Il convient enfin d'estimer la précision des résultats (voir §4).

2.1.2 Phase de reconstitution des matrices en situation de référence

Les matrices de déplacements internes en situation de référence peuvent être:

- soit modélisées,
- soit issues d'enquêtes.

- **Dans le premier cas (modélisation)**, les émissions et attractions sont calculées à partir des données socio-économiques (population, population active, emploi,...), et de différents paramètres (mobilité par personne, par actif, taux de présence au

³ Pour les aspects importants de présentation et communication des résultats, voir le document du CERTU, Collection Référence, 2001. "Représentation cartographique. Guide méthodologique."

⁴ Mais pas systématiquement, en particulier dans le cas des modèles désagrégés.

travail,...) généralement calculés à partir d'enquêtes et qui tiennent compte de la taille de la ville, du type d'urbanisation.

Les formules de distribution sont-elles aussi calculées à partir d'enquêtes (fonction de la distance ou du temps, ou du coût généralisé entre zones).

Un modèle de choix modal est alors nécessaire.

- **Dans le deuxième cas**, les enquêtes redressées permettent de construire des matrices, soit tous modes, soit par mode. Certaines cases des matrices peuvent être soit vides, soit partiellement remplies; dans ce cas, il est généralement d'usage de sélectionner les cases où tous les déplacements ont pu être identifiés, et de rechercher sur ces données connues une formulation (par exemple une régression) permettant de relier les trafics interzonaux aux données socio-économiques des zones et aux caractéristiques du réseau (ce qui s'apparente alors à un modèle de génération/distribution ou génération/distribution/choix modal combiné). Des précisions sur cette méthode sont incluses dans les *chapitres 3 et 4*. Une autre possibilité de remplir les cases vides consiste, si l'on suppose que les marges d'émission et d'attraction issues des enquêtes sont bonnes, à lisser les matrices en redistribuant les flux, tout en conservant les marges et en respectant la distribution par tranches de distance issue également de l'enquête.

- Signalons en outre que les deux approches peuvent être utilisées de manière complémentaire : on utilise alors la modélisation des matrices pour analyser la demande et les matrices reconstituées pour l'affectation.

Une fois les matrices de déplacement construites, l'étape d'affectation permettra de les valider (et si nécessaire de les recalculer), car le trafic affecté sur les réseaux doit être cohérent avec les observations issues des comptages : il y a donc itération entre la construction de la demande, celle du réseau et l'affectation (voir *chapitres 3 et 6*). Cette boucle de rétroaction est théoriquement indispensable dans le modèle à quatre étapes puisqu'une matrice de coûts généralisés est nécessaire à la génération-distribution.

2.1.3 Calage et validation

La terminologie est parfois floue et les termes calage et validation peuvent être mal compris. C'est pourquoi nous proposons ici une définition permettant de distinguer les deux termes.

A toutes les étapes, le modèle doit être calé pour une ou plusieurs périodes de référence (un horizon récent et une ou plusieurs périodes temporelles). Par caler, on entend reconstituer au mieux les phénomènes réels (débit, temps de parcours, flux origine-destination, taux de correspondance pour un modèle TC, répartition modale pour un modèle multimodal), ce qui impose de disposer de mesures propres à chacun de ces critères, pour les périodes considérées. Cette condition est nécessaire – mais non suffisante – pour espérer disposer de résultats significatifs : il existe en effet deux risques d'erreur possibles :

- le fait que le modèle soit calé n'implique pas que l'ensemble des paramètres soit correct,
- la projection dans le futur de la demande, de l'offre et des paramètres comportementaux est toujours relativement hasardeuse.

La phase de calage permet de donner une valeur à tous les paramètres utilisés dans le modèle (mobilité, caractéristiques du réseau, valeur du temps,...). Le calage fait en général appel à des procédures d'analyse de données et de statistiques ; il pourra être plus ou moins automatisé (voir *Chapitre 6 § 3.2*) sous réserve de garder un œil critique, car les ajustements effectués lors du calage doivent répondre essentiellement à une logique physique, économique et comportementale, et non à une logique purement mathématique. En l'absence de données fiables et précises, un modèle pourra toujours être construit, mais il ne sera lui-même ni fiable, ni précis.

Dans cette optique, l'idéal est de pouvoir procéder, après le calage, à la **validation** du modèle. La phase de validation consiste à juger de la validité du modèle pour savoir s'il est réaliste et cohérent. Plusieurs méthodes, complémentaires, sont envisageables :

- comparaison entre prévision et réalisation : alors que la plupart des modèles sont constitués pour se projeter dans l'avenir, il s'agit de la validation la plus pertinente, puisqu'elle permet de déceler les faiblesses, les limites de validité et les pistes de progrès ; ceci suppose cependant un certain recul temporel qu'on ne possède que rarement. On peut également reconstituer une situation passée sur laquelle on possède un jeu de données.
- utilisation d'un jeu de données complémentaires non utilisées dans le calage : cette méthode permet d'avoir une réelle confiance dans le modèle ; cependant, la rareté des données disponibles n'autorise généralement pas le modélisateur à n'en utiliser qu'une partie lors du calage. Une autre possibilité consiste à observer les réactions du modèle par rapport à une variable non utilisée : si la variable « sexe » n'a pas servi au modèle de génération, on pourra analyser les résultats des sous-populations hommes et femmes (sous réserve de disposer de tous les paramètres et données du modèle par sexe).
- plausibilité des résultats prédits : cette méthode consiste à juger, à dire d'expert ou par comparaison avec des cas analogues connus, de la plausibilité des résultats prédits (par exemple, l'évolution des parts de marché ou des élasticités).
- cohérence d'ensemble : on s'assure que les grands indicateurs correspondent aux observations : total des matrices, part de marché par macro-zones, distance moyenne de déplacement, etc.

Dans la pratique, les deux dernières méthodes de validation sont presque toujours applicables, tandis que les deux premières le sont plus rarement. Ceci est particulièrement vrai quand le modèle est créé ex-nihilo ; à la fois pour des raisons de temps et de disponibilité insuffisante de données.

2.1.4 Phase de prévision

- (i) Lors de la phase de calage-validation, une matrice a été construite, qui a permis de reconstituer la situation de référence. Toute évolution dans le futur doit tenir compte de cette matrice ; en effet la demande se modifiera en fonction de divers facteurs :
- évolution géographique de la population et de l'emploi,
 - évolution de la mobilité,
 - évolution de l'offre des différents modes,
 - évolution de la congestion des divers réseaux,

qui influent différemment sur la matrice de référence :

- croissance « naturelle » globale (marge de la matrice),

- répartition horaire des déplacements,
- structure géographique des déplacements,
- induction / désinduction.

Les matrices futures pourront être construites de différentes manières (voir *chapitre 4*) :

- en reprenant les étapes de génération – distribution - choix modal qui ont servi à construire la matrice initiale, avec bien sûr de nouvelles données socio-économiques, mais également avec des paramètres qui peuvent évoluer (mobilité, répartition horaire,...) ; dans ce cas, il convient toutefois de vérifier la cohérence de la matrice obtenue avec la matrice de référence (croissance globale, croissance par macrozones, etc.).
- directement à partir de la matrice de référence calée, en plusieurs étapes :
 - croissance globale, issue d'un modèle économétrique ou de motorisation ;
 - déformation de la matrice en fonction d'hypothèses sur les variables socio-économiques (essentiellement populations, emplois) ;
 - hypothèses d'évolution sur la répartition horaire du trafic (étalement des pointes) ;
 - estimation des reports modaux et de l'induction/désinduction en fonction de l'offre future (modèle d'élasticité).
- dans le cas où les deux méthodes sont utilisées, on déforme la matrice de référence calée en utilisant les évolutions obtenues entre la matrice modélisée de référence et la matrice modélisée en projection (méthode dite du point pivot).

Le tableau suivant présente les avantages et limites des différents types de construction de la demande future.

Type de construction	Principe comportemental	Avantages	Limites
Réutilisation séquentielle du modèle à quatre étapes	<ul style="list-style-type: none"> • Pérennité des lois de génération et de distribution 	<ul style="list-style-type: none"> • Analyse des comportements et de l'évolution de la demande • Intègre d'éventuelles modifications structurelles de l'offre ou des comportements 	<ul style="list-style-type: none"> • Ne tient pas directement compte du calage de l'affectation • Risque d'aboutir à une situation sans rapport direct avec la solution de référence, même à un horizon proche (5 ans par exemple) • Difficulté de prévoir l'évolution des paramètres
Croissance et déformation de la matrice de référence calée	<ul style="list-style-type: none"> • Évolution de la situation initiale 	<ul style="list-style-type: none"> • Base de travail fiable, en particulier pour les problématiques liées à l'affectation • Évolution « continue » de la demande • Nécessite un nombre restreint de données 	<ul style="list-style-type: none"> • Peut ne pas rendre compte d'une modification importante du système de transport ou des comportements. Ne permet pas d'analyser finement les évolutions de la demande
Combinaison des 2 méthodes	<ul style="list-style-type: none"> • Évolution de la situation initiale en supposant pérennes les lois de génération et de distribution 	<ul style="list-style-type: none"> • Avantages des 2 méthodes précédentes 	<ul style="list-style-type: none"> • Plus lourde à mettre en œuvre

Tableau 1 Récapitulation des différentes méthodes de reconstitution des matrices en projection.

- (ii) Les hypothèses sur l'évolution des réseaux sont généralement basées sur des documents de planification et des entretiens avec les autorités responsables. Elles doivent, dans le cas de l'étude d'un projet spécifique, s'efforcer d'être réalistes et représenter la situation future la plus probable, telle qu'on peut l'envisager au moment de la modélisation⁵. Dans le cas où l'on teste des scénarios contrastés de développement des transports, cette contrainte ne s'applique plus aux scénarios eux-mêmes, mais reste valable pour la description de leurs performances.

⁵ On pourra utilement se référer à la notion de « réseau de référence » développée dans le rapport Boiteux *Transports : choix des investissements et coûts des nuisances*, Commissariat Général du Plan-juin 2001-la Documentation Française

- (iii) Les hypothèses d'évolution des paramètres comportementaux (ex : valeur du temps) doivent être clairement explicitées.

2.2 Architecture générale

2.2.1 Remarque préliminaire

Très souvent, le modèle est une construction complexe élaborée à partir d'éléments épars et partiels : en cela, le travail du modélisateur peut être comparé à celui du paléontologue qui doit reconstituer la physionomie d'un dinosaure à partir d'un morceau de son omoplate gauche, ou à celui de l'astrophysicien qui explique l'origine de l'univers et imagine son évolution en interprétant les signaux lancés par une étoile située dans une lointaine galaxie. Pour hardies que soient ces images, elles nous paraissent utiles pour mettre en valeur le nécessaire esprit scientifique du bon modélisateur et pour susciter sa modestie. Il s'ensuit également que celui-ci est avant tout tenu à une obligation de moyens.

2.2.2 Les quatre étapes classiques

- (i) Les quatre étapes (sous-modèles) classiques de la modélisation sont :
- la génération : évaluation du volume de déplacements émis et attirés globalement par chacune des zones ; pour le passage des déplacements en VP au trafic VP, il ne faut pas oublier de tenir compte du taux d'occupation des véhicules ;
 - la distribution : répartition géographique des flux (par origine-destination) ;
 - le choix modal : répartition de la demande globale selon les différents modes ;
 - l'affectation sur les différents réseaux.

Dans la pratique, on ne suit pas forcément l'enchaînement de ces quatre étapes, même si, implicitement, elles figurent toujours d'une manière ou d'une autre dans la modélisation, en étant parfois conjointes (génération-distribution à l'aide d'un modèle gravitaire, choix modal-distribution à l'aide d'un modèle logit par exemple).

- (ii) Le choix horaire peut être effectué à différents stades :
- soit directement lors de la génération,
 - soit entre la distribution et la répartition modale,
 - soit entre la répartition modale et l'affectation.
- (iii) Il semble également utile ici de distinguer les deux grandes phases de la modélisation que sont le calage dans la situation de référence et la projection dans l'avenir.

2.2.3 Boucles de rétroaction

En pratique, les quatre étapes décrites ci-dessus ne s'enchaînent pas simplement de manière séquentielle : des boucles de rétroaction sont nécessaires, en particulier pour obtenir un calage correct qui résulte très généralement d'itérations entre construction de la demande, description du réseau et affectation. Comme nous l'avons déjà signalé, le modèle à quatre étapes nécessite théoriquement une telle itération puisqu'une

matrice de coûts généralisés est nécessaire à la génération-distribution, et cette matrice ne peut que résulter de l'affectation d'une matrice sur un réseau.

2.3 Précisions sur les domaines d'application : quelques points particuliers

2.3.1 Les déplacements externes

(i) Les déplacements externes (échanges et transit) sont généralement connus pour les VP :

- en volume, par des comptages routiers,
- en structure, par des enquêtes-cordon.

Toutefois, dans de nombreuses enquêtes-cordon, on ne connaît pas la destination (ou l'origine) précise du trafic d'échange.

(ii) L'évolution des déplacements externes est a priori différente de celle des déplacements internes, et doit donc être traitée séparément.

(iii) Les méthodes de modélisation des déplacements externes sont traitées aux *chapitres 3 et 4*.

2.3.2 Les modes que l'on peut prendre en compte

(i) Les déplacements VP et TC sont généralement bien connus à l'aide des enquêtes-ménages, du moins quand la part de marché des TC est significative (ce qui peut ne pas être le cas dans des agglomérations petites ou moyennes où la VP peut avoir une part de marché supérieure à 95 % des déplacements motorisés).

(ii) Les déplacements des PL sont généralement très mal connus, sauf sur les grands axes de transit. Leur part à l'heure de pointe étant faible, il est courant de ne pas trop s'en préoccuper, mais la sensibilité des citoyens et des élus à leur présence ainsi que leur importance en terme d'impact environnemental impose une évolution dans ce domaine. C'est pourquoi des travaux sont en cours pour essayer de mieux décrire ce trafic : ainsi la DREIF s'est lancée dans la construction de matrices spécifiques tandis que le LET développe un logiciel, FRETURB, pour traiter du problème des livraisons en ville (*cf. §3.4.2*).

(iii) La marche représente un volume de déplacements important, mais à courte portée. En conséquence les enquêtes-ménages permettent rarement de décrire avec précision les OD car le zonage n'est pas assez fin pour ce mode.

(iv) Les 2 roues ont très généralement une part de marché de quelques % qui permet difficilement de construire des matrices OD statistiquement fiables à partir des enquêtes-ménages. En outre, la distinction entre les vélos et les 2 roues motorisés n'est pas toujours claire. Dans la suite de ce document, le terme « 2 roues » désignera uniquement les vélos.

2.3.3 Le péri-urbain

Les zones urbaines périphériques et rurales périphériques⁶ regroupaient respectivement 12% et 16% des ménages français en 1999 (Source SES, 2001).

En théorie, l'analyse des déplacements en milieu péri-urbain (c'est à dire en zones éloignées du centre, urbanisées ou en cours d'urbanisation) ne présente pas de différence méthodologique avec celle effectuée en milieu urbain.

En revanche, ces zones sont caractérisées par :

- une grande dynamique des déplacements due à la forte croissance de la population et/ou des zones d'emplois⁷ ;
- un usage important de la voiture;
- un manque fréquent de données et de statistiques.

En conséquence, leur étude pose des problèmes particuliers du fait d'un enjeu fort sur l'intermodalité, de la grande hétérogénéité des densités urbaines (qui rend difficile le traitement de ces vastes secteurs par grandes zones) et de la concurrence entre différents modes TC à faibles fréquences et à tarifications distinctes. Ces zones nécessitent donc un élargissement des recueils statistiques (en particulier des enquêtes-ménages) et, à défaut, un raisonnement par analogie avec des zones comparables où l'on dispose d'information. Des réflexions sur le type d'enquêtes adéquat sont actuellement en cours dans plusieurs régions (Nord, Rhône-Alpes).

2.3.4 Modélisation et évaluation socio-économique

Parmi ses usages classiques, la modélisation permet notamment de calculer des indicateurs utiles pour l'évaluation socio-économique de politiques ou de projets de transport : temps passé, véhicules x kilomètres, vitesse moyenne, etc. Ces indicateurs sont généralement utilisés de manière relative, c'est-à-dire qu'on observe leurs variations lors de la comparaison de scénarios et/ou de variantes (notons toutefois que l'interprétation des résultats des modèles peut devenir délicate si plusieurs constituants du modèle sont modifiés simultanément, par exemple le réseau et la matrice). Par ailleurs, il convient de souligner qu'un paramètre aussi important que la valeur du temps peut prendre des valeurs différentes selon que l'on évalue un gain économique (valeur tutélaire) ou que l'on décrive les comportements des usagers (valeur du temps ressentie).

2.3.5 Modélisation des impacts environnementaux⁸

La qualité de l'air locale peut être étudiée à l'aide de modèles physico-chimiques de l'atmosphère, plus ou moins complexes, généralement mis en œuvre avec un pas de temps horaire. Deux jeux de données sont indispensables pour alimenter ces modèles : les conditions météorologiques et les émissions de polluants de toutes sources, dont le trafic.

⁶ Les zones urbaines et rurales périphériques correspondent à un découpage territorial de l'INRETS basé sur le concept des zones de peuplement industriel et urbain (ZPIU). Elles résultent de la différence entre la population de la ZPIU et la somme de la ville-centre et de sa banlieue.

⁷ Voir notamment M. Girault, *Circulation automobile et péri-urbanisation*, d'après une étude Akli BERRI, Jean-Loup MADRE, METL/DAEI/SES, Paris, 2001.

⁸ Pour plus de précisions, se reporter à « Évaluation de l'impact sur la qualité de l'air de scénarios de déplacements urbains (PDU, DVA, mesures d'urgences) : Etude pilote de St Etienne, ADEME – CERTU », avril 2002.

Une modélisation détaillée de la contribution du trafic aux concentrations de polluants dans l'air nécessite de connaître les quantités de polluants émis, ainsi que leur répartition spatiale et leur modulation temporelle. Dans ce cas, on cherchera à produire une base de données heure par heure des véhicules x kilomètres affectés à chaque arc du domaine d'études, à partir de laquelle les émissions de polluants pourront être calculées avec la même résolution spatio-temporelle⁹.

En revanche, un outil simplifié - mais souvent adéquat - d'étude d'impact de scénarios de transport urbain ou de projet d'infrastructure sur la qualité de l'air locale ou l'effet de serre, pourra consister à comparer les quantités de polluants émises au cours d'une journée type pour tel ou tel projet modélisé.

Dans tous les cas, les distances parcourues par mode constituent le jeu de données déterminant. Qu'il s'agisse d'une étude détaillée heure par heure ou de l'étude d'une journée moyenne, la modélisation du transport ne pourra se limiter à produire des données de trafic en HPS liée aux seuls déplacements de personnes. On s'efforcera donc de constituer les données nécessaires, soit en réitérant la démarche classique de modélisation transport pour plusieurs périodes homogènes de la journée (alternance de périodes creuses et de périodes de pointe), soit en utilisant des lois de passage entre le trafic en HPS et les périodes recherchées. Faute de modèle équivalent pour la modélisation du trafic de marchandises, on cherchera à utiliser les données de comptage VL/PL afin de reconstituer un trafic global généré par les déplacements de personnes et de marchandises (trafic local et trafic de transit).

Les études de qualité de l'air liées au transport nécessitent donc de dérouler une chaîne de modélisation qui commence avec la reconstitution du trafic aux résolutions spatio-temporelles souhaitées. Cette chaîne de modélisation peut s'arrêter à la quantification des émissions, qu'il ne sera pas toujours nécessaire de spatialiser. Pour des études plus ambitieuses, elle peut se poursuivre avec un maillon « concentration des polluants dans l'air ambiant » et éventuellement une étude des populations soumises à différents niveaux de pollution ; des bases de données géoréférencées sont indispensables dans ce cas. En tout état de cause, le modélisateur du maillon transport doit s'assurer de la cohérence de son modèle avec les choix effectués pour la restitution des résultats finaux.

⁹ Voir en particulier les travaux en cours en Île-de-France dans le cadre du projet Heaven (SETEC pour Airparif/DREIF)

3. Les familles d'outils actuels

3.1 De la difficulté de classer les modèles

- (i) Classer les modèles en familles constitue un exercice délicat, car les manières de regrouper ou de différencier les outils sont multiples, puisqu'elles peuvent notamment concerner :
- les objectifs ou besoins, différents à la fois en termes aussi bien temporels (long, moyen ou court terme) que spatiaux (agglomération, secteur, quartier) :
 - stratégie,
 - programmation,
 - conception...
 - les principes généraux de fonctionnement :
 - statique/dynamique,
 - macroscopique/microscopique,
 - monomodal/multimodal,
 - avec ou sans interaction avec l'urbanisation...
 - les techniques :
 - agrégé/désagrégé,
 - déterministe/stochastique,
 - avec ou sans contraintes de capacité...
- (ii) Le présent ouvrage traite principalement de modèles macroscopiques statiques multimodaux pouvant répondre aux différents objectifs précités et utilisant les diverses techniques possibles.

3.2 Les modèles statiques

3.2.1 Définition

Les modèles statiques supposent que les divers éléments du modèle sont constants sur la période modélisée, en particulier la demande, et donc qu'il en est de même pour les résultats. Il n'y a donc théoriquement¹⁰ pas d'interaction entre la congestion et la demande dans un modèle statique.

3.2.2 Modèles « classiques »

Les modèles « classiques » à quatre étapes permettent à la fois d'analyser la demande à l'échelle d'une agglomération (grands flux, part de marché, etc.) et d'évaluer les conséquences prévisibles sur tel ou tel secteur des évolutions des réseaux de transports. Dans ces modèles, le zonage est fin, les réseaux sont décrits en détail, et les algorithmes d'affectation sont généralement complexes. Ils permettent notamment d'évaluer l'utilité d'une nouvelle infrastructure ou d'un changement d'exploitation. Ils peuvent être un peu lourds pour évaluer les effets globaux d'une politique, et dans ce but précis, on pourra leur préférer les modèles dits « de niveau stratégique ».

¹⁰ En fait, certains modèles statiques peuvent intégrer de telles interactions (ex : demande écrêtée, reports horaires dans Davis)

3.2.3 Modèles « de niveau stratégique »

Les modèles « de niveau stratégique »¹¹ ont également une architecture à quatre étapes ; ils permettent d'évaluer l'ordre de grandeur des reports modaux envisageables en fonction de l'évolution des paramètres socio-économiques, urbanistiques, tarifaires... et des temps et/ou coûts de parcours moyens interzones par mode. Un tel modèle utilise les données disponibles sur le territoire découpé en grandes zones, et les réseaux ne sont pas décrits en détail mais seulement par leur efficacité sous forme de matrice, à savoir le temps ou le coût généralisé moyen par mode entre ces zones. Ce type d'outil permet une analyse de l'évolution des comportements et fournit une approche intéressante pour analyser la demande. Les matrices de demande ainsi générées peuvent ensuite être éclatées pour être intégrées dans des modèles classiques utilisant des logiciels d'affectation sur les réseaux : il peut donc y avoir une certaine complémentarité entre ces deux grands types de modèles (stratégiques et classiques).

Notons toutefois que la pratique aujourd'hui est centrée sur la modélisation classique, et que les modèles stratégiques ne sont pas à ce jour répandus, a fortiori l'articulation entre les deux types de modèles. En conséquence, il est difficile de faire des recommandations précises sur l'usage et l'opérationnalité des deux familles de modèles.

Par ailleurs, d'autres types de modèles, dont l'architecture est différente, permettent également d'évaluer l'évolution des déplacements.

3.2.4 Les modèles urbanisme/transport

En cours de développement à l'étranger, il existe des modèles qui permettent d'évaluer les interactions réciproques entre déplacements et urbanisme, et en particulier la manière dont l'offre de transport peut influencer sur la localisation des ménages et des emplois. Des logiciels sont disponibles à l'étranger (MEPLAN, TRANUS, URBANSIM) mais restent, à notre avis, du domaine de l'expérimentation.

3.2.5 Les modèles désagrégés de choix discret

Ces modèles ne sont pas globaux, mais traitent essentiellement des problèmes de choix modal (et sont donc décrits plus en détail dans le chapitre 5) et, moins fréquemment, de choix conjoint de mode et de destination (exemple : modèle IMPACT3 de la RATP). Les choix sont effectués au niveau de l'individu entre un nombre fini d'alternatives : l'individu évalue chaque alternative par une utilité incluant un terme aléatoire ; le modèle calcule alors pour chaque individu une probabilité de choix.

¹¹ Une série de modèles stratégiques a notamment été réalisée en France par la SEMALY et le LET à Lyon, Grenoble et Bordeaux ; le modèle lyonnais a été réalisé dans le cadre du PREDIT [Lichère, 1996] ; premières expériences du genre, les essais n'ont pas toujours été poursuivis dans la durée.

3.2.6 Tableau de synthèse

Caractéristiques des différentes familles de modèles statiques				
	Modélisation classique 4 étapes	Modélisation de niveau stratégique	Modélisation interactive transport-usage du sol	Modélisation désagrégée de choix discret
BESOINS	Stratégique, programmation ou conception	Stratégique	Stratégique ou Programmation	Programmation ou conception
OBJET PRINCIPAL	Prévision de la demande et prévisions fines de trafic et de fréquentation (volumes)	Prévision des niveaux de flux et des parts de marché (volumes)	Analyse et prévision des comportements de déplacement et de localisation. (volumes)	Analyse et prévision des comportements de déplacements (probabilités)
UTILISATION	Planification des politiques de transport et programmation des investissements.	Estimation des grandes tendances	Programmation des infrastructures de transport et des actions d'urbanisme	Test des politiques de déplacements
TERME	Court, moyen ou long terme	Long terme	Moyen et long terme	Court et moyen terme
USAGE	Classique	Quelques exemples en France	Recherche	Courant à l'étranger, en développement en France
SORTIES HABITUELLES	Matrices, Parts modales, Chiffres de fréquentation TC Chiffres de circulation sur la voirie	Niveaux de flux de macro-zone à macro-zone Part de marché de macro-zone à macro-zone	Choix de localisation des activités et des ménages, et sorties habituelles des modèles de transport	Fonction d'utilité des alternatives constituant l'ensemble de choix. Lois de comportement de déplacement
NIVEAU DE FINESSE SPATIALE	Très fin (ex : Lyon VP > 400, TC 380 zones)	Grossier (ex : Lyon, 18 zones)	Moyennement fin (ex : Lyon, 70 zones)	Très fin à fin (ex : Lyon, 357 zones et 87 zones)
OFFRE DE TRANSPORT / MODES ET NIVEAU DE FINESSE	Monomodal ou multimodal / Très élevé	Multimodal (VP, TC) / Grossier (arcs fictifs)	Multimodal (VP, TC) / Moyennement élevé	Multimodal (VP, TC, autres) / Très élevé à élevé

Tableau 2 Familles de modèles (D'après T. du Crest et L. Clément 1998)

3.3 Les modèles dynamiques¹²

- (i) Le terme « modèle dynamique » désigne plusieurs concepts distincts : d'une part des outils permettant de mesurer les reports horaires en fonction de la congestion et/ou d'évaluer la formation des files d'attente et, d'autre part, des outils dont l'intérêt principal réside dans la visualisation des flux de véhicules ou de personnes à petite échelle. La plupart des modèles actuellement opérationnels, d'un type ou de l'autre, sont des outils de simulation

¹² Ces modèles ne font pas partie du champ de ce manuel. Un ouvrage du Certu leur est consacré « Simulation dynamique du trafic routier », Certu, 2000, Lyon, 147 pages.

microscopique. Certains modèles macroscopiques statiques peuvent cependant partiellement prendre en compte la dynamique des déplacements, notamment par le moyen des reports horaires (voir chapitre 3 § 6).

- (ii) Les modèles de micro-simulation dynamique du trafic routier permettent de décomposer le trafic urbain (véhicules particuliers, TC dont TCSP, vélos, piétons) en « unités individuelles », interagissant les unes sur les autres selon des lois transitoires, intégrant des données physiques (distances entre véhicules...), des paramètres comportementaux et une dimension stochastique (lois de génération des véhicules entrant sur le réseau en divers points). Ces logiciels sont en plein développement, en particulier pour tout ce qui touche aux interfaces graphiques. Celles-ci sont en effet d'ores et déjà extrêmement éloquentes et restituent des images très parlantes des écoulements sur les zones modélisées. Les capacités courantes de calcul actuelles et les temps de mise en œuvre ne permettent pas aujourd'hui de développer un tel modèle à l'échelle d'une agglomération. Ces outils sont donc aujourd'hui utilisés essentiellement comme aide à la conception de carrefours, d'ondes vertes ou de points particuliers (gare de péage, station de transport en commun, etc.), l'accent étant surtout mis sur la visualisation de la formation d'éventuels points de congestion qu'il s'agit ensuite de résoudre en modifiant les caractéristiques physiques et/ou d'exploitation de l'aménagement projeté. Il faut cependant envisager qu'ils prendront dans les années à venir une importance grandissante et permettront de plus en plus de tester des outils d'information des usagers : une hypothèse est qu'ils serviront, dans un premier temps tout au moins, de compléments aux modèles macroscopiques statiques sur les secteurs les plus complexes.

- (iii) Parmi les outils prenant en compte la dynamique de la demande (reports horaires), on peut citer DYNAMIT-P, DYNASMAT-P ou METROPOLIS. Ce dernier est un modèle de simulation intégrant de manière cohérente (à l'aide des modèles comportementaux de choix discrets) les décisions des usagers ; il prend en compte le choix de mode, d'heure de départ et d'itinéraire des usagers, évalue la charge dynamique du système et calcule une affectation dynamique (basée sur une modélisation - dite à choix discrets - de l'arbre de décision de chaque usager et sur l'évaluation des chemins dynamiques les plus courts) ; les charges sont rafraîchies au cours de la journée et ajustées de jour en jour sur la base d'un processus d'apprentissage ; le modèle converge vers un régime stationnaire, qui correspond à une représentation des conditions réelles de circulation dans le cas où les données exogènes (matrice origine-destination en particulier) sont constantes.

- (iv) METACOR est lui un outil de simulation de trafic macroscopique dynamique, dont l'objectif est de reproduire les phénomènes de congestion, d'en mesurer l'impact en temps "réel" sur l'affectation et de tester des scénarios de régulation.

3.4 Autres modèles

3.4.1 Les modèles démographiques

Ces modèles " âge-cohorte-motorisation " ou "âge-génération-facteurs économiques"¹³ s'attachent à analyser les comportements en fonction de trois facteurs : l'âge de

¹³ Principalement développés à l'INRETS par Jean-Loup MADRE. Voir également C. Gallez (1994) "Modèles de projection à long terme de la structure du parc et du marché de l'automobile", thèse en sciences économiques de l'Université de Paris I.

l'individu, la génération ou classe d'âge et le contexte socio-économique (niveau de vie, goût des consommateurs, qualité de l'offre...).

En effet, *"la plupart des profils de motorisation et de demande de déplacements individuels au cours du cycle de vie montrent des changements dans le temps sous l'influence de ces trois paramètres... Cette approche longitudinale met en lumière l'impact complexe de l'âge qui, dans un contexte temporel donné, consiste en la combinaison de trois dimensions :*

- *l'étape du cycle de vie, qui indique l'importance de l'âge dans les comportements de motorisation ou de déplacements;*
- *la génération, ou cohorte, qui identifie le comportement d'individus nés durant la même période, et ayant donc une expérience de vie commune;*
- *la période, qui indique l'impact du contexte économique global.*

La formulation du modèle est la suivante :

$$M(a,g,t) = a_a A(a) + a_g G(g) + T_i(t)$$

où

M(a,g,t) mesure le comportement (le nombre moyen de voitures par ménages ou le kilométrage annuel par ménage),

A(a) et G(g) désignent respectivement des variables indicatrices de l'âge a et de la génération g (avec $g=t-a$),

T_i(t) désigne pour la zone i un indicateur de la période t représenté par des variables économiques (revenu ou dépense des ménages, prix réels)."

Ce type de modèle a notamment permis d'estimer des évaluations de la circulation à long terme selon le type d'urbanisation¹⁴.

Dans la pratique, ces modèles ont été développés et utilisés (en France, par l'INRETS) pour constituer des modèles de motorisation et de génération.

3.4.2 La modélisation des marchandises

Le modèle FRETURB, déjà évoqué au chapitre 1 §2.3 est un modèle analogique, fondamentalement différent des modèles classiques "à quatre étapes" utilisés en matière de flux de véhicules ou de voyageurs. Il permet notamment de calculer le nombre d'opérations de livraisons ou d'enlèvements de marchandises intéressant les établissements économiques d'une agglomération. Il est fondé sur l'existence "d'invariants" caractéristiques des classes d'activités et des classes d'effectifs des activités économiques : nombre d'opérations, part des expéditions et des réceptions, mode de gestion – compte propre ou compte d'autrui, tournées ou traces directes, type de véhicules utilisés.

¹⁴ voir l'article *Circulation automobile et péri-urbanisation, op. cit.*, d'où sont extraites les définitions et formulations.

4. Comment estimer la précision des résultats : l'analyse de risque et l'analyse d'incertitude

4.1 Définitions

- (i) La façon même dont un modèle est constitué induit un nombre considérable de risques d'erreurs et d'incertitudes, à tous les stades :
- situation de référence : imprécisions sur les données de calage (débits, temps de parcours), incertitudes sur la description du réseau (capacité, vitesse, ...), loi de répartition modale, etc. ;
 - évolution de la demande, liée à la croissance économique, à la démographie, à la répartition et au type des emplois, à l'urbanisation, ... ;
 - évolution des comportements et des rythmes sociaux (aménagement et réduction du temps de travail par exemple) ;
 - évolution de l'offre de transport, complémentaire ou concurrente ;
 - etc.
- (ii) Dans la suite du texte, on distinguera l'analyse de risque, qui permet de tester la sensibilité aux méthodes et paramètres retenus (valeur du temps, imprécisions des données, accroissement de mobilité, etc.) de l'analyse d'incertitude qui permet de tester des scénarios socio-économiques et urbains non maîtrisés par le maître d'ouvrage de l'étude (croissance du PIB, prix du pétrole, poursuite de la péri-urbanisation, etc.). Autrement dit, on fait la distinction entre ce qui relève du choix du modélisateur, et ce qui relève de l'impossibilité de maîtriser complètement le futur.
- (iii) Toutefois, le terme "Analyse de risque" (en Anglais, "risk analysis") est souvent employé comme terme générique dès qu'on introduit une approche probabiliste (cf. § 4.2.3 ci-après).
- (v) Précisons enfin que ces analyses portent uniquement sur des données d'entrée et ne peuvent donc prendre en compte les risques imputables par exemple à des erreurs d'ordre méthodologique ou mathématique.

4.2 Les différentes approches possibles

Trois méthodes, dont la complexité va croissant, sont envisageables :

- la réalisation de tests de sensibilité
- la construction de scénarios a priori,
- l'analyse probabiliste

4.2.1 Tests de sensibilité

Pour les principaux paramètres sur lesquels pèsent des doutes, on réalise plusieurs tests qui permettent d'évaluer la sensibilité (ou élasticité) du modèle à ces paramètres. Il appartient ensuite au Maître d'Ouvrage d'apprécier les valeurs à retenir en solution de base.

Un exemple est donné ci-après :

Quelques éléments de contexte pour mieux comprendre le choix des indicateurs testés :

- la ligne bleue du métro de Bangkok fait l'objet d'un montage financier dans le cadre strict d'un financement de projet, c'est-à-dire sans demande de fonds publics ; ainsi, la tarification du métro dépend du concessionnaire et non des autorités thaïlandaises
- les tests de sensibilité présentés ci après ont notamment pour objet de cerner le risque financier sur le projet
- le bus est considéré comme un mode concurrent du métro : la correspondance est payante, les systèmes bus et métro ne sont pas intégrés, il n'y a pas vraiment de restructuration du réseau bus en rabatement sur le métro, ce qui explique que lorsque la vitesse des bus diminue, le métro a tendance à se remplir

Études de sensibilité		Impact par rapport au scénario projet					
		Sur la clientèle			Sur les recettes		
		2000	2010	2020	2000	2010	2020
Analyse d'incertitudes							
Évolution des tarifs de la ligne Bleue	- 10%	+ 22 %	+9 %	+ 8%	+11 %	- 1 %	-3 %
	+ 10 %	- 20 %	- 11 %	- 7 %	-12 %	- 3 %	+ 2%
Les tarifs des bus concurrents augmentent de + 25 %		+ 18 %	+ 7 %	+ 4 %	+ 16 %	+ 6 %	+ 3 %
La vitesse des bus concurrents augmente de 18 % en heure de pointe du matin et de 12 % en heures creuses		- 56 %	- 47 %	Non estimé	- 53 %	- 43 %	Non estimé
Analyse de risques							
Pénalités attribuées lors des correspondances, temps marche à pied d'accès aux stations et temps d'attente	- 25 %	+ 54 %	+ 49 %	+ 47 %	+ 47 %	+ 43 %	+ 42 %
	+ 25 %	- 30 %	- 30 %	- 29 %	- 26 %	- 26 %	- 26 %
Évolution de la valeur du temps	- 25 %	- 25 %	- 17 %	- 10 %	- 26 %	- 18 %	- 11 %
	+ 25 %	+ 20 %	+ 11 %	+ 6 %	+ 21 %	+ 12 %	+ 6 %
Modification du coefficient de passage du trafic horaire, au trafic journalier puis au trafic annuel, notamment passage de 342 jours par an à 336 jours par an ¹⁵		- 9 %	- 9 %	- 8 %	- 11 %	- 10 %	- 10 %
<p>Dans le cas très particulier de la ligne Bleue du métro de Bangkok, l'analyse d'incertitude montre par exemple, que la clientèle est très sensible à la qualité du réseau bus concurrent (vitesse et tarifs), par contre l'effet tarifs s'estompe dans le temps.</p> <p>En ce qui concerne les paramètres du modèle, on peut noter que dans ce cas, le coefficient de pénalité appliqué aux utilisateurs du métro (correspondance, marche à pied et attente en station) influe fortement sur la clientèle et les recettes et de façon quasi continue dans le temps.</p> <p><i>Les résultats sont issus de deux rapports : « Bangkok Metro Company Limited –Bangkok Blue line ridership review – Report on base case forecasts – March 2001 – Halcrow fox ».</i></p>							

Tableau 3 Études de sensibilité sur l'étude de la ligne bleue de Bangkok

¹⁵ Remarque : ces coefficients sont tout à fait inhabituels en France où on observe des coefficients de l'ordre de 250 pour des réseaux complets, pouvant atteindre 300 lorsqu'il s'agit d'une ligne de métro seule.

4.2.2 Élaboration de scénarios a priori

En général, plusieurs paramètres présentent des risques et des incertitudes. On est donc amené à construire des scénarios différenciés, qui ont pour but d'encadrer le résultat du modèle :

- un scénario central est constitué à partir des valeurs de paramètres jugées "raisonnables" par le modélisateur et/ou le maître d'ouvrage,
- un scénario pessimiste est constitué en considérant les valeurs "basses" des paramètres,
- un scénario optimiste est constitué en considérant les valeurs "hautes" des paramètres.

4.2.3 Analyse de risque probabiliste

- (i) Si l'on se contente de bâtir autour d'un scénario central, un scénario pessimiste qui intègre l'ensemble des hypothèses les plus basses et un scénario optimiste qui reprend les hypothèses hautes, on peut aboutir à une fourchette de résultats extrêmement large qui ne permet plus d'appréhender une réelle perspective de trafic et qui peut être trompeuse car il est très peu probable que tous les paramètres soient simultanément les plus bas (ou les plus hauts) possibles. Pour éviter ce phénomène, il est possible de recourir à une analyse de risque probabiliste, méthode d'ailleurs classiquement utilisée par les financiers, notamment anglo-saxons.

Notons toutefois que :

- les logiciels classiques de déplacements ne proposent pas cette analyse de manière standardisée,
- **tous les risques d'erreur ne sont pas pris en compte** (les erreurs de formulations par exemple, etc.)

- (ii) Les principes d'une telle analyse sont les suivants :

- dans un premier temps, on recense les paramètres sur lesquels pèsent des incertitudes ; pour chacun de ces paramètres, on réalise plusieurs tests avec différentes valeurs afin d'évaluer la sensibilité du modèle à ce paramètre ;
- les paramètres importants sont ainsi identifiés et on dispose pour chacun d'eux d'une loi simple d'élasticité de la variable à tester (le trafic par exemple) en fonction de ce paramètre, dans une plage de valeurs raisonnables ;
- il faut ensuite déterminer une loi de probabilité d'occurrence des valeurs possibles pour chacun des paramètres retenus ;
- certains paramètres n'étant pas indépendants (exemple : PIB et consommation des ménages), on introduit des coefficients de corrélation entre ces paramètres ;
- on procède ensuite à un très grand nombre de simulations (10 000 par exemple) en triant aléatoirement un jeu de valeurs pour chaque paramètre en suivant les lois de probabilité définies au préalable (méthode de Monte-Carlo) ;
- on obtient finalement une distribution statistique des résultats, plus pertinente pour appréhender la validité des perspectives.

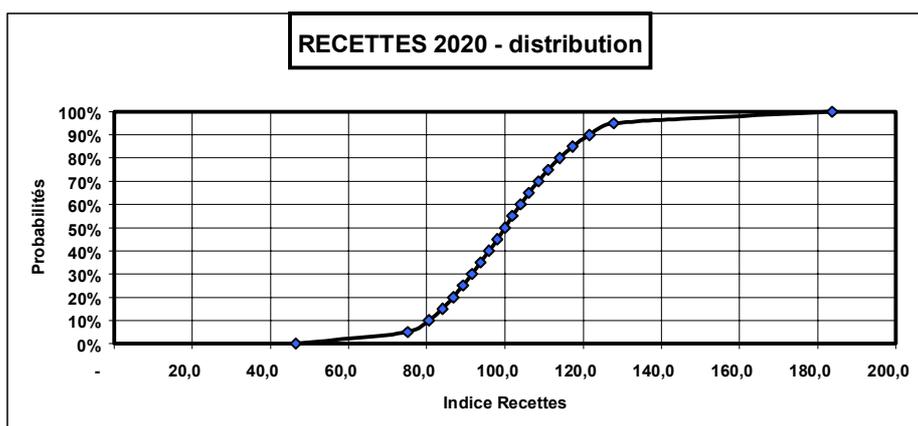
- (iii) Un exemple est joint illustrant :

- les paramètres et lois de probabilité retenus ;
- la distribution statistique des résultats.

Paramètres	Type	Distribution caractéristique 2005	Distribution caractéristique 2020
Trafic généré	Loi triangulaire	(0 / 1 / 2)	(0 / 1 / 2)
Abonnement	Loi triangulaire	(0,94 / 0,96 / 0,98)	(0,94 / 0,96 / 0,98)
Matrices VL	Loi normale	(1 / 0,025)	(1 / 0,025)
Matrices PL	Loi normale	(1 / 0,075)	(1 / 0,075)
Préchargement	Loi triangulaire	(1 / 1,184 / 1,368)	(1,2 / 1,35 / 1,5)
Valeur du temps VL	Loi normale	(74,9 / 5)	(95,2 / 7,5)
Écart type VL	Loi triangulaire	(0,4 / 0,5 / 0,6)	(0,4 / 0,5 / 0,6)
Temps ½ effet VL	Loi triangulaire	(2 / 3 / 4)	(2 / 3 / 4)
Valeur du temps PL	Loi normale	(173,4 / 15)	(231,9 / 25)
Écart type PL	Loi triangulaire	(0,4 / 0,5 / 0,6)	(0,4 / 0,5 / 0,6)
Facteur distance VL	Loi normale	(0,6 / 0,05)	(0,6 / 0,05)
Facteur distance PL	Loi normale	(2,2 / 0,15)	(2,2 / 0,15)
Bonus autoroutiers	Loi normale	(1 / 0,05)	(1 / 0,05)
Bonus ouvrage	Loi triangulaire	(5 / 8,7 / 17,4)	(5 / 11,1 / 20)
Vitesse à vide	Loi normale	(1 / 0,025)	(1 / 0,025)
Capacités	Loi normale	(1 / 0,05)	(1 / 0,05)
Croissance annuelle PIB	Loi normale	(2,9 / 0,5)	(2,9 / 0,5)
Croissance annuelle consommation/habitants	Loi normale	(2,2 / 0,5)	(2,2 / 0,5)

Nota : Paramètres pour les lois triangulaires : minimum / moyenne / maximum.
Paramètres pour les lois normales : moyenne / écart type.

Tableau 4 Exemple d'analyse probabiliste du risque (étude SETEC)



Le graphique se lit : la probabilité est de 90 % que les recettes soient supérieures à 80.

Figure 1. Courbe de distribution des recettes.

4.2.4 Récapitulation des différentes méthodes

Méthode	Avantages	Limites
Tests de sensibilité	- Simple et relativement rapide	- Ne permet pas d'encadrer le résultat
Scénarios a priori	- Assez rapide - Permet d'encadrer le résultat	- Fourchette de résultats souvent très large et peu réaliste
Analyse probabiliste	- Plus réaliste - Reconnue par les financiers	- Relativement long et coûteux

Tableau 5 Récapitulation des différentes méthodes d'analyse de sensibilité

5. Pour en savoir plus

➤ Les études de prévision de trafic en milieu urbain – Guide technique

juillet 1990

Auteur : CETUR

Éditeur : Ministère de

l'Équipement

Document de synthèse, faisant le point sur le savoir-faire français en matière de modélisation du trafic en milieu urbain, au début des années 90.

➤ Modelling transport

1990, troisième édition : 2001

Auteur : ORTUZAR et WILLUMSEN

Éditeur : John Wiley & Sons

Cet ouvrage très complet, auquel le présent manuel se réfère fréquemment (en particulier pour les chapitres consacrés à l'estimation de la demande et au choix modal), est un cours d'université ; il contient donc de nombreux développements mathématiques théoriques ainsi que des exercices.

➤ Modelling of urban transport

1996

Auteur : CSST - Heusch/Boesefeldt - MVA - Napier University

Éditeur : European Communities (Transport Research / APAS /Urban Transport)

Cet ouvrage, commandé par l'union européenne, dresse un panorama assez exhaustif non seulement des modèles de planification des transports, mais également des systèmes de contrôle du trafic et des interactions entre ces deux concepts complémentaires.

➤ Handbook of transport modelling

2000

Auteur : David A. Hensher & Kenneth J. Button

Éditeur : Pergamon

L'objectif de cet ouvrage exhaustif est de fournir à ses lecteurs, intéressés par la modélisation des transports à des titres divers, les éléments permettant de comprendre les techniques les plus variées pouvant être utilisées pour la modélisation. Il s'agit d'un manuel abordant de façon détaillée les problèmes parmi les plus complexes de la modélisation des déplacements.

Chapitre 2. Zonage et réseaux

Mots-clés :	
<u>Aire d'étude</u>	<i>Territoire cohérent dont on étudie le système de transport</i>
<u>Zonage</u>	<i>Découpage de l'espace modélisé en territoires homogènes (zones) du point de vue des déplacements, qui servira de base à l'élaboration de la demande modélisée (les matrices de demande donneront les déplacements entre les zones)</i>
<u>Zone interne</u>	<i>Sous-ensemble cohérent de lieux dans l'aire d'étude</i>
<u>Zone externe</u>	<i>Partie de l'espace extérieur à l'aire d'étude, délimitée grossièrement, faiblement impliquée dans le système de transport étudié, modélisée seulement par un "poste cordon", émetteur-récepteur de trafic influant sur l'espace modélisé</i>
<u>Centroïde</u>	<i>Point d'émission/attraction du trafic d'une zone donnée vers le réseau, correspondant généralement au barycentre de la zone</i>
<u>Réseau</u>	<i>Représentation des voies de communication ou des lignes de transport public utilisables pour les déplacements modélisés dans l'aire d'étude et représentant l'offre de transport ; un réseau modélisé apparaît généralement sous la forme d'un ensemble de points (nœuds) reliés entre eux par des segments homogènes (arcs)</i>
<u>Nœud</u>	<i>Point d'intersection ou point de séparation entre deux segments homogènes du réseau, identifié par un numéro et caractérisé par ses coordonnées dans le plan</i>
<u>Arc</u>	<i>Segment homogène entre deux nœuds du réseau caractérisé par sa longueur, le sens de circulation et ses modalités d'exploitation (capacité des voies ou des véhicules, vitesse, fréquence, horaires ...).</i>
<u>Connecteur (ou arc fictif)</u>	<i>Arc entre un centroïde et un nœud ordinaire du réseau, représentant les différents chemins possibles à l'intérieur d'une zone pour rejoindre le réseau modélisé. Plusieurs connecteurs sont souvent nécessaires pour relier une zone donnée au réseau.</i>

<u>Courbe débit- vitesse</u>	<i>Pour un réseau routier, relation fondamentale entre la vitesse (V) et le trafic (Q) sur un arc donné ; dans les modèles, la fonction f telle que $V = f(Q)$ est toujours biunivoque, contrairement à ce qui se passe dans la réalité (à un faible débit peut correspondre une vitesse élevée en écoulement normal, ou une vitesse faible en cas de congestion).</i>
<u>Coût généralisé, temps généralisé</u>	<i>Fonction qui s'apparente sur le plan économique à une désutilité de se déplacer. Il s'agit en général d'une somme pondérée de temps caractéristiques du déplacement et de son coût. Selon que l'on multiplie le temps par la valeur du temps ou que l'on divise le coût par cette même valeur on parle de coût ou de temps généralisé.</i>
<u>Impédance</u>	<i>Fonction caractérisant l'offre de transport et servant à la recherche des itinéraires et à l'affectation ; il peut s'agir d'un coût ou d'un temps généralisé dont la construction repose sur les différents attributs d'offre et sur des pondérations fixées par l'utilisateur.</i>

Partie A. Modélisation de l'aire d'étude : le zonage

1. Délimiter le territoire à étudier

1.1 Bien identifier la problématique et s'adapter aux problèmes posés

- (i) Il est essentiel au départ d'adapter l'aire d'étude au problème posé. Ce point concerne deux aspects distincts :
- l'étendue et les limites de l'aire d'étude ;
 - la finesse du découpage (nombre et dimension des zones), qui doit être adaptée à celle du réseau modélisé.
- (ii) **L'étendue de l'aire d'étude** dépend de la nature du trafic attendu et d'abord des origines et destinations des déplacements concernés. L'aire d'étude doit circonscrire l'essentiel des mouvements origine-destination, ainsi que les principaux itinéraires qui les desservent.

A titre d'exemple, on peut citer le tunnel ouest de TOP (A86), ouvert aux poids lourds : le trafic entre le nord et le sud-ouest de l'Île de France, qui - faute de voie rapide - passe plutôt à l'est de Paris aujourd'hui, est susceptible de se reporter sur ce tunnel ; en conséquence, la modélisation doit être étendue bien au-delà de l'ouest parisien. Autre exemple extrême en interurbain : le viaduc de Millau, ouvrage de 2,5 km de long, demande la modélisation de la France entière, car il est susceptible de provoquer des reports importants entre les grands axes nord-sud.

La modélisation du territoire éloigné peut être soit intégrée directement dans le modèle par extension du réseau et du zonage, soit traitée séparément et réintroduite a posteriori.

- (iii) La finesse du découpage varie à la fois en fonction du problème posé, du ou des modes étudiés et de la proximité avec les infrastructures concernées ; elle dépend également fortement des données disponibles en matière de demande, qui conditionnent le passage du souhaitable au possible.
- Le problème posé : le dimensionnement des infrastructures d'une ZAC, un modèle stratégique à l'échelle d'une agglomération (voir *chapitre 1* § 3.1) ou la programmation des infrastructures en Île de France induisent évidemment des finesses de zonage très différentes.
 - Le mode de transport : les TC ont une zone d'influence plus réduite que la voiture, du fait des trajets terminaux à pied ; à l'intérieur même des TC, il est communément admis que le rayon d'influence du bus ne dépasse pas 200-300 m quand celui du métro atteint 500-600 m et celui du train 800-1000 m¹⁶. En toute logique donc, un zonage d'étude TC devrait distinguer les zones d'influence directe autour d'une (ou de plusieurs) stations et les zones plus éloignées.

¹⁶ La RATP retient comme valeurs limites des aires d'influence des arrêts TC les valeurs suivantes : 600 m pour les bus à Paris, 800 m pour les bus en banlieue, 1000 m pour le tramway et le métro, 1200 m pour le RER.

- Dans le cadre de l'étude d'une infrastructure particulière, la proximité à l'infrastructure conditionne fortement le choix d'itinéraire ou de mode. Donc, le zonage sera d'autant plus fin qu'il concerne des territoires situés près du projet et des infrastructures nouvelles susceptibles d'influer sur le projet; la finesse du zonage devra également tenir compte des points d'entrée sur le réseau (échangeurs autoroutiers, stations TC, ...).
- Enfin, ces considérations théoriques pourront être remises en cause si les données disponibles en matière de demande sont grossières : on décrira des zones fines autour des stations TC si on dispose par exemple d'enquêtes embarquées fournissant très précisément les OD, mais si seules les enquêtes-ménages fournissent une idée de la demande, le zonage sera beaucoup plus large. En outre, plusieurs zonages « emboîtés » peuvent être pris en compte pour une même modélisation : par exemple, zonage fin pour l'affectation et zonage plus grossier pour le partage modal.

1.2 Prendre en compte, dès le départ, les différentes contraintes

Le zonage doit, comme l'on a vu, être adapté au problème posé mais également aux différentes contraintes :

- techniques : disponibilité et validité statistique des données pour l'élaboration de la demande (population, emploi, résultats d'enquêtes-ménage ou origine-destination par exemple...), temps de calcul (varie approximativement en fonction du carré du nombre de zones), manipulation des matrices;
- temporelles : tenir compte du délai de l'étude pour choisir le niveau de complexité du modèle, dont la finesse et l'étendue du zonage sont des composantes importantes ;
- administratives : même s'il peut arriver qu'une limite administrative sépare artificiellement des territoires homogènes, le zonage ne peut ignorer le découpage administratif à la fois pour des problèmes d'obtention des données et pour des problèmes d'exploitation des résultats (il est commode de raisonner par commune);
- institutionnelles : de manière analogue, certains enjeux financiers sont liés à un découpage institutionnel (par exemple, dans une agglomération, toutes les communes n'appartiennent pas au périmètre de transport urbain), qu'il convient donc d'intégrer dans le zonage pour faciliter l'exploitation des résultats ;
- financières : sophistiquer la modélisation en affinant excessivement le zonage peut d'une part s'avérer inutile et d'autre part induire des dépassements de budget.

1.3 En déduire le zonage “ externe ”

Si l'étendue de la zone d'étude a été correctement déterminée, le zonage externe se définit facilement par des points d'entrée indépendants des projets étudiés. Il est en effet souhaitable que les projets envisagés ne modifient pas l'affectation du trafic à l'extérieur de la zone d'étude ; autrement dit, il est préférable que le trafic affecté sur les points d'entrée évolue uniquement en fonction de la demande, indépendamment de l'offre (c'est-à-dire du réseau).

2. Les bases de données existantes

2.1 Les sources possibles

Il est important de connaître les sources disponibles avant de constituer un zonage. Celles-ci peuvent être de divers types :

- modèles existants,
- SIG : données socio-économiques reliées à une cartographie,
- enquêtes déplacements.

On recherchera la meilleure synthèse entre les différentes sources en vue d'une part de faciliter le travail d'élaboration du zonage proprement dit, d'autre part de fournir les éléments utiles au calcul de la demande.

2.2 Les modèles existants

De nombreuses études de trafic ne sont pas réalisées ex-nihilo mais reprennent ou actualisent des études existantes. Dans ce cas, il est généralement souhaitable soit de reprendre le zonage initial, soit de l'affiner en " éclatant " certaines des zones ; il sera ainsi plus facile de comparer les évolutions entre modèles et d'expliquer d'éventuelles divergences entre les résultats. Toutefois, si le zonage initial se révèle peu pertinent, il pourra être préférable de le modifier radicalement. Dans tous les cas, il est nécessaire d'établir une table de correspondance entre les différents zonages.

2.3 Les SIG

Les SIG fournissent de nombreuses données socio-économiques, à commencer par la population, dans un découpage soit administratif (commune, canton, département...), soit statistique (îlots INSEE, unité urbaine). Ils permettent donc de définir et de représenter facilement et rapidement des zonages, tout en fournissant des variables explicatives des données de déplacements. Par ailleurs, certaines couches cartographiques des SIG concernent l'occupation des sols et le type d'urbanisation; ce zoning urbain permet de définir des zones homogènes du point de vue socio-économique, et donc probablement homogènes de celui des déplacements. Enfin, la superposition des différents découpages administratifs ou statistiques avec les divers réseaux de transport (voirie, réseaux TC) facilite la nécessaire cohérence entre finesse du zonage et finesse du réseau.

2.4 Enquêtes déplacement

Une correspondance entre le zonage du modèle et les zonages d'enquêtes disponibles est primordiale pour faciliter la validation du calage de la demande. En effet, quel que soit leur type,

- enquêtes-ménages,
- enquêtes spécifiques de transport,
- enquêtes origine-destination par interview,
- résultats du recensement de la population (trajets domicile-travail entre communes avec, depuis 1999, la connaissance du mode de transport),

ces enquêtes sont à la base de la constitution des matrices de demande, soit directement, soit par détermination de coefficients permettant de caler des modèles de génération-distribution (voir *chapitre 3*).

3. L'élaboration du zonage

3.1 La mise en oeuvre

- (i) Les considérations évoquées dans la Partie A § 1 et 2 guident l'élaboration du zonage, qui intervient au tout début de l'étude de trafic et conditionne largement ses modalités, en particulier si des enquêtes sont nécessaires ; de plus cette élaboration va de pair avec celle du réseau dont la finesse est étroitement corrélée à celle du zonage (*voir § Partie B*).
- (ii) Une double homogénéité doit être recherchée :
- **territoriale** : dans la mesure du possible, il est préférable de découper les zones en respectant l'utilisation des sols : habitat dense, habitat dispersé, zone d'activité, etc...,
 - **démographique** : le poids démographique des différentes zones doit être limité ; par exemple, pour le modèle régional de l'Île de France, les arrondissements parisiens, bien que de superficie relativement réduite, ont été découpés en plusieurs zones de manière à disposer de zones n'excédant pas 25 000 habitants environ (en moyenne, la taille des 1 277 zones internes est de l'ordre de 8 500 habitants). Des zones trop grosses généreraient un trafic très important qu'on ne saurait répartir sur le réseau via les arcs fictifs et rendraient les calages moins précis dans l'étude de la demande.

3.2 La démarche à suivre

Les étapes à suivre sont les suivantes :

- comprendre la problématique de l'étude et en déduire l'étendue de l'aire d'étude et la finesse nécessaire du zonage. Si l'étude est multimodale ou plurimodale, il est souhaitable d'élaborer un zonage commun aux différents modes ;
- recenser les données existantes (zonages d'études précédentes, données d'enquêtes, paramètres socio-économiques, limites administratives, limites physiques (rivière, autoroute...), utilisation des sols...), afin de déterminer le meilleur zonage possible pour remplir les objectifs identifiés précédemment ;
- identifier et rajouter les générateurs particuliers (aéroports, centres commerciaux, marchés de gros...), qui se caractérisent par des comportements atypiques, non explicables par les paramètres socio-économiques classiques (population, emploi, mobilité...) ;
- positionner les centroïdes au barycentre des populations de la zone plutôt qu'en son centre de gravité géométrique (par exemple, si une zone comporte une zone habitée et un espace vert, le centroïde doit se situer au milieu de la zone habitée); ainsi, la distance réelle de raccordement au réseau sera mieux évaluée pour la majeure partie de la population ; le raccordement du centroïde au réseau par des arcs fictifs devra également faire l'objet d'une attention particulière (*voir Chapitre 2, partie B § 3.6*) ;
- éditer une carte claire du zonage, dont la numérotation sera la plus logique possible (des zones voisines ont des numéros voisins) ;
- disposer d'une table de correspondance avec d'éventuels anciens zonages ainsi que d'une base de données socio-économiques ;
- constituer des macro-zones pour vérifier certains résultats en grande masse. (grands secteurs géographiques ou administratifs, bassins versants, différentes couronnes d'une agglomération, etc.)

3.3 L'évolutivité du zonage

Dans la mesure du possible, le zonage doit être conçu en anticipant les évolutions ultérieures du modèle, qu'elles soient imputables aux changements dans la zone d'étude (développement urbain d'un secteur, mise en service prévisible d'une rocade routière ou d'une nouvelle ligne de transport en commun) ou consécutives à des modifications possibles de la problématique (exemple : intégration des déplacements en grande périphérie). Dans ce but, il peut être pertinent de découper initialement certaines grandes zones en plusieurs zones plus fines, même si ce n'est pas forcément nécessaire dans l'immédiat.

Partie B. Modélisation des réseaux

Les réseaux jouent un double rôle dans le modèle. Ils sont la représentation schématique de l'offre de transport sur lequel s'affectent les véhicules ; ils permettent également d'établir les coûts généralisés de zone à zone, intermédiaire de calcul indispensable pour l'analyse de la demande.

1. Détermination des réseaux à modéliser

1.1 Modes et réseaux

Deux principaux types de réseaux sont à prendre en considération :

- le réseau routier, qui sert bien sûr aux modes automobiles (VP, PL) mais aussi aux modes piétons et 2 roues, et qui peut servir de support géométrique au réseau de bus,
- le réseau de transports collectifs, en particulier en site propre.

1.2 Être cohérent avec la problématique et le zonage

- (i) La détermination du réseau modélisé va de pair avec la définition du zonage : finesse et étendue du réseau et du zonage sont en effet étroitement corrélées et dépendent, comme on l'a vu précédemment (cf. Partie A § 1.1) de la problématique de l'étude. Un zonage trop grossier par rapport au réseau aura pour conséquence de ne pas affecter une partie de la demande (intra-zone) et donc de sous-estimer globalement les flux sur le réseau ; un zonage trop fin aura l'effet inverse par manque de réseau modélisé.
- (ii) Quant au niveau de détail de la description, il doit être adapté au contexte de l'étude : la description exhaustive des bretelles d'échangeurs est par exemple souvent nécessaire pour modéliser précisément des points de congestion qui n'apparaissent pas si les échangeurs sont schématisés par de simples nœuds ou pour tenir compte de la longueur exacte des itinéraires : par exemple, il est courant que la distance $i \Rightarrow j$ par un itinéraire donné soit significativement différente de celle de $j \Rightarrow i$ par l'itinéraire " retour ", ce qui peut expliquer des affectations " dissymétriques ". Inversement, dans certains modèles (modèles stratégiques par exemple), il se peut que les réseaux ne soient pas décrits par leurs caractéristiques géométriques et physiques, mais seulement par leur efficacité en termes de transport (par exemple, le temps moyen de parcours entre deux zones pour un mode donné).

1.3 Bien identifier les différentes contraintes

Les considérations évoquées au § 1.2 Partie A, pour le zonage sont dans une large mesure valables pour l'élaboration du réseau, qui doit tenir compte de contraintes :

- techniques :
Précision et homogénéité nécessaires pour répondre au problème posé (description des carrefours, des échangeurs, prise en compte des horaires et des temps de parcours exacts...), existence de données ou nécessité de les constituer.
- temporelles et financières :

Une finesse excessive peut être consommatrice de temps et d'argent, sans apporter nécessairement un surplus de qualité, en particulier si les caractéristiques d'écoulement sont mal connues (il est peu utile de décomposer finement un réseau routier si l'on est incapable d'attribuer aux différents arcs des courbes débit-vitesse pertinentes). Dans cet esprit se pose également le problème de la maintenance et de la mise à jour du modèle, qui impose que celui-ci soit conçu et dimensionné pour permettre ses évolutions ultérieures.

- liées à la communication :

Bien souvent, les résultats du modèle doivent être montrés à des non-spécialistes (en particulier les élus), qui doivent pouvoir reconnaître "leur" réseau ; il est donc important que la représentation des réseaux se rapproche d'une image cartographique immédiatement identifiable. Ce problème est notamment sensible dans les villes anciennes aux topographies complexes, où les arcs sont rarement droits et peuvent même être en épingles à cheveux. Il faut également signaler que le travail de restitution de la forme du réseau facilite l'interprétation des résultats par l'ingénieur. L'habillage des réseaux (représentation des cours d'eau, des espaces verts, noms de lieux) ou la superposition sur un fond de plan sont également de plus en plus nécessaires pour exposer les résultats d'une modélisation.

2. Les bases de données existantes

2.1 Les modèles existants

- (i) La récupération d'un réseau à partir d'un modèle existant peut représenter un gain de temps appréciable mais nécessite des précautions indispensables.
- (ii) La géométrie du réseau (la "toile d'araignée") est facilement récupérable d'un logiciel à un autre (coordonnées des nœuds, longueur des arcs, coordonnées des points des polygones représentant les arcs). Toutefois, il peut arriver que cette géométrie soit erronée (longueur des arcs) ou abusivement simplifiée par rapport aux objectifs de l'étude (carrefours et échangeurs représentés par un simple nœud, non distinction des deux chaussées d'une autoroute, non distinction de deux arrêts sur une ligne TC etc.) et que les corrections ou compléments à apporter représentent une quantité de travail supérieure à la création d'un nouveau réseau, notamment quand un SIG est disponible (cf. Partie B § 3.1).
- (iii) Les caractéristiques du réseau peuvent être parfois difficilement transportables d'un logiciel à l'autre, si les attributs de description des lignes ou des courbes débit-vitesse sont différents. Dans tous les cas, un contrôle systématique des paramètres descriptifs est absolument nécessaire.

2.2 L'utilisation d'un SIG

Il est désormais relativement facile et bon marché de se procurer le réseau de voirie d'une agglomération, sous forme de SIG (IGN, Michelin ...). Ces bases de données présentent des avantages indéniables (description précise et complète de la "toile d'araignée", notamment des échangeurs et carrefours), mais ne peuvent cependant être utilisées telles quelles et nécessitent un travail important une fois récupérée la géométrie. Un tel recours n'est donc envisageable que pour de "gros" modèles, susceptibles d'évolutions ultérieures et d'une maintenance suivie. Il est par ailleurs

certain que, en l'état actuel des choses, cette technique s'applique avant tout aux réseaux routiers. Les SIG consacrés aux réseaux de transport collectifs semblent peu fréquents et il faut craindre qu'ils soient peu propices à un travail de modélisation. Comme le montre l'exemple ci-dessous, un travail de simplification est de toutes façons nécessaire pour être cohérent avec la problématique et le zonage.

A titre d'exemple (un peu extrême, il est vrai, du fait de la dimension de l'aire d'étude), on peut citer le travail effectué pour utiliser les fichiers GEOROUTE de l'IGN, dans le cadre de la modélisation du réseau routier de l'Île de France, pour le compte de la Direction Régionale de l'Équipement d'Île-de-France (DREIF) :

- *fusion de huit fichiers départementaux en un fichier régional, avec quelques problèmes de jonction aux limites départementales ;*
- *nécessaire simplification du réseau : dans le fichier GEOROUTE, toutes les voies de plus de 10 m de long sont représentées ; au total, sur l'Île de France, il y avait environ 150 000 tronçons, soit 250 000 arcs orientés, alors que l'objectif initial était de disposer d'un réseau DAVIS de 25 000 arcs. Il a donc fallu d'abord éliminer du réseau GEOROUTE un certain nombre de catégories de voies (voies de desserte, ...), permettant de réduire automatiquement le réseau à une taille adaptée au problème de la modélisation régionale.*
- *"nettoyage" du réseau ainsi réduit : les voies enlevées laissent de nombreux nœuds désormais inutiles, séparant des arcs aux caractéristiques identiques, qu'il a fallu fusionner.*
- *nombreuses corrections d'erreurs ou de carences de la base GEOROUTE :*
 - *mouvements tournants interdits (entrées d'autoroute par exemple)*
 - *passages dénivelés non décrits (existence d'un nœud fictif au passage d'une voie sur une autre)*
- *réintégration manuelle dans le modèle de voies supprimées automatiquement du fait de leur classification par l'IGN.*

3. Saisie et codification des réseaux routiers

Une fois le réseau déterminé géographiquement, l'étape de codification peut commencer. Elle consiste à construire un graphe en terme de nœuds, d'arcs et de mouvements tournants. Chacun de ces objets va recevoir les attributs nécessaires à la détermination et au calcul des chemins.

3.1 La géométrie

Quand il n'est pas possible de récupérer un modèle existant ou d'utiliser un SIG, la géométrie du réseau peut être saisie ex nihilo; il est commode et rapide de disposer d'un outil informatisé permettant à un projeteur de saisir à partir d'une carte les différents nœuds et arcs du réseau sélectionné, en utilisant une table à digitaliser. Coordonnées des nœuds et longueurs des arcs peuvent ainsi être rapidement saisies et présenter un haut niveau de fiabilité. Il est également possible de saisir le réseau sur un fond de plan directement dans le logiciel de transport, lorsque celui-ci le permet

(Exemple : Importation de fichiers DXF, dans DAVISUM, ou BMP, dans POLYDROM).

Le SIG permet en particulier de bâtir ce réseau ex nihilo d'après un plan numérisé (Scan de l'IGN). L'intérêt de l'usage du SIG réside à la fois dans l'exactitude des longueurs saisies, dans le respect de la géométrie des tronçons (lignes courbes) et dans ses possibilités de géoréférencement.

3.2 Habillage et cartographie

En sus d'une géométrie précise (longueur et forme), plusieurs solutions existent pour rendre lisible le réseau modélisé :

- ajout d'éléments exogènes, tels que cours d'eau, espaces verts, nom et délimitation des communes;
- superposition avec un fond cartographique.

3.3 Principes de numérotation

La numérotation doit être conçue de façon à faciliter le travail de l'ingénieur¹⁷, notamment dans la phase d'interprétation des résultats (en particulier tels qu'ils peuvent apparaître dans des tableaux ou des listings). En guise d'exemple, on peut s'inspirer de la proposition suivante, établie dans cette perspective.

- (i) Les centroïdes sont numérotés consécutivement de 1 à N, où N est le nombre de zones¹⁸. Il est souvent intéressant de regrouper les centroïdes externes en fin de liste pour des facilités de lecture des matrices origines-destinations (mise en évidence des trafics interne, d'échange et de transit)
- (ii) La numérotation des nœuds ordinaires commence à la centaine ou au millier supérieur à N.
- (iii) Les nœuds sont numérotés de manière non consécutive (par exemple de 5 en 5), en respectant autant que possible des logiques d'axe, de classes d'arcs, de géographie.... Les numéros non utilisés pourront être utilisés ultérieurement en cas de complément du réseau ou d'introduction d'un projet.

Remarque : certains outils modernes permettent aussi d'identifier les zones par des noms qui rendent mieux compte de leur contenu.

3.4 La classification des arcs

Dans un premier temps, il est nécessaire de classer les voies par grands types (autoroutes, voies rapides, routes nationales, grands boulevards, rues principales, rues secondaires, ...) dont les caractéristiques varieront relativement peu à l'intérieur d'une même catégorie (ce type de méthode permettra a posteriori une vérification des

¹⁷ Notons toutefois que certains logiciels (ex : MAJIC à la RATP) permettent de saisir graphe et zonage sans que l'utilisateur ait à gérer une numérotation.

¹⁸ Dans une autre logique, il est aussi possible de numérotter en fonction des macro-zones (hypercentre, centre, couronne ouest...), par tranche de 10 ou 20 (ce qui permet d'affiner le zonage, le jour venu).

caractéristiques, qu'une autoroute ne se retrouve pas avec une capacité de 400 au lieu de 4 000). Les SIG intègrent souvent ce type de hiérarchisation du réseau. La lecture de cartes et de plans permet généralement de dresser un premier classement des voies, mais il est nécessaire de le compléter par une reconnaissance visuelle du terrain et de l'étayer par des mesures in situ : comptages, temps de parcours, courbes débit-vitesse...

Il est préférable de numérotter les nœuds avant la reconnaissance, qui sera ainsi facilitée, ce qui suggère également d'avoir au préalable effectué la saisie des nœuds et arcs comme indiqué supra.

3.5 Les courbes débit-vitesse (principes)

- (i) Composantes essentielles de la partie routière des modèles, les courbes débit-vitesse (ou temps-débit) doivent faire l'objet d'une attention particulière. En effet, la plupart des paramètres standards fournis par les logiciels se révèlent sans rapport avec la réalité physique. L'administration française en a d'ailleurs pris conscience depuis quelques années et des efforts ont été entrepris pour se doter d'un corps de mesures significatif¹⁹ (DREIF, INRETS, SETRA, CERTU²⁰ ...).
- (ii) Rappelons d'abord que, expérimentalement, les mesures simultanées de débit²¹ et de vitesse se présentent sous forme d'un nuage de points (voir exemple ci-dessous), pouvant se décomposer en trois grandes parties :

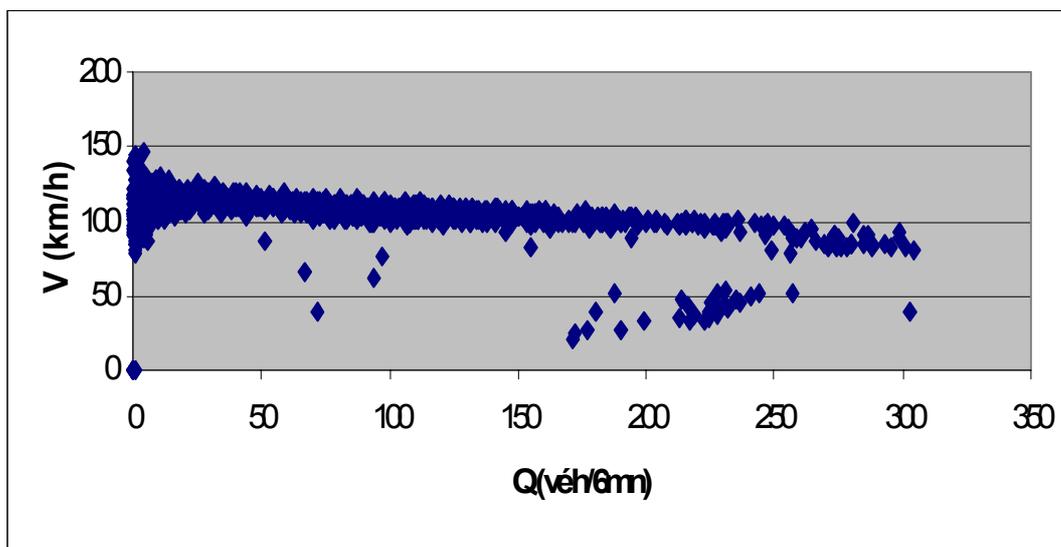


Figure 2. Données débit-vitesse sur une VRU à Nantes
Source : Cete de l'Ouest.

¹⁹ Voir en particulier "S. Cohen, MY Zhang, P. Ginier, Les relations temps de parcours - débit sur le réseau routier d'Île-de-France, un outil pour la planification ; Revue Générale des routes et aérodromes, n° 792, février 2001" ; Rapport technique SETRA "Fonctions temps-débit sur les autoroutes interurbaines", F Leurent et T Simonet, SETRA (2002) ; Rapport INRETS Outils et Méthodes n°10, "Modèles Désagrégés du Trafic", F Leurent (2001) ; Rapport INRETS "La capacité de circulation : modèle désagrégé et méthodes d'estimation", F Leurent (2002)

²⁰ Étude en cours sur les voiries rapides urbaines de province.

²¹ Le débit peut être exprimé en véhicules par unité de temps ou en uvp par unité de temps. L'uvp (unité de véhicule particulier) permet de tenir compte de l'occupation différente de la voirie selon le type de véhicule (il est d'usage de considérer qu'une moto représente 0,5 uvp et qu'un PL équivaut à 2 ou 3 uvp en terrain plat, et 5 ou plus en cas de rampe importante).

- La partie “ haute ” du nuage de points correspond à la situation “ normale ”, avant saturation ; elle est caractérisée par la vitesse à vide V_0 et par un paramètre de courbure reflétant la décroissance de la vitesse quand le trafic augmente. Il convient de noter que les mesures faites, en particulier sur des voies rapides, montrent que les vitesses moyennes observées en situation de débit faible sont décalées par rapport au nuage de points des mesures faites en débit moyen ou fort (elles sont généralement plus faibles) ce qui résulte du fait que les comportements individuels sont alors peu influencés par le flux global et du fait que le taux de poids lourds est plus important en heures creuses. En conséquence la vitesse à vide doit être considérée non pas comme la vitesse observée en cas de débit faible mais bien comme un paramètre permettant de superposer au mieux les courbes théoriques aux nuages de points correspondant aux situations de débit moyen ou fort. Notons également que, tant qu'on reste au-dessous de la capacité, la décroissance des vitesses peut être très faible sur certains types de voies, en particulier les autoroutes et les rues régulées par des feux tricolores successifs qui imposent pratiquement la vitesse de circulation.
- La partie “ à droite ” du nuage correspond à la limite de capacité de la voie, c'est-à-dire qu'elle fournit le trafic maximal qu'elle peut écouler dans une durée donnée (la capacité horaire pouvant être différente, rapportée à la même durée de référence, de celle observée sur des périodes plus longues ou plus courtes²²) ; quand on se rapproche de cette capacité, la vitesse se met à décroître significativement plus vite que précédemment (zone d'instabilité).
- Enfin, la partie “ basse ” du nuage de points représente la congestion de la voirie et la formation d'embouteillages dans lesquels à la fois la vitesse et le débit diminuent fortement. Sur des périodes généralement plus courtes que l'heure, on observe des instabilités transitoires qui expliquent des mesures situées entre les parties haute et basse de la courbe : ces mesures renvoient aux phénomènes d'accordéon ressentis par les automobilistes en embouteillage. Aucun logiciel d'affectation ne sait représenter correctement ces phénomènes transitoires car tous sont fondés sur une relation biunivoque entre débit et vitesse. Les logiciels proposent donc des approximations plus ou moins judicieuses pour les représenter. La plus courante de ces approximations est la prolongation de la courbe débit-vitesse au-delà de la capacité, avec un infléchissement de la courbe $V = f(Q)$ (de type hyperbolique par exemple) aboutissant à des vitesses très faibles pour les débits élevés (voir comparaison des courbes Davis ci-après) ; ce type de schématisation présente des avantages théoriques (conservation du trafic aux nœuds, conservation de l'équilibre) mais a l'inconvénient majeur d'affecter sur certains arcs un trafic significativement supérieur aux comptages, ce qui ne représente donc pas la réalité, rend difficile l'interprétation et peut aller jusqu'à décrédibiliser la modélisation. L'autre solution apportée par certains logiciels (DAVIS, DAVISUM, TRIPS) consiste à limiter le trafic à la capacité²³ en faisant chuter brutalement la vitesse et à estimer un temps d'attente qui dépend de l'excès de trafic se présentant sur l'arc ; ces modules “ d'écèlement de la demande ” permettent une représentation plus proche de la réalité physique (trafic limité à la capacité, création d'une file d'attente) bien qu'encore imparfaite (en fait le débit devrait décroître) mais sont parfois difficiles à expliquer aux non spécialistes du fait de la non-

²² On observe par exemple des débits maximaux sur voies rapides pendant une dizaine de minutes, extrapolés à une durée d'une heure, supérieurs de 15%, voire 20% à ceux observés pendant une heure

²³ En pratique, légèrement au-dessus

conservation apparente du trafic aux nœuds dans l'heure modélisée (le trafic retenu en amont du point de congestion s'écoule en fait en plus d'une heure et se reporte sur l'heure suivante (voir le paragraphe sur les modèles de choix horaire au chapitre 3 § 6).

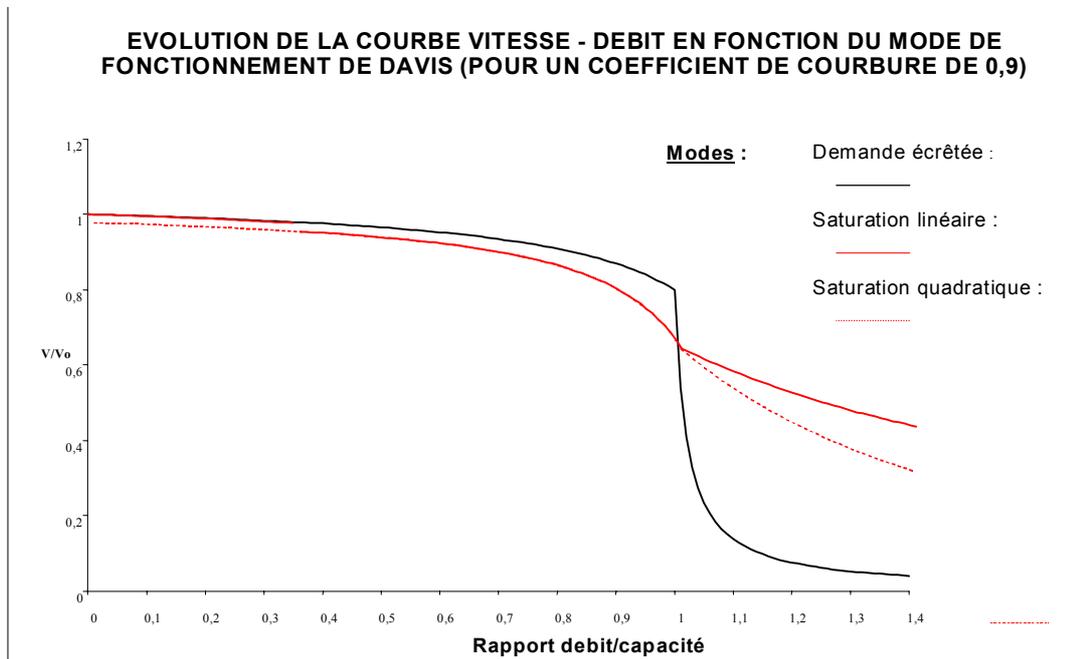


Figure 3. Évolution de la courbe débit-vitesse en fonction du type de saturation

(iii) Le tableau suivant donne la forme des courbes débit-vitesse classiques, avant saturation : DAVIS, BPR (Bureau of Public Roads), conique²⁴, ainsi qu'une courbe de type logit, proposée par IITPR (Israël Institute of Transportation Planning Research) qui inclut le temps perdu aux carrefours.

Davis	$t = t_0 * (\beta - \alpha Q/C) / (\beta - Q/C)$ pour $Q < C$ $t = t(1) + 60(Q/C - 1)$ pour $Q \geq C$ en mode "demande écrêtée" $t = t(1) + \beta (1 - \alpha) (Q/C - 1) / (\beta - 0,92)^2$ pour $Q \geq C$ en mode "saturation linéaire" $t = t(1) * (Q/C)^2$ pour $Q \geq C$ en mode "saturation quadratique"	$\alpha \in [0, 1]$; $\beta > 1$ $\beta = 1,2$ en demande écrêtée ; en général $\beta = 1,1$ sinon
BPR	$t = t_0 * [1 + \alpha (Q/C)^\beta]$	Dans UTPS : $\alpha = 0,63$ et $\beta = 4$
Conique généralisée	$t = t_0 * \{ 1 + \gamma + [\alpha^2 (1 - Q/C)^2 + \beta^2]^{(1/2)} - \alpha(1 - Q/C) - \beta \}$	$\alpha > 1$; $\gamma \in [0, 1]$ $\beta = \gamma (2\alpha - \gamma) / 2(\alpha - \gamma)$
IITPR	$t = t_0 c_1 / \{ 1 - c_2 / [1 + \exp(c_3 - c_4 Q/C)] \}$ $+ d_0 p_1 \{ 1 + p_2 / [1 + \exp(p_3 - p_4 Q/D)] \}$	
Q : débit ; C : capacité sur l'arc t : temps en charge ; t_0 : temps à vide sur l'arc d_0 : temps de franchissement du carrefour à vide ; D : capacité du carrefour c_i et p_j : paramètres d'ajustement		

Tableau 6 Différentes formules de courbes débit-vitesse.

²⁴ Proposée notamment par un des auteurs d'Emme/2, logiciel qui laisse cependant la liberté de choisir la forme des courbes débit-vitesse, ce qui n'est pas le cas général. Formule généralisée par F. Leurent.

- (iv) L'étude²⁵ menée pour la DREIF en 1998 par SRILOG et l'INRETS a testé plusieurs formulations sur plusieurs VRU franciliennes qui apparaissent comme comparables. On se reportera à l'article cité en note pour plus de détail, en particulier en ce qui concerne le traitement proposé pour les routes avec feux.

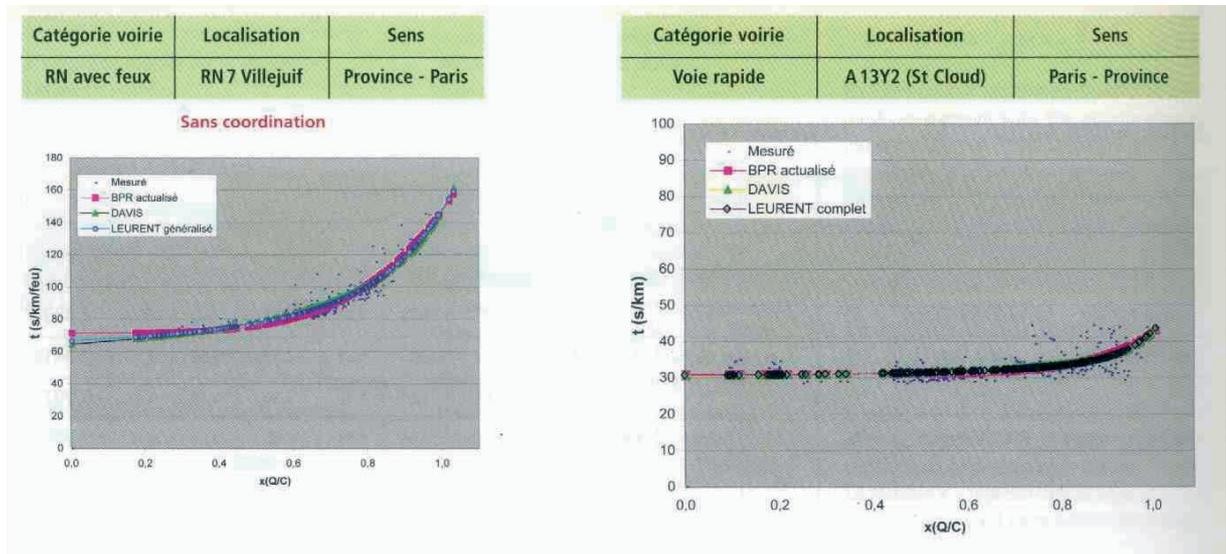


Figure 4. Données et courbes débit-vitesse en Île-de-France.

Voie	Type	t_0 (s/km)	α	β	R^2 ajusté
VRU – A13	BPR	31,0	0,37	7,15	0,889
	DAVIS généralisé	30,6	0,97	1,09	0,871
	Conique généralisé	30,7	3,69	-0,44	0,876
RN 7 Orly	BPR	49,6	0,51	3,54	0,941
	DAVIS généralisé	47,0	0,81	1,33	0,926
	Conique généralisé	47,6	2,02	-0,80	0,933

Tableau 7 Calage de courbes débit-vitesse en Île-de-France.

- (v) Les courbes débit-vitesse sont bien évidemment différentes selon les classes de véhicules ; la différenciation principale concerne essentiellement les PL, en particulier sur voies rapides et en milieu interurbain où leur vitesse est plus faible que celle des voitures (en centre-ville, où le trafic est très dense, tous les véhicules vont à peu près à la même vitesse, à l'exception des bus ou taxis bénéficiant d'un site propre). Les courbes débit-vitesse s'appliquant aux PL peuvent généralement être déduites de celles des VL par altération de la vitesse des VL, par exemple avec une formule d'altération hyperbolique du type $V_{PL} = V_{VL} / (1 + a V_{VL})$ où $a = 1/450$, qui fait correspondre une vitesse PL de 95 km/h à une vitesse VL de 120 km/h.
- (vi) Pour les modes doux (vélo, marche), l'usage est de retenir une vitesse constante.

²⁵ S. Cohen, MY Zhang, P. Ginier, Les relations temps de parcours débit sur le réseau routier d'Île-de-France, un outil pour la planification, in Revue Générale des routes et aéroports, n°792, février 2001.

3.6 Les connecteurs (ou arcs fictifs)

Les connecteurs (ou arcs fictifs) permettent de relier les centroïdes, points d'émission/réception du trafic des différentes zones, aux nœuds réels du réseau. Ils représentent la voirie locale de façon schématique (en général un connecteur correspond à plusieurs voies de desserte regroupées). Il convient de bien choisir la position et le nombre des nœuds de raccordement du réseau pour ne pas fausser le modèle :

- l'examen d'une carte, complété éventuellement par une visite du site, doit permettre d'identifier les points d'entrée réels sur le réseau (souvent un carrefour) ;
- il ne faut pas saturer localement le réseau en affectant trop de trafic sur un arc fictif ; dans la pratique, pour évaluer le nombre raisonnable d'arcs fictifs, il est commode de diviser le plus grand des nombres d'émissions et de réceptions de la zone par une capacité moyenne admissible par les arcs fictifs (par exemple 1 200 véhicules/heure (capacité d'environ deux voies de distribution).

Exemple : la zone i émet 3 000 véhicules/heure et en attire 5 000 ; il faut répartir le trafic sur $\max(3\,000, 5\,000)/1\,200 = 4$ ou 5 connecteurs

- on évitera de placer un connecteur dans un carrefour clé, de manière à ne pas fausser la lecture des mouvements tournants

La localisation du centroïde et la longueur des connecteurs doivent être également choisies pour représenter au mieux la répartition urbaine et démographique des zones; si S est la surface de la zone, on pourra prendre entre 0,4 et $0,5 \cdot S^{1/2}$ (rayon du cercle équivalent et demi-côté du carré équivalent) + entre 10 et 40 % pour tenir compte de la différence entre longueur à vol d'oiseau et longueur circulée. Une autre technique consiste à prendre une fraction de la plus petite distance à la zone la plus proche, ou une fraction de la moyenne des distances aux zones les plus proches²⁶.

La vitesse sur les connecteurs est généralement supposée constante et doit être représentative du type de zone (15 à 25 km/h en centre ville, 30 à 50 km/h en zone périurbaine par exemple). La capacité est donc en général infinie, les phénomènes de congestion n'étant pas représentés sur la voirie locale.

3.7 Carrefour et échangeurs, mouvements tournants, pénalités

- (i) Les carrefours et les échangeurs constituent des secteurs spécifiques du réseau où se concentrent fréquemment les problèmes de circulation, dans la mesure où ce sont bien souvent eux –et non la section courante- qui déterminent la capacité d'un axe et, plus généralement, d'un réseau ; leur description nécessite donc un soin particulier.
- (ii) Dans le cas où le carrefour ou l'échangeur n'est pas décrit en détail, mais seulement par un nœud (c'est par exemple le cas quasi général pour un carrefour à feux simple), il importe de :

²⁶ On peut également établir une distance de connecteur avec une méthode, et un coût généralisé pour les déplacements intrazonaux avec une autre méthode. On veillera toutefois à une certaine cohérence.

- fixer la capacité en section courante à celle du carrefour ; on considère généralement qu'un carrefour à feux peut écouler 1 400 véhicules par voie et par heure de vert, ce qui permet d'évaluer la capacité du carrefour en fonction du cycle et du nombre de voies, sur l'axe et les axes concourants.
 - tenir compte du carrefour dans l'estimation de la vitesse sur les axes concourants;
 - préciser le fonctionnement du carrefour en spécifiant les mouvements interdits et en introduisant éventuellement des pénalités additives de temps pour certains mouvements (tourne à gauche en particulier).
- (iii) Si la géométrie du carrefour ou de l'échangeur est décrite précisément (giratoire, bretelles...), la capacité des différentes branches ou bretelles sera introduite. Mouvements interdits et pénalités seront précisés comme dans le cas précédent.
- (iv) Plus généralement le recours à des pénalités additives sur des arcs ou séries d'arcs peut être indispensable pour retranscrire de façon convenable les situations de saturation en heures de pointe. Cette méthode est généralement satisfaisante pour établir des calages en temps de parcours, mais elle induit des difficultés pour les affectations aux horizons, compte tenu de l'impossibilité de prévoir l'évolution de ces pénalités dans des hypothèses de réseaux et de demandes modifiées. Le recours aux modèles de simulation dynamiques, utilisés sur des points particuliers, peut apporter une réponse intéressante à ce problème (le temps perdu peut être estimé en fonction de la charge du carrefour); une telle approche est cependant lourde et ne se justifie que si le carrefour en question est fondamental dans la modélisation.
- (v) L'introduction de pénalité pour reconstituer un problème ponctuel de saturation risque en outre d'impliquer une différenciation du réseau selon la tranche horaire, ce qui n'est ni satisfaisant sur le plan théorique, ni pratique à manier.

3.8 Péage, bonus-malus

- (i) La description des arcs doit ensuite être complétée, pour certains, par :
- l'introduction du péage ;
 - la prise en compte d'un bonus-malus (qui s'ajoute dans le calcul du coût généralisé).
- (ii) Les péages peuvent être simples à codifier quand ils s'appliquent soit à un ouvrage spécifique (pont, tunnel), soit à un système ouvert (tarif unique à une barrière), soit encore à un système fermé (péage proportionnel à la distance parcourue) : dans tous les cas, il s'agit seulement de remplir un champ supplémentaire pour certains arcs.
- Cependant trois types de difficultés peuvent se présenter :
- le péage peut dépendre du couple entrée/sortie sur le réseau payant ; seuls certains logiciels permettent de décrire ce type de structure.
 - un autre problème, plus fréquent, est la prise en compte de plusieurs niveaux de péage pour une même catégorie de véhicules, par exemple abonnés et non-abonnés (voir chapitre 6 § 1.3.2).
 - le péage peut varier selon les périodes horaires

- (iii) Enfin, certaines voies se révèlent plus attractives²⁷ que ne le laissent supposer leurs caractéristiques physiques, soit du fait de leur confort et de leur sécurité (autoroutes), soit parce qu'elles permettent par exemple de découvrir un paysage agréable (cas de corniches en bord de mer par exemple). Dans ce cas, on applique une sorte de péage négatif appelé bonus (ou malus dans le cas contraire). Dans le comportement des automobilistes, bonus et valeur du temps sont deux paramètres difficilement dissociables (voir chapitre 6 § 2.2 sur la valeur du temps). Signalons toutefois que, si on dispose d'études et de mesures de la valeur du temps relativement probantes, en revanche, la détermination de bonus – malus reste beaucoup plus empirique. De surcroît, il semble que les différences d'appréciation selon les usagers soient importantes, rendant la détermination de paramètres moyens plus délicate.

3.9 Collecte des données

3.9.1 Reconnaissance du réseau

Comme nous l'avons dit au *chapitre 1*, tous les éléments vérifiables d'un modèle doivent être vérifiés; c'est en particulier le cas du réseau, dont la reconnaissance physique est toujours possible, l'étendue de celle-ci ne dépendant que du délai et du budget de l'étude. Par ailleurs, l'analyse de photographies aériennes peut compléter le dispositif de reconnaissance pour certains points particuliers. La méthode décrite ci-dessous n'est pas "standard", elle a cependant le mérite d'être très précise par rapport aux objectifs de vérification du réseau.

En une journée, soit pour environ 500 euros, environ 200 km peuvent être généralement reconnus (soit 400 km de réseau, deux sens confondus); ainsi, pour la modélisation du réseau de l'Île-de-France, au total, plus de 8 500 km ont été reconnus sur un total de 21 000 km, deux sens, pour un coût total de l'ordre de 10 000 euros.

- (i) Une reconnaissance efficace d'un réseau important doit être préparée et planifiée. A raison de huit heures quotidiennes, un véhicule peut parcourir, selon le type de voie, 150 à 250 km par jour en milieu urbain.

Les itinéraires doivent être cartographiés et, pour faciliter la saisie des données, il est souhaitable que les numéros de nœuds du réseau figurent sur le plan. Une équipe de deux personnes (un pilote et un co-pilote, de préférence interchangeables pour limiter la fatigue) suit l'itinéraire préétabli et remplit un tableau contenant date, heure et conditions météorologiques où figurent par exemple, sur une ligne :

- nœud A
- nœud B
- localisation et numéro de route
- point kilométrique du nœud A
- point kilométrique du nœud B
- heure de passage au nœud A
- nombre de voies VP
- voie bus éventuelle
- stationnement autorisé et illicite, livraisons
- feu tricolore
- capacité totale estimée

²⁷ ou moins attractives pour des raisons opposées

- vitesse au compteur
 - limitation de vitesse
 - type de route
 - mouvements tournants interdits
 - nombre de voies dans le sens opposé
 - observations et remarques diverses
- (ii) Lors de la reconnaissance, les heures de passage notées aux différents nœuds donnent des temps de parcours, qui n'ont pas de valeur statistique, mais qui donnent une indication de la vitesse dans la période horaire de passage. Par ailleurs ces mesures doivent permettre de planifier les campagnes de mesures de temps de parcours ultérieures (la reconnaissance donne en effet des indications sur le temps de parcours d'un itinéraire et sur les points particuliers qu'il convient de noter).
- (iii) Là où il n'existe pas de postes de comptages, il pourra également être utile de réaliser en certains points des comptages sur de courtes périodes (6 minutes par exemple) qui donneront une idée du trafic horaire sur la période considérée.

3.9.2 Comptages

- (i) Il est essentiel de recueillir le maximum de comptages existants, horaires dans la mesure du possible, afin de constituer une base de données pour le calage, généralement ordonnée par coupures ou lignes-écrans (*voir chapitre 6 § 3*). Les comptages permettent également de disposer d'un minorant de la capacité. Ces données sont généralement disponibles auprès des CDES des DDE, des exploitants d'ouvrages à péage et dans les services techniques des villes ou structures intercommunales. A noter que beaucoup de ces comptages sont effectués pour les besoins de l'exploitation des réseaux de voirie urbaine (gestion de feux tricolores ou d'ondes vertes); prévus dans le but d'assurer le fonctionnement convenable du système, ils peuvent alors être approximatifs (voire faux dans le cas, par exemple, de boucles défectueuses). Il convient donc d'avoir un regard critique sur les comptages collectés, selon leur nature, et d'effectuer des contrôles ponctuels in situ pour s'assurer de leur vraisemblance. Par ailleurs, ces comptages étant souvent effectués pour les besoins de la régulation de trafic, leur collecte systématique à des fins d'utilisations statistiques n'est pas toujours faite et il convient alors de demander les données brutes ou des traitements spécifiques aux responsables d'exploitation.
- (ii) Une difficulté relative aux unités est à relever : les comptages donnent des paires d'essieux ou des véhicules. Il peut donc exister une certaine imprécision due au pourcentage de poids lourds.
- (iii) Là où l'administration ne dispose pas de comptages, il peut être utile de procéder à des comptages manuels et/ou d'installer des compteurs automatiques. Les précautions sont alors inhérentes au type de matériel utilisé, ainsi que les niveaux moyens de fiabilité. Dans tous les cas un contrôle rigoureux est nécessaire ainsi qu'un suivi pendant la période de comptage, généralement de l'ordre d'une semaine ou deux.
- (iv) Une fois les données de comptage à disposition, il convient de les traiter en fonction des besoins de la modélisation : élimination des mesures erronées,

calculs de moyenne par heure ou par période horaire, par jour, par mois, maximum enregistré, trentième heure²⁸, etc.

3.9.3 Mesures de temps de parcours

Des mesures de temps de parcours VP (et éventuellement PL) sont évidemment indispensables dans le cas d'études d'infrastructures à péage ou de projet de déviation; mais elles sont également nécessaires pour évaluer sérieusement les problèmes de concurrence modale.

- (i) Dans les agglomérations où existe un système de gestion du trafic (du type SIRIUS en Île-de-France ou MARIUS dans la région marseillaise), il est possible d'obtenir des temps de parcours moyens aux différentes tranches horaires, par intégration des données issues des capteurs de vitesse. Toutefois, ces données ne sont généralement disponibles que sur le réseau de voirie rapide. A noter également l'exploitation faite par certains concessionnaires autoroutiers des temps de parcours effectifs des abonnés entre les divers points de perception de péage (cas du système MIGRAZUR dans les Alpes-Maritimes).
- (ii) En l'absence de tels systèmes (notamment pour les voies non rapides, en particulier celles avec feux), il est presque toujours nécessaire de procéder à des mesures en utilisant la technique du véhicule flottant : un véhicule parcourt un itinéraire donné aux différentes périodes de la journée en roulant à la vitesse moyenne du flux (en essayant de se faire doubler par autant de véhicules qu'il aura doublés). Les temps de passage sont notés (manuellement ou automatiquement avec des outils embarqués qui nécessitent l'équipement préalable de véhicules²⁹) en un certain nombre de points remarquables. Pour avoir une valeur statistiquement significative, ces mesures doivent être répétées, si possible au moins dix fois (mais le coût de ces mesures est directement proportionnel à leur nombre), et ce d'autant plus que le réseau est saturé car la variabilité des temps de parcours augmente avec la congestion ; il est très important d'évaluer cette variabilité car les usagers l'intègrent dans le choix de leur itinéraire sous la forme d'un temps de précaution ou d'un coefficient de fiabilité de temps de parcours que certains modèles peuvent prendre en compte.

3.9.4 Obtention des courbes débit-vitesse

Dans la pratique, l'obtention des courbes débit-vitesse peut se faire de différentes manières :

- utilisation de courbes basées sur des mesures récentes, sur un réseau assimilable au réseau à modéliser (même type d'agglomération, de véhicules, de comportement des conducteurs...).
- utilisation directe de mesures pré-existantes sur certaines des voies à modéliser : de telles données sont par exemple disponibles quand il existe un système de gestion du trafic utilisant à la fois des capteurs de débit et de

²⁸ Pour un poste de comptage permanent, trafic horaire correspondant au trentième rang des comptages si l'on classe les comptages horaires des 8760 heures de l'année par ordre décroissant

²⁹ Exemple : logiciel MITEMPS développé par le CERTU

- vitesse ou, plus couramment, des stations SIREDO (qu'il convient de programmer en fonction des données souhaitées).
- réalisation de mesures spécifiques sur certaines voies importantes dans le modèle (notamment voies avec feux tricolores) ; plusieurs méthodes sont possibles, comme la pose de capteur de débit et de vitesse, ou l'utilisation du magnétophone ou de la vidéo en deux points distants du même axe avec synchronisation : les véhicules sont comptés et grâce à l'identification de leur plaque d'immatriculation, les temps de parcours sont mesurés, et ce tout au long de la journée, reflétant donc les différents niveaux d'occupation de la voirie.

A noter que, compte tenu du caractère transitoire des phénomènes de saturation des réseaux routiers, les données traitées doivent être rendues cohérentes, autant que possible, avec la durée des périodes modélisées (par exemple, la capacité révélée par des mesures " 6 minutes " en station SIREDO rapportée à une heure, est en général supérieure à la capacité horaire effective).

En ce qui concerne la capacité, le plus souvent, la codification des réseaux permet de définir une capacité des tronçons mais pas une capacité de mouvement tournant (le trafic d'un tronçon est égal à la somme des trafics tournants au carrefour aval, il n'est pas sûr que, suivant la répartition de ceux-ci, tous puissent s'écouler). Cette difficulté sera tournée par la description détaillée des mouvements tournants du carrefour. On pourra suivant le cas calculer la capacité d'un tronçon en l'identifiant soit à la capacité de la section courante (nombre maximum de véhicules que la section peut écouler en une heure tenant compte des caractéristiques géométriques et de l'utilisation de la voirie de la section), soit à la capacité de l'entrée dans le carrefour aval (tenant compte des caractéristiques géométriques de l'entrée et du régime de priorité), soit au minimum de ces deux quantités. Le choix se fera selon la longueur du tronçon et le milieu (rase campagne ou milieu urbain) ; on pourra être amené ici à découper des tronçons pour donner des capacités différentes. Pour les carrefours à feux, l'usage est de retenir 1 200 à 1 400 véh./heure de vert par voie pour les carrefours à deux phases et 900 à 1 000 véh./ heure de vert par voie pour les carrefours à trois phases.

Le tableau suivant donne un exemple de paramétrage utilisé par défaut par SETEC avec les logiciels DAVIS ou DAVISUM :

Classification proposée pour la formulation DAVIS			
Type de voie	Capacité / Voie	Vitesse à vide	Coefficient de courbure C_f
Autoroute	1800 à 2200	120-130	0.90
Voies rapides urbaines	1800 à 2200	80	0.80
Route à grande circulation			
- 2 chaussées	1800	110	0.65
- 1 chaussée	1800	90	0.65
Liaison régionale	1500	90	0.60
Autres liaisons	1400	75	0.60
Bretelles	1500	50	0.60
Voies artérielles	1100	60	0.65
Voies de desserte ⁽¹⁾	900	50	0.60
Voies de distribution	700	35	0.50
Remarques :			
- On rappelle (chap. 2 , partie B §3.5) que dans Davis $V = V_0 * (\beta - Q/C) / (\beta - C_f * Q/C)$ avec $\beta = 1,1$ ou $1,2$ selon le mode			
- Dans Paris, on a pris $V_0 = 30$ ou 35 km/h et $C_f = 0.4$ pour les routes appartenant à la catégorie voie de desserte. A l'intérieur de A86 on a pris $V_0 = 35$ à 45 km/h et $C_f = 0.4$ pour les routes appartenant à la catégorie voie de desserte.			

Tableau 8 Classification des voies utilisée par défaut par SETEC pour la formulation DAVIS

Ces valeurs, en particulier celles des coefficients de courbure, sont sensiblement différentes de celles antérieurement retenues par défaut dans Davis ou OPERA (voir en annexe A10). Une étude de mise à jour de ces courbes sur des sites de VRU en province est en cours de réalisation par le Cete de Nantes, pour le compte du Certu ; celle-ci sera prochainement publiée.

3.10 Contrôle du réseau

Une première affectation permettra de vérifier la cohérence du réseau ainsi construit, en faisant apparaître par exemple des nœuds ou arcs non raccordés, identifiables au fait que l'on obtient un trafic nul sur certaines portions du réseau, ou que le logiciel ne trouve aucun chemin entre deux zones. Les logiciels d'affectation font généralement apparaître des messages en ce sens. A noter que des matrices fictives (remplies de " 1 " par exemple) peuvent suffire à réaliser ce travail : il n'est donc pas utile d'attendre de disposer des matrices de demande pour l'entreprendre.

Le contrôle du réseau doit se faire à travers des cartographies thématiques visant les principales caractéristiques : péage, capacité, vitesses. En outre, les mouvements interdits doivent faire l'attention d'une grande vigilance (en particulier dans les

échangeurs et dans la situation où les chaussées autoroutières ne sont pas distinguées). Les erreurs dues à une codification erronée ne sont pas toujours faciles à déceler³⁰.

La comparaison des longueurs déclarées et des longueurs à vol d'oiseau est également intéressante.

4. Saisie et codification des réseaux TC

4.1 Remarque préliminaire

Autant la séparation est claire entre réseau et affectation VP, autant cette distinction est plus ténue pour les TC. En effet, nombre de notions concernant directement ou indirectement le réseau peuvent en fait être considérées comme des paramètres de l'affectation ; il en est notamment ainsi pour :

- les divers temps et pénalités (d'accès, d'attente, de correspondance...) constituant le temps ou le coût généralisé ;
- les bonus applicables aux divers modes TC (variables selon le confort, la régularité, l'image...),
- la tarification.

En conséquence, les développements apportés dans ce paragraphe concernent strictement la description du réseau tandis que l'essentiel des subtilités de la modélisation des TC fait l'objet du *chapitre 7* "Affectation TC" auquel le lecteur se reportera utilement.

4.2 Description générale d'une ligne

- (i) Le mode de chaque ligne (bus, tram, métro, train...) est bien sûr spécifié : des attributs spécifiques à chaque mode pourront être attribués globalement.
- (ii) Une ligne de TC est décrite comme une succession de nœuds correspondant aux différents arrêts, ou dans le cas de bus, à des groupes d'arrêts de bus (pour les modes plus lourds, l'ensemble des arrêts est généralement décrit). Les caractéristiques à l'aller et au retour peuvent être différentes, spécialement le tracé de la ligne et la vitesse commerciale (notamment aux heures de pointe ou en cas de l'existence de couloirs bus dans un seul sens...). Enfin, il est clair que la modélisation des lignes ne concerne que les missions, c'est-à-dire les parcours où les TC prennent et déchargent des passagers, à l'exclusion des parcours terminaux pour accéder aux dépôts (courses à vide, dites "haut-le-pied").³¹
- (iii) Pour chaque nœud, on précise la fréquence de chacune des lignes qui y passe, parfois par période horaire. Entre deux nœuds, le temps de parcours (ou la vitesse) est indiqué (ou vitesse moyenne sur la ligne, etc.). On peut également tenir compte des horaires effectifs de passage. Il est aussi possible de remplir une vitesse et une fréquence en bout de ligne ou sur certains nœuds seulement, les nœuds intermédiaires étant calculés automatiquement.

³⁰ DAVISUM est un des seuls outils qui permet d'éditer des cartes sur ces interdictions

³¹ On peut cependant s'intéresser aux "haut le pied" afin d'évaluer les kilomètres réellement parcourus et donc les coûts totaux d'exploitation.

- (iv) En cas de possibilité de correspondance entre plusieurs lignes, soit les arrêts sont confondus soit les arrêts sont éloignés, auquel cas il est généralement possible de décrire un arc de marche.
- (v) Les connecteurs correspondent aux temps d'accès en marche à pied (en général 4 km/h) ou, plus rarement, aux temps de rabattement et de stationnement VP.
- (vi) Le prix du ticket doit pouvoir être rentré, soit par couples entrée/sortie sur le réseau, soit proportionnellement à la distance parcourue. On voit ici que la détermination du prix moyen de parcours peut être extrêmement délicate, selon la nature des abonnements proposés et la part des abonnés. Les problèmes de tarification font l'objet d'un paragraphe particulier au chapitre 7 § 2.2.
- (vii) La notion de capacité est rarement intégrée dans les modèles. Elle doit cependant pouvoir être prise en compte, notamment en cas de concurrence entre plusieurs lignes ou modes TC, car il est certain que des bus surchargés sont nettement moins attractifs que des bus où tout le monde peut s'asseoir. La capacité dépend à la fois de la fréquence et du type de véhicule. Cependant, contrairement aux courbes débit/vitesse des réseaux VP, les données disponibles pour ajuster les courbes débit/niveau de confort sont difficiles à trouver.
- (viii) Un tronçon commun à plusieurs lignes peut être défini par une ligne fictive qui cumule les fréquences des différentes lignes.

4.3 Temps de parcours

- (i) Caractéristiques principales des lignes :

- Utilisation des horaires

Comme on l'a vu précédemment, avec certaines procédures d'affectation, il est possible de travailler sur la base des horaires : dans ces conditions, il est nécessaire de disposer pour toutes les lignes et pour tous les arrêts, d'horaires de passage analogues à l'exemple ci-dessous. Selon les objectifs de l'étude, on pourra se limiter à quelques périodes-type de la journée (heure de pointe du matin, heure de pointe du soir, heure moyenne...) de manière à limiter le nombre de données à intégrer.

Certains logiciels calculent également les horaires de passage en fonction d'une grille d'horaire au terminus et de vitesse par arc.

Horaire de passage à l'arrêt **SAINT PIERRE**
 pour un déplacement le **15/10/2001**
 ligne numéro **14 METRO LA TIMONE-LES CAILLOLS HOPITAL**
 direction **LES CAILLOLS HOPITAL**

4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	0	1	2
	30	3	5	9	5	5	5	6	6	6	6	6	4	0	8	19	28					
		35	19	20	20	20	20	21	21	21	21	21	12	8	24	43						
			27	35	35	35	36	36	36	36	36	31	20	16	39							
			35	50	50	50	51	51	51	51	51	40	28	24	55							
			43									48	36	32								
			50									56	44	41								
			58									52	55									

Figure 5. horaire de passage d'une ligne de bus à Marseille

▪ Temps inter-fréquence et vitesses commerciales

Pour chaque ligne, il est nécessaire de définir la fréquence souvent codifiée dans les logiciels de planification sous la forme du temps entre deux dessertes : c'est le temps inter-fréquence ou headway en anglais. Une telle fréquence risque fort de varier selon les périodes de la journée, et si on veut reproduire les flux de l'ensemble de la journée, il faudra simuler avec le modèle différentes périodes distinctes qui seront ensuite agrégées.

Il en est de même pour la vitesse commerciale qui peut varier selon les heures de la journée et l'encombrement de la voirie pour les modes qui ne sont pas en site propre. La vitesse commerciale sur un tronçon devra tenir compte des arrêts qui ne sont pas explicitement pris en compte dans le modèle TC : pour les arrêts explicitement pris en compte, on aura à codifier d'autres paramètres relatifs aux montées/descentes et aux correspondances.

Autobus	Tramway	Métro
10 à 35*	15 à 25	25 à 35

* peut atteindre 35 km/h en périurbain

Tableau 9 Vitesses commerciales caractéristiques des différents modes TC (km/h)

On doit parfois également codifier pour chaque ligne le **temps de battement**, c'est à dire le temps d'interruption de service - s'il existe - une fois arrivé au terminus : cette information est nécessaire pour des trajets empruntant des lignes ne desservant pas les mêmes arrêts à l'aller et au retour et pour lesquels on va au bout de la ligne pour la reprendre en sens inverse, ce qui est relativement rare. Elle est plus importante lorsque l'on aborde le domaine des calculs économiques et des coûts d'exploitation.

Le temps d'attente est directement calculé à partir de la fréquence ; soit w ce temps d'attente et f la fréquence de la ligne, on a en général :

$$w = \frac{\alpha}{f}$$

α est un paramètre dont la valeur dépend des hypothèses faites sur la distribution des arrivées des véhicules et des passagers à l'arrêt où est calculé le temps d'attente. Si on

considère que les véhicules arrivent à l'arrêt selon une loi exponentielle³² de moyenne $1/f$, α sera égal à 1 ; lorsque l'on considère que les véhicules arrivent selon une loi constante de moyenne $1/f$, les passagers arrivant selon une loi uniforme, un calcul approché donne pour de α une valeur 0,5 souvent utilisée dans les études.

Le paramètre α peut également varier selon la valeur de la fréquence : en effet, lorsque la fréquence est faible, le temps d'attente est nettement inférieur au demi temps interfréquence car les usagers connaissent les horaires de passage. On peut alors conserver comme valeur du temps d'attente le demi-temps interfréquence mais en plafonnant la valeur à 15 minutes par exemple ; on peut également utiliser certaines courbes empiriques modulant α en fonction de f dont on donne un exemple ci-après.

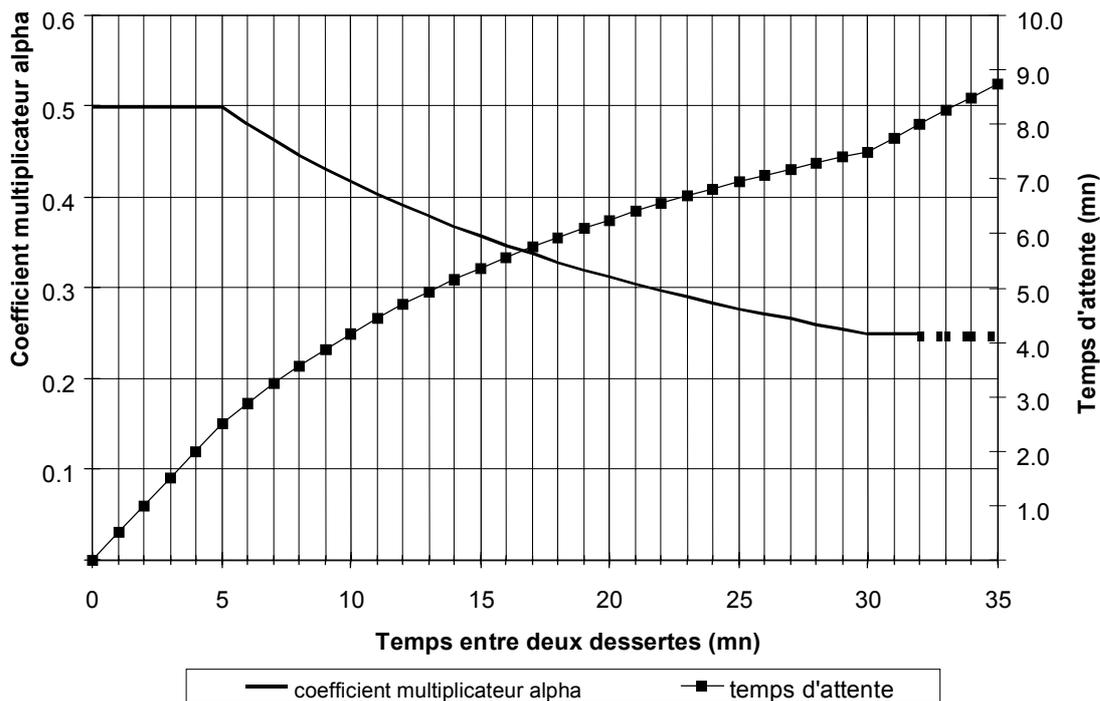


Figure 6. Détermination du temps d'attente en fonction des fréquences de desserte (en min.)

(ii) Autres paramètres définissant les lignes

A l'exception de la tarification qui fait l'objet d'un autre paragraphe, les autres paramètres associés aux lignes concernent principalement les **temps d'arrêt** aux stations : le temps d'arrêt peut être une constante ou bien varier³³ selon les nombres de montées et de descentes à chaque arrêt calculés lors de l'affectation (il faut alors utiliser une procédure d'équilibre). On notera que si la congestion doit être intégrée à l'analyse, il sera nécessaire de définir une capacité par ligne homogène avec le nombre de véhicules circulant durant la période de simulation.

Si on ne code pas tous les arrêts, il est nécessaire de réintégrer les temps d'arrêt dans le temps de trajet en section de manière à disposer d'un temps de parcours porte-à-porte conforme à l'observation.

³² Il s'agit ici d'un abus de langage puisque ce sont les temps d'arrivée entre deux véhicules qui sont distribués selon une loi exponentielle.

³³ Il s'agit généralement d'une variation linéaire sur la base d'un nombre de montées/descentes par unité de temps.

(iii) Codification au niveau des arrêts

Deux types d'éléments doivent être codifiés au niveau des arrêts : il s'agit d'une part des correspondances et d'autre part des liens de rabattement vers les centroïdes qui permettent à la demande des différentes zones du modèle d'accéder au réseau TC.

Ces deux types d'éléments appartiennent aux paramètres pour lesquels le niveau de détail de codification est directement lié au type de résultats attendus.

Pour une analyse globale au niveau du système de TC d'une agglomération, on peut n'inclure dans le réseau que les arrêts principaux : certains outils de planification permettent alors de générer automatiquement les liens de correspondance entre les différentes lignes sur la base d'un critère de proximité entre les arrêts.

Cependant, ce type de codification n'est pas toujours suffisant : si l'on veut connaître les flux par arrêt de manière détaillée et reproduire finement le comportement et les chaînes modales, il est nécessaire d'apporter un soin particulier aux correspondances et rabattements. Selon les cas, ce soin peut aller jusqu'à la mesure de temps de parcours piétonnier à l'intérieur d'un pôle d'échange multimodal ou entre deux arrêts.

Pour les rabattements des centroïdes vers les arrêts, on établira le mode de rabattement (marche à pied ou VP) puis les différentes caractéristiques associées à ce trajet : temps de parcours et coût éventuel (utilisation du véhicule, tarification du stationnement...).

Comme on l'a dit précédemment, le niveau de détail de la codification, et en particulier le nombre d'arrêts effectifs à codifier, dépend avant tout du niveau de détail des résultats à fournir : il dépend aussi de la densité du réseau, de la taille et du nombre des zones. On codifiera cependant au minimum un arrêt pour chaque ligne desservant une zone, certains arrêts étant communs à plusieurs lignes.

4.4 Collecte des données

- (i) La vitesse commerciale et la fréquence aux différentes tranches horaires sont généralement fournies par les exploitants ou par l'autorité organisatrice de transport. Dans le cas de bus intégrés dans le flux de circulation VP, il est possible de tenir compte de la vitesse de circulation VP déduite d'un modèle VP, dont la description du réseau doit intégrer les diminutions de capacité imputables aux TC (*voir chapitre 7 §1.4*).
- (ii) Pour certaines correspondances importantes, il peut être utile de procéder à des mesures de temps de liaison entre lignes.
- (iii) Les aléas des temps de parcours, qui peuvent être modélisés par un malus (*cf. chapitre 7 § 2.3*), peuvent être estimés par des mesures répétées (par exemple pendant dix jours ouvrables consécutifs, pour une même tranche horaire).
- (iv) Un tronçon commun à plusieurs lignes peut entraîner des contraintes d'exploitation influant sur la vitesse d'exploitation quand les fréquences sont importantes (cas par exemple de plusieurs lignes de tramway qui doivent adopter des règles de priorité). Dans le cas d'un projet, le temps perdu peut être

évalué à l'aide de programmes décrivant la marche des trains ou d'un logiciel microscopique dynamique.

5. Pour en savoir plus

➤ **Ingénierie du trafic routier - Éléments de théorie du trafic et applications**

1990

Auteur : Simon Cohen

Éditeur : ENPC

Ce cours de l'ENPC fournit les fondements des méthodes de recueil et d'exploitation des données de trafic. Il dépasse le seul problème de la modélisation macroscopique statique, puisqu'une partie importante de l'ouvrage est consacrée aux carrefours à feux et à la régulation.

➤ **Les relations « temps de parcours-débit » sur le réseau routier d' Île-de-France.**

Un outil pour la planification

fév-01

Auteurs : S. Cohen, MY. Zhang, P. Ginier

Éditeur : RGRA n°792

Cet article présente les éléments essentiels d'un travail visant à actualiser les courbes temps de parcours-débit utilisées pour les questions de planification des transports routiers en Île-de-France. L'objectif de la recherche consiste d'abord à élaborer une méthodologie de calibrage fondée sur les données habituellement fournies par les systèmes d'exploitation. Par la suite, la méthode est appliquée à diverses catégories d'aménagements : autoroutes et voies rapides, routes nationales (RN sans feux) et artères urbaines signalisées (RN avec feux).

Chapitre 3. Estimation de la demande en situation de référence

Mots clés :	
<u>Enquête ménages déplacements</u>	Enquête auprès d'un échantillon des ménages résidents d'une agglomération permettant de caractériser leurs déplacements
<u>Motif d'un déplacement</u>	Le motif d'un déplacement est codifié par rapport aux fonctions ou activités des lieux de départ et d'arrivée vis-à-vis de la personne considérée (ex. : Domicile [à l'origine] ⇒ Achats [à la destination])
<u>Flux interne, d'échange et de transit</u>	Un flux de déplacements est interne à une aire d'étude lorsque son origine et sa destination sont à l'intérieur de l'aire considérée. Il est d'échange lorsque seule l'origine ou la destination est à l'intérieur de l'aire d'étude. Il est de transit lorsque ni l'une ni l'autre ne sont à l'intérieur de l'aire considérée : le flux ne fait alors que traverser l'aire
<u>Macro-zonage</u>	Assemblage des zones du zonage de base en macro-zones relativement homogènes du point de vue de la problématique relative à une question particulière
<u>Focalisation</u>	Processus qui consiste à transformer les matrices correspondant au zonage de base, en matrices correspondant à un macro-zonage
<u>Génération</u>	Processus de modélisation des flux émis et attirés par les zones modélisées, pour la période considérée, faisant intervenir les caractéristiques socio-économiques des zones et les caractéristiques de mobilité
<u>Distribution</u>	Processus de modélisation de la répartition des flux générés et attirés par une zone donnée entre les autres zones de l'agglomération (détermination des flux correspondant aux différentes origines-destinations possibles) en fonction des attributs des systèmes de transport
<u>Modèle gravitaire</u>	Modèle de distribution fondé sur le principe « gravitaire » selon lequel les flux entre deux zones sont d'autant plus grands qu'elles sont « proches » et que leur « poids » est important

Le travail d'élaboration des matrices de déplacements est le plus délicat et le plus incertain du processus de modélisation. Comme précisé dans le chapitre 1, ce travail consiste dans un premier temps à reconstituer la demande en situation de référence,

objet du présent chapitre, et dans un deuxième temps à se projeter aux horizons futurs (chapitre 4). L'élaboration des matrices se heurte d'abord à la difficulté de collecte de *bases de données* et à leur caractère disparate. La *partition de la demande* doit en tenir compte, tout en étant compatible avec la problématique qui sous-tend l'élaboration du modèle. Le processus de calcul qui s'ensuit est alors plus ou moins complexe. Le plus couramment, il est décomposé en deux étapes : *génération* puis *distribution*. Il peut être possible, selon les circonstances et selon les objectifs visés par le modèle, de *combinaison ces étapes*. Dans tous les cas, les difficultés mentionnées imposent au modélisateur de procéder à des *contrôles et validations* tout au long du processus et d'assurer une parfaite « traçabilité » de la méthode suivie.

1. Les bases de données

Pour limiter les contraintes de coût et de délai, il convient d'effectuer un tour d'horizon systématique des données disponibles en vue d'adapter la méthode d'élaboration des matrices ou, si besoin, la modélisation elle-même, ainsi que d'identifier les éventuelles lacunes à combler.

Ces données doivent être mobilisées en fonction de l'analyse de la problématique faite au préalable, qui a conduit dans le même temps à définir les limites des zonages et la finesse de la description des réseaux de transport. A un recueil de données correspond un niveau de précision des matrices qui doit être cohérent avec celui du zonage et des réseaux modélisés.

1.1 Données socio-économiques

Population et emplois constituent les principaux paramètres explicatifs de la demande. Ces données statistiques sont nécessaires soit pour créer des matrices de toutes pièces (voir § 3 et 4 consacrés à la génération-distribution), soit pour compléter et/ou éclater et/ou redresser des matrices issues d'enquêtes ou modèles existants.

Le niveau communal, généralement retenu par l'INSEE pour présenter ses résultats, ne convient généralement pas. En effet, les modèles urbains utilisent en général un découpage infra-communal, ce qui impose de recourir à des données plus « désagrégées » (îlot...) ³⁴.

Bien que moins utiles en milieu urbain en raison d'un niveau de précision insuffisant, les migrations alternantes collectées lors des recensements généraux de la population (RGP) constituent également des bases de données susceptibles d'être utilisées pour le calcul des flux Domicile – Travail (à cet égard, le RGP de 1999, qui précise entre autres les modes de transport et les flux domicile-études, est plus riche que les précédents). A l'avenir, il est cependant difficile de prévoir la forme des données qui seront fournies par l'INSEE, notamment sur les questions relatives aux migrations alternantes.

Enfin, les données d'emplois ne sont pas toujours faciles à établir. Quelques fichiers standards permettent toutefois de le faire (voir en annexe).

³⁴ L'usage des données « désagrégées » est soumis par ailleurs à des contraintes légales relevant de la loi informatique et liberté

1.2 Modèles existants

La technique de modélisation des déplacements a d'ores et déjà connu une diffusion importante à l'échelle nationale. Des modèles reposant sur les grands principes édictés dans les chapitres précédents existent déjà dans de nombreuses villes et agglomérations.

Dans bien des cas, les matrices de déplacements élaborées pour les modélisations « anciennes » constituent donc des bases de données privilégiées : les nouvelles matrices peuvent alors soit résulter de modifications des anciennes matrices (ajustements des marges, redressements ponctuels de certaines OD, adjonction de nouvelles zones...) ³⁵, soit utiliser les anciennes matrices comme référence, à titre de contrôle par exemple. Bien entendu, la vérification de ces matrices, même si elles ont été préalablement « calées », reste nécessaire. Elle peut être effectuée en référence aux autres données listées ci-après, notamment les enquêtes.

1.3 Les enquêtes

On distingue principalement (voir descriptions plus précises des conditions de réalisation en annexe) :

- les *enquêtes ménages déplacements*, appelées par commodité enquêtes ménages. Ce sont des bases fondamentales, quand elles existent, de la modélisation. Il convient toutefois de connaître certaines de leurs limites d'usage :
 - en France ³⁶, compte tenu du coût des enquêtes, les échantillons retenus sont faibles (entre 50 à 100 ménages par zone soit, par exemple, 6 000 ménages pour toute l'agglomération lyonnaise qui correspondent à environ 1,2% du nombre total de ménages ; en Île-de-France, en 1991, seuls 16 000 logements (y compris logements vacants, non-réponses...) correspondant à 10 000 ménages sur une population de 10,6 millions d'habitants ont été interrogés, soit approximativement 0,3% du total dont environ le quart n'a pas pu être exploité). En 1997, l'échantillon retenu était moitié moindre. Il est donc extrêmement délicat d'en extraire des données locales précises sur les flux, les motifs, les répartitions modales ³⁷ ...

La précision statistique des calculs faits à partir d'un échantillon dépendant de sa taille (et non de sa proportion dans l'ensemble considéré), les enquêtes ménages offrent des informations plus fiables sur les modes de transport les plus représentés, en l'occurrence les modes motorisés individuels et la marche. L'incertitude relative aux

³⁵ Certains logiciels offrent des modules particuliers destinés à la mise à jour, à partir notamment des comptages, des matrices existantes (voir chapitre 6 §3.3)

³⁶ A l'étranger, les échantillons peuvent être notablement plus importants : ainsi à Tokyo, ce sont environ 3% des ménages qui sont interrogés tous les cinq ans; à Montréal, lors de la dernière enquête de 1998, 5% des ménages ont été questionnés

³⁷ En l'espèce les difficultés peuvent être accentuées par certains modes de redressement retenus par l'INSEE. Ainsi, dans le cas de l'enquête ménages réalisée en 1997 dans l'agglomération d'Aix-Marseille, il a été décidé de redresser différemment les enquêtes menées auprès des ménages nouvellement installés sur une zone donnée. Les coefficients de redressement qui en sont résultés, quelquefois 10 fois supérieurs à ceux appliqués aux autres ménages, ont abouti ponctuellement à des résultats absurdes (parts modales notamment). Nous ne saurions trop insister ici sur l'intérêt de procédures de redressement simples et licites sous l'angle des déplacements

données sur les transports collectifs ou les deux-roues est ainsi très élevée.

	Valeur	Incertitude (*)	
		absolue	relative
Taille moyenne des ménages	2,50	±0,07	2,8%
Nombre de voitures par ménage	1,00	±0,04	4,0%
Mobilité tous modes	3,50	±0,07	2,0%
Mobilité en voiture	2,05	±0,09	4,4%
Mobilité en transports collectifs	0,25	±0,02	8,0%
Mobilité en deux-roues	0,20	±0,02	10,0%
Mobilité à pied	1,00	±0,04	4,0%
Part de la voiture	59%	±2,3%	3,9%
Part du transport collectif	7%	±1,2%	17,1%
Part des deux-roues	6%	±1,1%	18,3%
Part de la marche	29%	±2,1%	7,2%

(*) il s'agit ici des valeurs fixant les limites de l'intervalle de confiance à 95%. Compte tenu de la taille de l'échantillon, la probabilité que les valeurs réelles soient à l'intérieur des intervalles ainsi calculés est égale à 95% (par exemple, pour la mobilité tous modes, l'intervalle de confiance à 95% est $[3,50-0,07 ; 3,50+0,07]$ soit $[3,43 ; 3,57]$). Le calcul des incertitudes se fait généralement en référence à l'hypothèse d'une répartition selon une loi normale des probabilités. Dans ce tableau, sont inclus les effets de grappe dus à la méthode de tirage (ménage pris aléatoirement, mais toutes les personnes et tous les déplacements du ménage sont enquêtés).

Tableau 10 Exemple de précision sur les données issues d'enquêtes ménages pour une taille d'échantillon de 2000 ménages

- les enquêtes ménages ne répertorient que très partiellement les déplacements professionnels (travail \leftrightarrow travail), du fait qu'elles excluent de leur champ les déplacements faits à titre onéreux de biens ou de personnes (livreurs, taxis...) et ceux effectués par des personnes extérieures à la zone d'étude (par exemple, à Paris, les provinciaux et les étrangers en voyage court, ou ceux résidant en dehors de l'agglomération mais travaillant à l'intérieur)³⁸. De même, les déplacements faits entièrement dans des secteurs privés (grandes surfaces commerciales par exemple) ne sont pas comptabilisés ;
- le fait que les enquêtes se déroulent au domicile peut conduire à sous-estimer la représentation des ménages les plus actifs et les plus mobiles³⁹.

Ainsi, l'enquête ménages déplacements, bien qu'indispensable, ne suffit généralement pas.

A noter que la transposition des résultats d'enquêtes d'une agglomération sur une autre, enquêtes ménages en particulier, exige une certaine prudence, même s'il est établi que les évolutions sont globalement parallèles à l'échelle française. En effet, les

³⁸ Ainsi que les déplacements de véhicules prioritaires (marginal) ; en Île-de-France, les matrices issues de l'EGT (Enquête Générale Transports) ont dû être redressées d'environ 20% pour être calées

³⁹ Les modes de redressement fondés sur des données démographiques globales ne prennent pas en compte ce type de biais. Pour les éviter, il faut assurer un suivi sérieux et constant de l'enquête.

comportements, notamment modaux (plus ou moins grand recours aux modes doux par exemple), peuvent varier, dans des contextes comparables, en fonction des différences relatives aux politiques de déplacements ou à la « culture urbaine » des habitants.

		Nombre de ménages	Population totale	Taux de motorisation		Mobilité		Non mobiles
				par ménage	population	totale	motorisée	
1990-2001	Minimum	21 000	53 000	0,90	0,34	2,91	2,07	8,5 %
	Médiane	125 500	327 500	1,07	0,44	3,52	2,47	13,0 %
	Maximum	4 526 000	10 751 000	1,39	0,59	4,19	2,92	18,0 %
1976-1989	Minimum	43 000	106 000	0,70	0,25	2,27	1,50	10,0 %
	Médiane	113 000	329 000	0,94	0,36	3,26	1,92	15,0 %
	Maximum	3 976 000	9 939 000	1,28	0,48	4,14	2,59	24,0 %

Le tableau se lit : le minimum des mobilités totales sur l'ensemble des enquêtes ménages déplacements ayant eu lieu, entre 1990 et 2001, est de 2,91.

Tableau 11 Taux de motorisation et mobilité par personne selon les enquêtes ménages françaises depuis 1976.

(Source. Enquêtes ménages déplacements. Voir en annexe pour plus de détails)

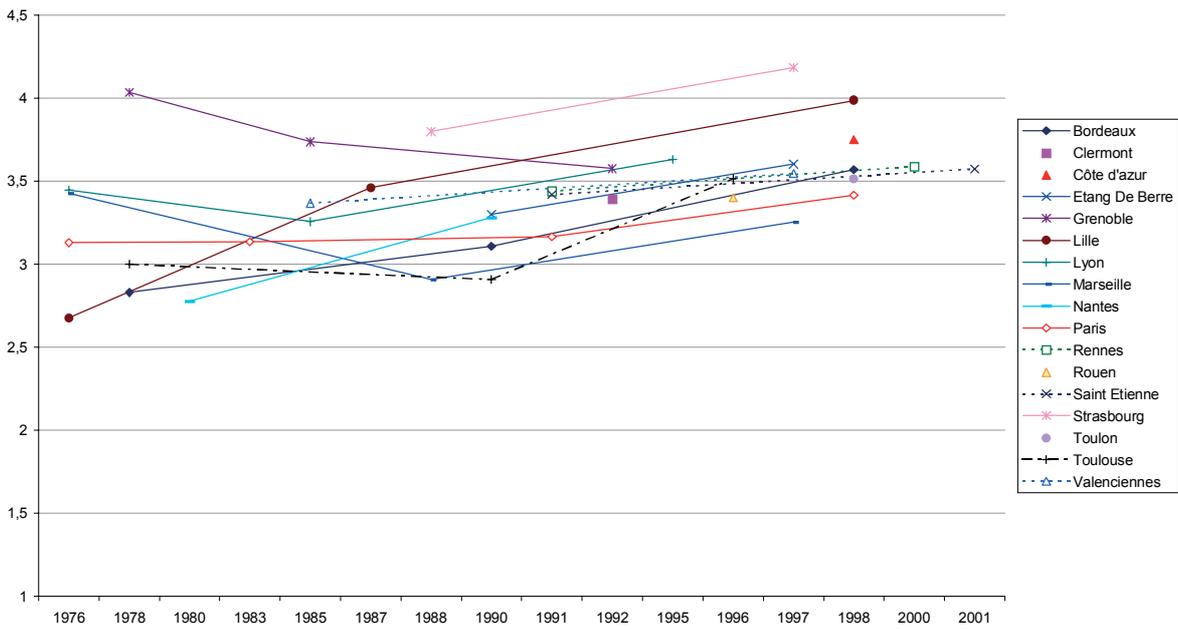


Figure 7. Évolution de la mobilité totale par personne dans les agglomérations de plus de 300 000 hab.
(Source : enquêtes ménages déplacements)

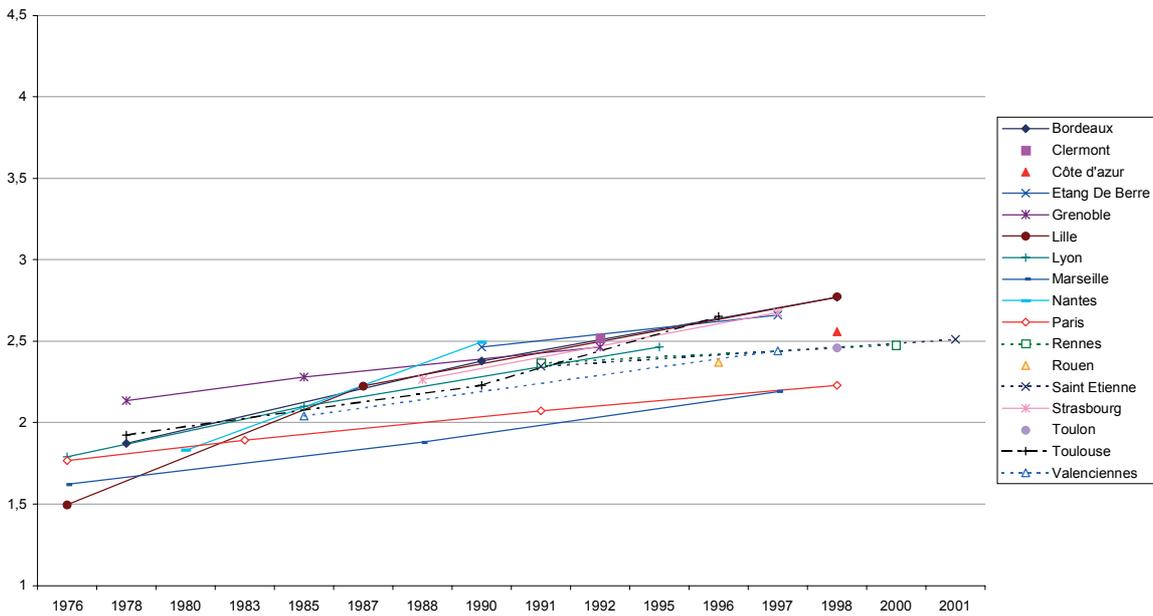


Figure 8. Évolution de la mobilité motorisée par personne dans les agglomérations de plus de 300 000 hab.
(Source : enquêtes ménages déplacements)

- **Les enquêtes embarquées** ou, tout au moins, in situ (arrêts, gares, pôles d'échange) permettent de connaître les déplacements en transports collectifs. Plus généralement, il faut également citer *les enquêtes réalisées par les exploitants* auprès de leur clientèle.
- **Les enquêtes routières** : à leur sujet, il faut souligner que, selon le mode opératoire, elles peuvent, beaucoup plus que les enquêtes embarquées, influencer sur les conditions d'écoulement des flux de véhicules et inciter un certain nombre d'usagers à modifier, à l'occasion du seul jour d'enquête, leur comportement habituel : la « photographie » devient floue, voire, dans certains cas extrêmes, ratée⁴⁰. Au minimum, il faut donc éviter une information préalable des usagers susceptible d'accentuer ce phénomène.
- **Les enquêtes par téléphone** qui permettent d'atteindre rapidement, à un coût raisonnable, un grand nombre de personnes. Leur qualité statistique dépend du taux d'équipement des ménages, mais également des listes rouges et orange (numéros qu'il est en principe interdit de générer automatiquement en France, *a fortiori* pour les collectivités publiques), et du nombre de foyers équipés uniquement de portable.
- **Des enquêtes particulières**, spécialement adaptées au problème posé, peuvent être organisées⁴¹ :
 - enquêtes réalisées auprès des utilisateurs de générateurs spécifiques (aéroports, gares, centres commerciaux, hôpitaux, zones logistiques...), qui, seules, permettent d'appréhender avec précision la répartition modale et la distribution géographique des déplacements liés à ces générateurs ;
 - *enquêtes par magnétophone* qui consistent à relever les numéros de plaques minéralogiques aux limites d'un périmètre, en général restreint (centre-ville). Elles permettent notamment d'identifier les trafics de transit et d'échanges, et, si des points d'enquête sont disposés judicieusement au sein du périmètre, les itinéraires utilisés pour traverser un espace donné (centre-ville, quartier...); elles permettent également d'évaluer les temps de parcours correspondants ;
 - *enquêtes par voie postale* auprès d'utilisateurs des réseaux de transport. Les taux de retour sont souvent faibles et la représentativité n'est pas toujours assurée ;
 - *petites enquêtes ponctuelles* spécifiques qui peuvent apporter des éclairages complémentaires sur les déplacements dans les zones étudiées, compte tenu de la problématique. Par exemple, il est possible de solliciter les personnels employés par les maîtres

⁴⁰ On peut considérer qu'on est ici confronté à une variante du principe d'incertitude d'Heisenberg auquel tous ceux qui effectuent, peu ou prou, des observations ou des mesures sont, tôt ou tard, confrontés

⁴¹ L'importance prise par les enquêtes de préférences déclarées nous impose de ne pas les confiner au rang d'enquêtes complémentaires ponctuelles mais de leur consacrer une partie spéciale du présent manuel (voir chapitre 5 §4)

d'ouvrages (Villes, autorités organisatrices, sociétés privées...) et de les interroger sur leurs habitudes, leurs temps de parcours...

Plus généralement, les questions nouvelles posées, en particulier dans le cadre de la définition de politiques de transport (modes doux, intermodalité...), doivent susciter des enquêtes nouvelles, dans leur forme et leur objet.

2. Partitions de la demande

La démarche de recueil des données utiles à l'établissement des matrices de demandes doit se fonder sur un travail d'analyse précis du type de demande répondant à la problématique. Ainsi, plus les questions posées sont précises, plus il apparaît nécessaire de « segmenter » la demande. C'est notamment le cas lorsque les résultats ont des conséquences financières importantes pour les maîtres d'ouvrages. Une partition de la demande globale de déplacements, en un certain nombre d'ensembles supposés homogènes selon la problématique considérée, dépendra des réponses aux quatre questions principales suivantes :

- Quels modes ?
- Quelles périodes ?
- Quels motifs ?
- Quelle sensibilité à l'offre de transport ?

2.1 Quels modes ?

Il s'agit ici, non pas seulement d'identifier les modes en cause, ce qui est généralement rapide, mais d'anticiper sur le mode de traitement des interfaces entre ces modes dans le cadre du problème posé :

- lorsque les résultats attendus concernent un seul mode, en fonction de l'influence exercée par d'autres (cas de la connaissance des flux routiers suite à une réduction de capacité de boulevards par exemple), il est a priori préférable d'éviter d'avoir recours à une modélisation multimodale, plus délicate et d'une mise en œuvre plus longue. Dans le cas mentionné, un simple ajustement du paramétrage des arcs concernés permet une modélisation correcte ;
- la modélisation multimodale apparaît incontournable lorsque les résultats attendus concernent plusieurs modes. Signalons que cela est vrai lorsque ces résultats sont implicitement indispensables au calcul (cas des évaluations socio-économiques par exemple qui imposent de tenir compte des avantages des usagers de tous les modes).

2.2 Quelle(s) période(s) ?

Dans une large mesure, le temps et le coût d'une modélisation sont proportionnels au nombre de périodes modélisées. L'utilité de modéliser ou non plusieurs périodes distinctes (pointe du matin, du soir, période moyenne, jour ouvré ou moyen...) doit être clairement établie, eu égard aux problèmes posés. A noter que les modèles sont le plus souvent établis pour des périodes d'une heure⁴². La méthodologie de passage des matrices journalières aux matrices horaires est évoquée au chap. 3 § 6 .

⁴² A priori il n'est pas impossible de modéliser les déplacements sur des durées différentes

2.2.1 Les critères de choix

Les résultats attendus peuvent être utiles :

- au dimensionnement d'ouvrages ou de systèmes de transport (optimisation de réseaux TC...),
 - à l'amélioration du fonctionnement de nœuds particuliers des réseaux,
 - à des calculs de clientèle et de recette et à des calculs financiers et économiques,
 - à des évaluations environnementales,
 - ...
- Dans le cas du *dimensionnement d'ouvrages ou de systèmes de transport*, le modélisateur doit choisir en général la période de pointe, en ayant au préalable des réponses aux questions supplémentaires suivantes sur l'usage de l'ouvrage :
- connaîtra-t-il des variations annuelles importantes de fréquentation (cas des secteurs à vocation touristique) ?
 - faut-il prévoir des variations hebdomadaires ? C'est le cas des variations jours ouverts/jours non ouverts mais aussi pour des ouvrages sollicités spécialement à l'occasion de circonstances particulières, voire exceptionnelles (desserte de zones d'exposition, de foires, de stades...),
 - à l'échelle d'une journée-type, les phénomènes de pointe, notamment du matin et du soir, seront-ils semblables, « symétriques » ?
 - quels seront, a priori, les éléments dimensionnant de l'ouvrage ou du système (cas de barrières de péage, de parkings de rabattement...)?
 - faut-il prévoir des variations temporelles de l'offre, imposées soit par l'exploitant (fréquences, valeurs des péages), soit par la congestion ?
 - les calculs produits serviront-ils également à dimensionner des équipements de sécurité, en référence à une réglementation particulière ?

Le choix des périodes précises modélisées dépend des réponses aux questions précédentes et du poids que leur accorde le maître d'ouvrage. Celui-ci peut en effet considérer que la fréquence d'une pointe exceptionnelle ne justifie pas, compte tenu des surcoûts de construction que cela induit, qu'on la prenne en compte dans la modélisation.

Dans le cas courant d'une modélisation à l'heure de pointe du soir, on peut choisir de modéliser l'heure la plus remarquable (heure de pointe du soir effective par exemple, souvent entre 17 heures 30 et 18 heures 30). Ce choix permet de prendre en compte effectivement une situation de pointe représentative des conditions courantes de circulation, avec un trafic homogène, notamment du point de vue des motifs de déplacement. Il se heurte en revanche à des difficultés importantes pour ce qui touche :

- aux bases de données disponibles (la représentativité des enquêtes sur une seule heure est réduite),
- à la modélisation des réseaux, si les phénomènes de saturation existants ou à prévoir sont importants,
- à l'extrapolation de la demande future, si les réserves de capacité des réseaux sont faibles et induisent inéluctablement un report de croissance sur les heures proches (« glissement » des heures de pointe qui semble accentué par l'aménagement et la réduction du temps de travail),
- à la disparité entre quartiers ou secteurs de l'agglomération pour lesquels les périodes d'hyperpointe peuvent être décalées.

Selon l'importance de ces difficultés, il peut alors être préférable de modéliser l'heure moyenne représentative de l'ensemble de la période (moyenne de 16h30 à 19h30 par exemple).

- Lorsque la modélisation s'intéresse aussi à l'amélioration du fonctionnement de nœuds particuliers des réseaux, il est généralement souhaitable de prendre en compte plusieurs situations contrastées à différentes périodes, de manière à opter pour le meilleur compromis, surtout s'il s'agit non seulement d'ajuster des systèmes de gestion mais aussi de modifier la géométrie d'équipements (carrefours...). Il est cependant rare qu'un modèle à grande échelle soit développé pour ce seul objet.
- Les calculs de clientèle et de recette, et les calculs financiers et économiques se font en référence à des résultats annuels. Le modélisateur doit donc extrapoler les résultats obtenus pour les périodes modélisées pour en déduire des résultats annuels.

Le choix d'une seule période peut suffire, selon le niveau de précision des résultats requis, en particulier si les réseaux de transport de l'agglomération considérée ont un fonctionnement « stable », peu sensible à des saturations importantes et durables. Dans le cas contraire, il peut être délicat, sinon contestable, d'extrapoler des flux quotidiens de déplacements à partir de résultats sur une seule période, souvent l'heure de pointe du soir du jour ouvré : il devient alors préférable de modéliser, en fonction d'une partition appropriée, l'ensemble d'une journée moyenne. On a alors recours fréquemment à trois périodes :

- pointe du matin, d'une durée comprise entre 1,5 heure et 2 heures (entre 7h et 9h),
 - pointe du soir, d'une durée comprise entre 2,5 heures et 3,5 heures (entre 16h30 et 20 h),
 - période « moyenne » (dite souvent « creuse » pour les transports collectifs) d'une durée comprise entre 7h30 et 9h selon que l'on considère ou non (cas des VL) que les heures précédant la pointe du matin ou suivant la pointe du soir sont assimilables à des heures moyennes.
- Les évaluations environnementales doivent satisfaire à des logiques spécifiques. Ainsi, en ce qui concerne le bruit, la loi établit les périodes de référence à prendre en compte pour le contrôle du respect des seuils, en l'occurrence, actuellement, les périodes diurne (6h – 22h) et nocturne (22h – 6h). Par ailleurs, les calculs se réfèrent à une décomposition du trafic en diverses catégories de véhicules, a minima VL/PL. Le modèle doit donc fournir les informations nécessaires au paramétrage des calculs de bruit, soit directement, soit par extrapolation des résultats obtenus à une période donnée.

Les calculs d'émission de polluants atmosphériques se font de préférence heure par heure ou par période homogène⁴³, même si, en pratique, ils se font souvent en référence à l'heure de pointe du soir (voire à la journée moyenne : cette méthode est cependant rarement utilisée en milieu urbain). Cependant, dans ces conditions, ils ne peuvent être utilisés que pour comparer des scénarios contrastés. Si le modélisateur

⁴³ Par exemple, Airparif et la DREIF ont lancé en 2001 une étude visant à modéliser toutes les heures de l'année (avec recalage en temps réel) de manière à décrire, heure par heure, l'évolution de la pollution

souhaite extrapoler les résultats des calculs d'émissions produits par son modèle à une journée moyenne ou à l'année, selon le niveau de détail souhaité, il ne pourra se limiter à la seule modélisation en à la pointe du soir (HPS). En effet, en raison des conditions particulières de circulation (congestion) à la pointe du soir qui influent fortement sur les performances des moteurs, le rapport entre les émissions de polluants des heures moyennes et celles de la pointe du soir est sensiblement différent (plus faible) du rapport des circulations automobiles correspondantes.

Par ailleurs, les calculs d'émissions ne permettent ni d'évaluer les expositions réelles des populations, ni de calculer les productions de polluants secondaires. Pour évaluer ces effets, le modèle de trafic doit être couplé à un modèle de « diffusion » des polluants. Or ceux-ci se réfèrent généralement à des périodes critiques liées à des conditions météorologiques précises. Le modélisateur doit s'assurer de la cohérence de son modèle avec le choix de ces périodes. Cela peut lui imposer de modéliser des périodes spécifiques (cas, par exemple, de l'étude des dépassements des seuils relatifs à l'ozone, qui se produisent le plus souvent en été alors que la circulation automobile est plus faible qu'en moyenne annuelle)⁴⁴.

2.2.2 Période modélisée et exploitation des bases de données.

Le choix de la période modélisée, dans la mesure où il est suffisamment explicite, doit faciliter et clarifier l'exploitation des bases de données diverses.

A titre d'exemple, on peut rapporter la question de la détermination de l'heure de référence d'un déplacement ou d'un ensemble de déplacements donnés. Ainsi, à quelle période correspond un déplacement repéré lors de l'enquête ménages déplacements comme débutant à 16h15 et s'achevant à 16h55 ?⁴⁵ Dans le cas d'un déplacement en véhicule personnel, il est généralement admis que l'heure en question est la moyenne, en l'occurrence 16h35, donc en période de pointe du soir (dans l'hypothèse où celle-ci couvre la période 16h30 – 19h30 par exemple). Si ce déplacement est fait en transport collectif, dans la mesure où il est conditionné par l'offre existant au moment du départ, et selon l'itinéraire suivi, il est possible de l'exclure de la période de pointe.

Rappelons que la désignation de l'année de référence est indispensable à la cohérence globale du modèle : matrices, réseaux, paramètres d'affectation, critères de calage retenus doivent correspondre à la même année de référence.

Plus généralement, la clarté des choix et leur indication dans les documents d'étude sont garants de la bonne interprétation du modèle, en particulier dans la perspective d'une utilisation prolongée.

2.3 Quels motifs ?

Les modes et les périodes retenus pour la modélisation étant identifiés, les autres « segmentations » de la demande correspondent aux paramètres influant sur le comportement des individus : on suppose ainsi que les usagers d'une catégorie donnée, selon le paramètre considéré, ont un comportement homogène, modélisable.

⁴⁴ Le couplage d'un modèle de déplacement et d'un modèle de diffusion de polluant a été réalisé à Saint-Étienne. Un ouvrage du Certu présente l'étude. Cf. note de bas de page 8

⁴⁵ Ce genre de question « pointue » se pose surtout dans les grandes agglomérations où des durées de déplacement assez longues sont possibles

Bien entendu, les différents paramètres se combinent jusqu'à aboutir à autant de comportements possibles qu'il y a d'individus. Avant d'aller au bout de cette logique qui conduit aux modèles désagrégés « complets », il faut identifier, en fonction de la problématique considérée, les critères principaux de caractérisation de la demande.

Le plus courant est le motif de déplacement : les enquêtes diverses permettent de les collecter selon un degré de finesse élevé qui conduit à un nombre de motifs possibles incompatible avec les exigences de la modélisation⁴⁶. Il est donc indispensable de procéder à un regroupement dans plusieurs grands ensembles :

- motifs obligés liés au domicile⁴⁷ : *domicile – travail et travail – domicile, souvent distingué du domicile-étude et étude-domicile*. En général, le recours à ces motifs est nécessaire lorsque la modélisation concerne en priorité un système de transport collectif ou un ouvrage urbain à péage, notamment s'il est prévu une offre tarifaire spécifique⁴⁸. Les déplacements en question sont en effet réguliers et les valeurs du temps des usagers sont plus faibles que la moyenne.
Il s'agit également des motifs les plus « faciles » à modéliser. Compte tenu de l'importance primordiale des scolaires et universitaires dans la clientèle des transports publics, il est très souhaitable de distinguer le motif « études » dès lors que la modélisation concerne en priorité un système de transport collectif ; le motif études peut lui-même être décomposé, dans la mesure des données disponibles, en scolaire (primaire, collège), lycée, université, chacun de ces motifs correspondant à des caractéristiques des déplacements spécifiques.
- motifs non obligés liés au domicile : *domicile – autres motifs et autres motifs – domicile, en distinguant souvent domicile – achat, achat – domicile et, plus rarement, domicile-loisir, loisir-domicile*. Ce sont les déplacements les plus nombreux, à l'échelle de la journée. En milieu très urbain, ils constituent la « cible » principale du transfert modal, notamment en dehors des périodes de pointe. Dans un tel contexte, il est donc utile d'en tenir compte lorsque le problème posé concerne la définition d'un projet de TCSP ou la réorganisation d'un système de transport dans une grande ville ;
- *déplacements professionnels*, ayant le « travail », au sens large, comme origine et comme destination. Peu concernés par l'offre de transport collectif, sinon dans les métropoles au réseau fortement maillé, les déplacements professionnels, qui impliquent des valeurs du temps des usagers élevées, sont fondamentaux dans les calculs d'évaluation de la clientèle d'ouvrages urbains à péage : dans ces cas, leur prise en compte spécifique est indispensable, soit en ayant recours à des matrices particulières, soit en utilisant des distributions statistiques des valeurs du temps très « étalées », si le logiciel d'affectation le permet ;
- *déplacements secondaires*, c'est-à-dire faits à titre personnel et n'ayant pas le domicile comme origine ou comme destination. Leur distinction ne s'impose généralement que comme une conséquence de la partition de la

⁴⁶ Ainsi, selon le guide spécialisé du CERTU, une enquête ménages déplacements répertorie 25 motifs possibles à l'origine et à la destination soit 625 motifs possibles pour les déplacements

⁴⁷ L'intitulé « obligé » doit être compris par rapport à la période dans laquelle se réalise le déplacement, plus que par rapport à sa nature

⁴⁸ C'est actuellement le cas dans la proche périphérie de Toulouse où un abonnement à l'intention des migrants alternants peut réduire le tarif moyen des passages de plus de 50%

demande selon les catégories susmentionnées. Il n'y a pas d'indication particulière justifiant une modélisation spécifique des déplacements secondaires. Dans le cas où le modèle fonctionne sur la base de boucles de déplacements (aller et retour au domicile), les déplacements secondaires sont intégrés aux boucles. Ils représentent dans tous les cas des flux qu'il faut affecter sur le réseau.

Motif principal	Type de boucle	Répartition		
		Lyon 85	Lyon 95	Grenoble 94
Travail	Simple	23 %	16 %	18 %
	Multiple	10 %	13 %	12 %
École	Simple	16 %	15 %	17 %
	Multiple	3 %	4 %	4 %
Accompagnement	Simple	7 %	8 %	7 %
	Multiple	2 %	4 %	4 %
Achat/Service	Simple	19 %	15 %	13 %
	Multiple	2 %	6 %	5 %
Loisir	Simple	15 %	14 %	16 %
	Multiple	0 %	2 %	2 %
Autres motifs	Tous types	2 %	3 %	2 %
Total		100 %	100 %	100 %

Tableau 12 Répartition des boucles simples et multiples par motif à Lyon et Grenoble (Source: Bonnel et al, 2001)⁴⁹

Dans le présent tableau, la notion de boucle simple correspond à un déplacement comportant un aller-retour, soit 2 déplacements, celle de boucle multiple à un déplacement comportant 3 déplacements au moins. Les motifs sont rangés par ordre de priorité croissant dans la détermination du motif principal de la boucle (une boucle domicile-accompagnement-travail-domicile aura pour motif principal le travail). On constate, à la lecture de ce tableau, que la proportion de boucles multiples croît à Lyon : ce phénomène est probablement généralisé.

Notons que les matrices Domicile – Travail et Travail – Domicile ne sont pas formellement symétriques du fait de ces boucles de déplacement à motifs divers (accompagnements, courses...). Cette dissymétrie, relative, est vraie pour tous les grands ensembles de motifs repris ici⁵⁰.

2.4 Quelle sensibilité à l'offre de transport ?

La segmentation finalement retenue pour les besoins de la modélisation doit enfin prendre en compte les différentes perceptions de l'offre.

⁴⁹ Etude PREDIT "Définition d'une typologie de la mobilité adaptée à la modélisation de la demande de transport dans les agglomérations françaises"

⁵⁰ Il est certain que le choix modal se fait en considérant les contraintes propres à tous les déplacements de la chaîne quotidienne des déplacements. Dans le cas simple d'une personne allant le matin sur son lieu de travail et en revenant le soir, ce sont bien les contraintes cumulées des deux déplacements qui fixent son choix modal

Celles-ci résultent :

- d'attributs objectifs spécifiques de l'offre (les péages, VL ou PL, abonnés/non-abonnés, prise en compte du covoiturage...),
- d'éléments plus subjectifs dans la perception de l'offre : image des modes, confort, sentiment d'insécurité, fiabilité du service...(cf. § 6 et 7),
- ou d'arbitrages variés entre les composants du coût généralisé (distribution des arbitrages prix-temps par exemple), comme c'est le cas, à l'extrême, pour les captifs d'un mode.

Les autres segmentations précédemment décrites répondent souvent implicitement à cette question (notamment par le choix des motifs).

2.5 Le cas des poids lourds

Les poids lourds constituent une part très minoritaire des déplacements en centre-ville, notamment aux périodes de pointe. Il peut cependant être nécessaire de prendre en compte une modélisation des flux de marchandises dans la modélisation des déplacements de personnes :

- si les trafics PL sont exceptionnellement élevés sur certains axes primaires, notamment lorsque la ville considérée a une position de « carrefour » routier,
- si la connaissance des trafics PL est nécessaire à l'étude (ouvrages à péage par exemple, ou évaluations environnementales).

Leur prise en compte peut se faire par des méthodes variées qui se heurtent toutes au fait que les poids lourds internes à une agglomération se déplacent selon des logiques de tournées à arrêts multiples, différentes de celles des personnes, dont la modélisation est aujourd'hui difficile⁵¹. Notons également que la qualité des informations recueillies sur les flux PL d'échange et en transit lors des enquêtes cordon est généralement médiocre eu égard aux difficultés pratiques de mise en place des postes convenant aux PL, à la faiblesse des échantillons recueillis et, quelquefois, aux réticences des chauffeurs.

Les méthodes possibles sont donc insatisfaisantes : elles sont proposées « par défaut ».

Ce sont, de la plus explicite à la plus implicite :

- la constitution de matrices PL :
 - le recours à des matrices PL spécifiques. Leur mise au point se heurte cependant, le plus souvent, à la faiblesse des données disponibles,
 - le recours à des matrices PL simplifiées, conçues comme de simples proportions des matrices VL. Les matrices ainsi constituées traduisent une structure des flux de PL erronée puisque, en réalité, ceux-ci se font sur des OD différentes et, probablement, sur des distances plus longues que celles des VL,

⁵¹ Des travaux sont toutefois en cours dans le cadre du programme national marchandises en ville. Un premier modèle (FRETURB) permet de mettre en œuvre l'étape de génération ; l'étape de distribution pose d'autres problèmes sur lesquels des travaux sont en cours.

Couronnes	Tournées
Hypercentre	2,5 km
Ville centre	3,5 km
Banlieue	6,0 km
Périurbain	8,5 km

Tableau 13 Distance moyenne entre deux arrêts selon les couronnes
(source : Mesurer l'impact du transport de marchandises en ville – MELT/LET/ADEME –
Octobre 2001 – Enquête Marseille)

- la prise en compte masquée des PL par l'intermédiaire de la notion d'unité de véhicule particulier (UVP). Cela consiste à redresser les données de base collectées (enquêtes) en référence à des comptages pondérés en fonction des proportions des différentes catégories de véhicules. On considère ainsi, couramment, qu'un PL équivaut à deux VL. Ce taux est sujet à contestation, et peut être adapté selon, notamment, le contexte de la voirie et la topographie. De surcroît, les matrices ainsi constituées présentent les défauts de celles résultant des deux méthodes précédentes et, du fait de l'indifférenciation des flux VL et PL, sont incompatibles avec des processus d'affectation multimodale,
- l'adaptation des réseaux par :
 - le pré-chargement de flux PL sur certains arcs ou ensembles d'arcs,
 - la modification des caractéristiques physiques de certains arcs : les capacités utilisées pour les affectations sont alors réduites en fonction des flux de trafics comptabilisés pendant la période de référence.

Ces méthodes sont cependant inadaptées en cas d'évolution importante du fonctionnement du réseau de voirie aux horizons du calcul, dans la mesure où elles ne permettent pas d'anticiper la nouvelle répartition des flux PL qui en résultera ou de prendre en compte des croissances importantes de ces flux PL. Enfin, elles ne sont applicables que sur un nombre limité d'axes routiers.

2.6 Autres segmentations

- D'autres segmentations de la demande sont possibles. On peut citer, par exemple, les critères socio-économiques liés à la motorisation des ménages, au sexe, à la taille et à la structure des ménages ou au revenu par personne. Ce dernier critère est pris en compte dans les modélisations utilisant une distribution statistique des valeurs du temps (voir *chapitres 5 et 6*).
- Enfin, il faut signaler, pour terminer, certaines segmentations de fait de la demande qui peuvent conditionner le fonctionnement du modèle :
 - à l'échelle urbaine, les efforts de modélisation portent avant tout sur les déplacements internes à l'agglomération ou à la ville considérée. La demande ne saurait toutefois être complète sans une modélisation convenable des trafics d'échange et de transit qui influent sur les charges des réseaux et, donc, sur la répartition modale. Ceux-là font généralement appel à des bases de données particulières pouvant être hétérogènes avec celles, généralement plus riches, qui caractérisent les déplacements internes.

Toutefois, le niveau de précision de la modélisation des déplacements d'échange et de transit doit être cohérent avec la problématique. Une partie spécifique des chapitres suivant, génération et distribution, leur est consacrée ;

- la délimitation du zonage conduit à exclure de l'affectation, pour les modes considérés, la partie des déplacements strictement interne aux zones. Cela peut avoir des effets sur le calage des flux et imposer de procéder à des « pré-affectations » de flux sur certains arcs. De même, les flux de véhicules en recherche de stationnement sont à l'origine de certaines « aberrations » comme celle qui consiste à obtenir du modèle, simultanément, un « cordon » de centre-ville convenablement calé et une circulation interne au cordon inférieure à celle observée⁵². Enfin, indépendamment du calage, les déplacements intrazonaux doivent également être évalués (volume, distance moyenne...) quand le modèle est relié, en aval, à un modèle d'émission-diffusion de polluants.

3. Génération (émission/attraction)

Lorsqu'on choisit de modéliser des matrices (voir *chapitre 1*), la modélisation est en générale séquentielle : génération puis distribution.

Avant tout développement sur la méthode, il convient de rappeler que le modélisateur doit prendre un soin particulier à consigner toutes les étapes de constitution des matrices de demande, de manière à pouvoir, à partir des mêmes bases de données, reconstituer les mêmes matrices. Les éventuels défauts des matrices pourront ainsi être identifiés et corrigés plus rapidement et les mises à jour du modèle en seront facilitées.

L'étape de génération consiste à déterminer, pour chaque zone, les volumes de déplacements qu'elle génère d'une part, qu'elle attire d'autre part. Le calcul se fait en référence aux caractéristiques socio-économiques des zones, c'est-à-dire non seulement de la population et des emplois, mais également de la mobilité des habitants, elle-même déduite des statistiques de macro-zones de l'aire d'étude regroupant des zones à caractéristiques comparables⁵³.

On peut distinguer trois méthodes classiques pour l'étape de génération

- la méthode normative se réfère à des formulations types établies en général sur des agglomérations de natures comparables et disposant de données.
- la méthode zonale par régression, se fondant sur un regroupement par zone, reconstitue des flux de déplacements connus (par enquêtes) en fonction des caractéristiques socio-économiques des zones ;
- la méthode catégorielle se fonde sur des regroupements par type de ménage plutôt que par zone.

Les avantages et inconvénients liés à l'utilisation de l'un ou de l'autre de ces types de méthodes sont récapitulés ci-après. Des précisions et compléments sont fournis dans le texte qui suit.

⁵² Dans certains quartiers du centre de Lyon, on a pu estimer cette circulation locale à environ 10% de la circulation totale

⁵³ Les critères permettant de considérer des zones comparables du point de vue de la mobilité de leurs habitants sont non seulement sociaux - niveau de vie, catégories socioprofessionnelles représentées, équipement des ménages en véhicules - mais également urbains : qualité de la desserte en T.C., densité urbaine, typologie de l'habitat...

Type de méthode	Principe comportemental	Avantages	Limites
Normative	Les usagers ont un comportement moyen unique	Mise en œuvre rapide Seule possibilité en l'absence de données locales	Mauvaise prise en compte des particularités locales Mauvaise valorisation des bases de données locales disponibles (enquêtes ménages notamment) utilisées uniquement en tant que contrôle
Zonale par régression	Les usagers résidant dans une même zone ont un comportement moyen unique	Bonne prise en compte des particularités locales Bonne valorisation des bases de données locales disponibles Cohérence globale du modèle	Méthode plus longue Stabilité incertaine en projection Échantillons de flux de référence quelquefois insuffisants Pertinence des régressions tributaire de la qualité des bases de données socio-économiques
Catégorielle	Les usagers d'une même catégorie ont un comportement moyen unique	Bonne prise en compte des particularités locales Bonne valorisation des bases de données locales disponibles Cohérence globale du modèle Analyse riche des facteurs déterminants de la mobilité Bonne stabilité en projection	Échantillons de flux de référence quelquefois insuffisants Pertinence des régressions tributaire de la qualité des bases de données socio-économiques Mise en œuvre peut être assez lourde Projection des catégories difficile à faire sur chaque zone

Tableau 14 Récapitulation des différentes méthodes de génération

On retiendra que le recours à une méthode normative est préférable si les données utiles à la modélisation (enquêtes notamment) sont « modestes » ou insuffisantes.

En théorie, les méthodes présentées peuvent aussi bien s'appliquer à des mobilités tous modes ou à des mobilités par mode. La distinction doit se faire en fonction des objectifs du modèle (voir *chapitre 1*). On fera dans la suite l'hypothèse que l'on travaille tous modes.

3.1 Principes généraux de calcul des émissions et attractions

Dans la pratique, le modélisateur réalise en même temps les calculs des émissions et des attractions des différentes zones internes à l'aire d'étude.

Les émissions sont mieux connues du fait que la part des déplacements liés au domicile est nettement prépondérante dans l'ensemble des déplacements (de l'ordre de 60% à 70% à l'échelle d'une agglomération). Or, les enquêtes de référence, enquêtes ménages notamment, se font au domicile des personnes interrogées : elles permettent de mieux connaître ce type de déplacements et d'établir des corrélations entre les caractéristiques des zones et les flux qu'elles génèrent.

Les attractions, calculées selon des principes comparables à ceux utilisés pour le calcul des émissions, sont redressées, soit de façon globale pour l'ensemble de l'aire d'étude, soit de façon différenciée en fonction de données propres aux zones ou ensembles de zones, de telle sorte que la somme des attractions soit égale à la somme des émissions :

$$\sum_i E_i = \sum_j A_j$$

où E_i est le flux émis par la zone i , A_j est le flux attiré par la zone j .

Parmi les modèles décrits dans les pages suivantes, il faut d'ores et déjà signaler que les modèles catégoriels, qui se réfèrent aux caractéristiques et mobilités des habitants, ne permettent pas de reconstituer simplement les déplacements non liés au domicile.

3.2 Précautions préalables à la mise en œuvre des méthodes

Avant de décrire de façon approfondie les différentes méthodes de calcul des générations, nous rappelons ci-après quelques points utiles à leur bonne mise en œuvre :

- lorsque le modélisateur a choisi une partition de la demande en plusieurs motifs différents, le modèle de génération intervient, le plus souvent, après la détermination et la mise en œuvre de cette partition. Il reste cependant possible de procéder à cette partition ultérieurement et de décomposer la matrice globale obtenue au terme du processus de génération/distribution. Plus rapide à mettre en œuvre, cette méthode a le défaut de ne pas prendre en compte la variation de structure de matrice entre motifs ;
- lorsque l'année de référence diffère de celle de la réalisation des enquêtes utilisées pour ce travail, notamment des enquêtes ménages, le modélisateur doit évaluer les évolutions probables entre les dates concernées, par exemple par extrapolation des évolutions constatées, pendant la même période, sur d'autres agglomérations ou en se référant à d'autres sources de données (comptages, autres enquêtes).

3.3 Typologie des déplacements et mise en œuvre pratique de la méthode

Les déplacements émis par une zone peuvent être décomposés en :

- déplacements générés par les résidents de la zone :
 - déplacements liés au domicile en origine ❶,
 - déplacements secondaires ou professionnels ❷,
- déplacements générés par les non-résidents de la zone mais habitant dans l'aire d'étude :
 - déplacements liés au domicile en destination ❸,
 - déplacements secondaires ou professionnels ❹,
- déplacements générés par les non-résidents de la zone et n'habitant pas dans l'aire d'étude (touristes, migrants...) :
 - déplacements secondaires ou professionnels ❺⁵⁴,

Selon cette décomposition, il apparaît que le recours à la méthode de calcul des émissions différera selon que l'on s'intéresse aux déplacements liés au domicile en origine (❶), majoritaires, pour lesquels les mobilités des habitants sont généralement bien connues, et les autres (❷ à ❺) qui dépendent principalement d'autres paramètres socio-économiques (emplois, selon leur type...) et qui nécessitent, autant que possible, d'autres sources de données (enquêtes sur les déplacements des touristes par exemple, ou des migrants résidant hors de l'aire d'étude).

En réalité, les calculs des émissions et attractions sont concomitants. Ainsi, pour un motif donné (par exemple Domicile-Travail), trois méthodes sont possibles :

- (i) pour une zone donnée, on calcule les émissions (liées au domicile en origine) d'une part, les attractions (liées aux emplois) d'autre part ; d'où on déduit, pour le motif symétrique (Travail-Domicile) les attractions (retour au domicile) et émissions (départ du travail) ;
- (ii) on calcule les sommes des déplacements « aller et retour » aux deux extrémités du déplacement, par exemple :
 - partant du domicile et y retournant pour le motif travail,
 - arrivant au travail et en repartant,
 puis on divise par deux ces deux quantités pour retrouver émissions et attractions ;
- (iii) on calcule distinctement les 4 types de déplacements.

La deuxième méthode présente l'avantage de travailler sur des effectifs doubles. On peut aussi penser que la première méthode est plus représentative de la pointe du

⁵⁴ En toute logique, il existe aussi des déplacements de ces non-résidents liés au domicile en destination : d'une part on ne connaît généralement pas les caractéristiques du domicile en question, d'autre part il est hasardeux d'établir un lien entre ces caractéristiques et les déplacements des non-résidents liés au domicile en destination (d'autant plus lorsque les distances sont importantes et/ou pour des motifs liés aux loisirs, notamment).

matin, la deuxième plus représentative d'une journée moyenne, et la troisième méthode plus précise mais plus longue.

Les deux premières méthodes reposent sur l'hypothèse de symétrie des matrices aller et retour, contredite par les observations du fait des boucles de déplacements. C'est la raison pour laquelle certains préfèrent tenir compte des boucles de déplacements.

3.4 Le modèle par régression

Le calcul par régression suppose de disposer de bases de données complètes de manière à établir des corrélations entre les paramètres socio-économiques d'une zone et les flux connus, « interceptés » lors des enquêtes.

Motif	Domicile (selon le motif à destination)	Scolaire	Travail	Achat	Loisir	Autre secondaire
Variables possibles (non exhaustif)	Population Population active Population active ayant un travail Population scolaire Revenu Taux de motorisation Taille des ménages Structure du ménage	Nombre de places (primaire, secondaire, 3 ^{ème} cycle)	Nombre d'emplois Nombre d'emplois tertiaire	Nombre d'emplois commerciaux Surfaces commerciales (éventuellement regroupées en catégories)	Emplois de loisir Surface des générateurs	Population emplois

Tableau 15 Principales variables possibles utilisables dans les modèles de génération, par motif

Le tableau ci-dessus répertorie des variables absolues (nombre de déplacement dans la zone) ou relatives (nombre de déplacement par personne ou ménage dans la zone).

On établit des régressions linéaires multiples :

$$E_i = \sum_p \alpha_p \cdot V_{pi}$$

où :

- E_i est le flux émis par la zone i (pour le motif considéré ou, plus généralement, selon la partition de la demande considérée),
- V_{pi} sont les valeurs des variables caractéristiques V_p propres à la zone i, parmi lesquelles il peut y avoir des variables dépendant de l'offre de transport,
- α_p est le coefficient propre à la variable V_p , calculé par régression linéaire.

La qualité de la régression est appréciée en fonction de critères statistiques courants (R^2 , tests de Student, test de Fischer, analyse des résidus...).

Le modèle par régression linéaire se calcule souvent sur un nombre de zones restreint compte tenu de la taille des échantillons des enquêtes. Le choix du zonage pour la régression se justifie en s'assurant d'une part qu'un nombre significatif de déplacements a été recueilli dans chaque zone, compte tenu de la partition de la demande retenue, d'autre part que les zones sont suffisamment homogènes.

Lorsque les variables explicatives sont disponibles sur un zonage fin, le modèle par régression permet de calculer les émissions et attractions sur le zonage souhaité, en appliquant les formules établies précédemment. Étant donné la linéarité des formules, les résultats sur les zonages fin et grossier seront cohérents. Il faut cependant noter que la précision se dégrade au fur et à mesure que le zonage s'affine.

Le choix « final » des variables de régression (celui de la (des) formulation(s) retenue(s)) doit être fait en tenant compte de quelques critères simples :

- les variables doivent être « logiques », c'est-à-dire cohérentes avec la nature des flux considérés. Par exemple, dans le cas de l'analyse des déplacements liés au domicile, la population ou la population active des zones constituent des variables fondamentales. Dans le même ordre d'idée, les coefficients résultant des régressions doivent également être logiques, notamment du point de vue de leur signe (+/-). La faiblesse des échantillons disponibles peut en effet conduire à des formulations de régression apparemment meilleures statistiquement (R^2 plus élevé) mais incohérentes du point de vue des coefficients appliqués aux variables et de leurs poids respectifs dans les formules. De telles formulations, artefacts mathématiques, doivent être écartées ;
- l'adjonction d'une variable induit toujours une amélioration apparente de la qualité de la régression (au sens du R^2). Il est alors possible de retenir d'autres critères statistiques, comme le R^2 ajusté, pour prendre en compte cet effet et juger de la pertinence de l'ajout d'une nouvelle variable. Il faut avant tout, s'assurer que le recours à une nouvelle variable est théoriquement justifié et, par comparaison des régressions obtenues avec ou sans cette variable, qu'il bonifie réellement les résultats. A cet égard, les « agrégats » statistiques sont utilement complétés par des représentations graphiques telles que les graphes des ensembles de points $[E_{im}, E_{ic}]$ où E_{im} est la génération connue de la zone i , utilisée pour le calcul de la régression, et E_{ic} est la génération reconstituée à partir de la formulation considérée ;
- les variables doivent être indépendantes, c'est-à-dire non corrélées entre elles, sous peine de rendre la régression instable. L'analyse des corrélations entre variables explicatives permet de ne retenir le cas échéant que l'une ou l'autre (par exemple pour une corrélation supérieure à 0,5 ou 0,3). Selon les motifs considérés, le seuil retenu pourra être plus ou moins élevé.
- le choix entre l'utilisation de variables absolues ou relatives renvoie à des considérations statistiques. En effet, les deux méthodes sont identiques dans le sens où elles représentent la variabilité entre zones ; la différence porte sur la distribution des termes d'erreurs. De ce point de vue, l'utilisation de variables relatives se justifie mieux (réduction de l'hétéroscédasticité). En revanche, il ne faudra pas s'étonner que les R^2 soient en général plus élevés dans les modèles avec variables absolues.

L'équation retenue intègre ou non une constante. Selon le cas, la forme de l'équation permettra ou non d'assurer que les flux de déplacements sont nuls lorsque les zones sont « vides ». Certains auteurs insistent particulièrement sur la nécessité de cette condition, en privilégiant l'interprétation à la qualité de la régression ; on peut toutefois considérer que le recours à une constante est motivé par la relative médiocrité des données de base et justifié par une certaine homogénéité des zones, en termes de taille et de volume de flux émis. En conséquence, il n'est pas exclu d'avoir recours à des formulations faisant intervenir des termes fixes non nuls (« raisonnables » toutefois), traduisant une sorte « d'effet de masse », s'il est établi qu'elles permettent une meilleure reconstitution des flux ;

Parmi les avantages de cette méthode, en sus de ceux signalés dans le tableau récapitulatif présenté plus haut, il faut signaler que, dans la mesure où le cadre de la méthode est laissé à l'instigation du modélisateur (identification des flux servant à la régression, choix des variables explicatives...), elle peut être employée pour tous les déplacements, qu'ils soient liés au domicile ou non.

En contrepartie, il faut signaler également les points suivants :

- la méthode ne permet pas d'anticiper avec certitude les évolutions futures de la demande : les régressions correspondent à une « photographie » de la situation d'une aire d'étude relative à la seule année de référence. Considérer que les formules ainsi constituées peuvent être utilisées à l'identique aux horizons d'affectation est incertain. Il peut toutefois être envisagé d'outrepasser cette règle lorsque les horizons des modèles sont proches de l'année de référence ;
- la régression linéaire peut être inadaptée pour certaines variables, notamment d'ordre qualitatif. On peut avoir alors recours à deux méthodes pour les incorporer dans le modèle :
 - la transformation des variables pour « linéariser » leurs effets, par exemple en utilisant le logarithme ou une puissance de la variable. Le choix de la transformation la plus adéquate est difficile même si l'on peut se fonder sur des indicateurs statistiques,
 - l'utilisation de variables muettes, généralement discrètes (par exemple 0 ou 1 selon qu'une zone est desservie par un TCSP ou non). Lorsque les données sont insuffisantes, cette technique peut d'ailleurs être une alternative⁵⁵ au modèle catégoriel présenté plus bas ; dans ce cas la variable représente une catégorie d'individu (ex : ménage motorisé ou non).

3.5 Le modèle normatif

Le modèle normatif fait également appel à une approche linéaire. Il se distingue du précédent par la manière d'établir les paramètres d'une part, et par la simplicité des variables retenues et des formulations utilisées d'autre part.

⁵⁵ Dans la pratique, la variable muette joue linéairement ; sans que la justification ou l'interprétation ne soient claires.

Ainsi, pour un motif donné (ou, plus généralement, selon la partition de la demande considérée) :

$$E_i = \alpha_t \cdot m_t \cdot V_i$$

où :

- E_i est le flux généré (émis) par la zone i ,
- V_i est la valeur de la variable retenue pour la zone i (population, emplois...),
- m_t est la mobilité des « populations » correspondant à la variable retenue, pour les zones de type t (cf. explication ci-après). Dans les cas des déplacements liés au domicile, la variable correspond à tout ou partie de la population résidente de la zone. Dans le cas de déplacements secondaires ou professionnels, ce sera plus vraisemblablement les emplois,
- α_t est un coefficient correctif éventuel propre aux zones de type t . En effet, selon la typologie retenue (par exemple en fonction de critères sociologiques), l'introduction de tels coefficients permet de tenir compte d'autres paramètres distinctifs des zones (par exemple en fonction de leur situation par rapport à l'hypercentre de l'agglomération considérée).

Cette formulation est d'une mise en œuvre relativement rapide dès lors que le modélisateur dispose des bases de données utiles à son calcul et dans la mesure où elles sont compatibles avec la partition de la demande retenue.

Les mobilités par motif, pour la période considérée (généralement le jour ouvré), en sont les variables fondamentales. Elles sont connues par l'intermédiaire des enquêtes ménages : soit celle de l'aire d'étude proprement dite, soit celles d'agglomérations comparables (encore qu'il s'agisse d'un critère difficile à vérifier), en cas d'absence ou de trop grande ancienneté de l'enquête ménages déplacements propre à l'aire d'étude. Dans ce dernier cas, les possibilités de partition de la demande sont limitées en fonction des bases de données résultant de l'analyse des enquêtes ménages d'autres agglomérations (issues généralement d'exploitations standards).

Les coefficients correcteurs de mobilité par type de zone peuvent être déduits d'une enquête ménages déplacements (propre à l'aire d'étude ou comparable).

Il convient de regrouper les zones en « types » homogènes ou réputés l'être, notamment du point de vue de la problématique considérée, et de limiter le nombre de types pour rester cohérent avec la simplicité de l'approche retenue (précision illusoire). Ainsi, en cas d'étude essentiellement « routière », les critères définissant l'homogénéité seront, par exemple, la situation par rapport aux centres urbains et aux zones d'activité (hypercentre, 1^{ère} couronne...), la nature de l'habitat, les caractéristiques socio-économiques des ménages... Dans l'étude d'un projet de transport collectif, on distinguera les zones avant tout en fonction de leur situation par rapport à l'offre TC (actuelle et future).

Déplacements par jour et par personne	Domicile - Travail	Domicile- Professionnel	Domicile- Études	Domicile- Achats	Domicile- Autres	Secondaires	Total
min (1990-2001)	0,42	0,02	0,35	0,28	0,57	0,46	2,91
médiane (1990-2001)	0,61	0,05	0,50	0,49	1,17	0,70	3,52
max (1990-2001)	0,73	0,12	1,28	1,23	1,48	1,06	4,19
min (1976-1989)	0,48	0,02	0,36	0,33	0,61	0,24	2,24
médiane (1976-1989)	0,69	0,06	0,49	0,53	1,00	0,56	3,36
max (1976-1989)	0,77	0,15	0,66	0,71	1,28	0,98	4,14

Tableau 16 Valeurs représentatives des mobilités par motif dans les agglomérations françaises

(Source : Enquêtes ménages déplacements . Voir en annexe pour plus de détails)

Le modèle normatif permet de se projeter simplement à partir d'hypothèses sur :

- les évolutions de la demande par motif,
- les évolutions de typologie des zones, selon les hypothèses de développement urbain.

Motif		
Domicile - Travail	Émission	$\mu_i * p * d * (1 - \lambda_i) * ACT_i$
	Attraction	$\mu_j * p * d * [(1 - \lambda_j) * EMP_j - \lambda_j * ACT_j]$
Domicile - Autre	Émission	$v_i * r * POP_i$
	Attraction	$v_j * r * [POP_j + \alpha * EMP3_j]$
Secondaire	Émission	$\kappa_i * [POP_i + \alpha * EMP3_i]$
	Attraction	$\kappa_j * [POP_j + \alpha * EMP3_j]$

Tableau 17 Exemples de formules de génération utilisées dans le logiciel OPERA

Avec μ, v et κ des coefficients correcteurs par zone ou type de zone
 p le taux de présence au travail
 d le nombre de déplacements domicile-travail par actif s'étant déplacé
 λ le % d'actif travaillant sur place
 r le nombre de déplacements domicile-autre par habitant et par jour
 α le poids d'attraction relatif des emplois tertiaires par rapport aux habitants.
 ACT, POP, EMP et $EMP3$ le nombre d'actifs, la population, le nombre d'emplois et le nombre d'emplois tertiaires par zone.

3.6 Le modèle catégoriel

Les deux modèles précédents sont fondés sur une approche zonale qui suppose que les comportements de la population d'une zone donnée sont globalement homogènes ou, tout au moins, qu'ils peuvent être globalement reconstitués à partir de caractéristiques générales de la zone, qui renvoient à des nombres d'individus (populations, emplois...). En réalité, chaque zone, du fait de sa situation géographique propre, de sa composition sociale et de sa desserte (ou accessibilité), peut avoir des caractéristiques particulières du point de vue des déplacements et des comportements modaux. Dans ces conditions la mise en évidence des types susmentionnés, utiles à la mise en œuvre du modèle normatif, peut être délicate, sinon contestable.

Il est possible de réduire partiellement l'hétérogénéité de la composition sociale en diminuant la taille des zones. Il en résulte des modèles plus « volumineux », soumis à des erreurs d'échantillonnage plus grandes.

On a alors développé la notion de modèle catégoriel, indépendant du zonage : ce type de modèle se fonde sur l'hypothèse selon laquelle l'unité de base de description des comportements est le ménage. Il est donc, par nature, spécialement adapté au calcul des déplacements liés au domicile.

Chaque ménage est caractérisé par des variables simples, dont la connaissance par les enquêtes, voire les recensements de la population, est assez aisée. On peut citer en particulier les caractéristiques suivantes, dont on sait qu'elles ont un impact sur la mobilité :

- la taille du ménage en nombre de personnes,
- le nombre d'actifs,
- la motorisation (véhicules motorisés à la disposition du ménage : cette valeur peut être différente de celle des véhicules propriété du ménage),
- le revenu.

Le croisement de ces différentes variables, « regroupées » le cas échéant (par exemple : 1 personne, 2 personnes, 3 et 4 personnes, 5 personnes et plus), conduit à un nombre potentiel de catégories élevé (dans l'hypothèse où il y aurait pour les quatre variables ci-dessus respectivement 4, 3, 3 et 5 classes, on aboutit à 180 catégories différentes). Le modélisateur doit disposer d'une base de données complète sur les mobilités par motif et, le cas échéant, par mode de chacune des catégories retenues en fonction de la problématique, pour en déduire les générations des différentes zones, à partir des nombres de personnes correspondant aux catégories représentées dans les zones.

Outre le fait que les hypothèses de base de la méthode (absence de corrélation entre la mobilité des ménages et leur « environnement », au sens large) sont sujettes à discussion, il est certain qu'elle présente des inconvénients :

- sa mise en œuvre est lourde et nécessite des bases de données importantes et détaillées,
- elle ne permet pas de reconstituer simplement les déplacements non liés au domicile,
- les mobilités TC sont rarement corrélées aux seules caractéristiques des ménages : sauf dans des aires d'étude uniformément maillées en TC (Paris

intra muros par exemple), le modèle catégoriel aboutira à des matrices tous modes ou à des matrices VP seulement.

En revanche, il est certain que ce type de modèle permet de projeter avec une certaine stabilité les évolutions de la demande, même s'il oblige à projeter zone par zone la composition des ménages selon les catégories retenues.

Motif principal	Catégorie retenue	Nombre moyen de boucles par individu		
		Lyon 95	Lyon 85	Grenoble 92
Travail	Actif	1,00	1,05	1,10
	Inactif et autre	0,02	0,02	0,03
	<i>Variance expliquée</i>	<i>56,1 %</i>	<i>57,2 %</i>	<i>56,9 %</i>
École	Écolier	1,13	1,20	1,26
	Collégien	1,30	1,27	1,12
	Lycéen	1,10	1,11	1,26
	Étudiant	0,82	0,84	0,85
	Autre	0,00	0,00	0,00
	<i>Variance expliquée</i>	<i>68,2 %</i>	<i>66,8 %</i>	<i>62,6 %</i>
Accompagnement	Actif avec au moins 1 écolier	0,12	0,08	0,07
	Inactif avec au moins un écolier	0,48	0,20	0,23
	Actif sans écolier	0,25	0,18	0,23
	Inactif sans écolier	1,44	0,68	1,10
	Retraité	0,12	0,08	0,15
	Scolaire	0,05	0,03	0,06
	Autre	0,26	0,26	0,15
	<i>Variance expliquée</i>	<i>14,6 %</i>	<i>8,3 %</i>	<i>12,4 %</i>
Achats/Services	Actif temps plein	0,20	0,20	0,18
	Actif temps partiel	0,41	0,32	0,35
	Inactif	0,58	0,60	0,48
	Retraité	0,74	0,63	0,60
	Étudiant	0,19	0,16	0,19
	Autre scolaire	0,10	0,09	0,12
	Autre	0,55	0,35	0,43
<i>Variance expliquée</i>	<i>15,3 %</i>	<i>13,6 %</i>	<i>10,1 %</i>	
Loisirs	Actifs	0,16	0,14	0,18
	Inactifs	0,35	0,29	0,36
	Retraités	0,40	0,37	0,42
	Scolaires	0,26	0,21	0,33
	Autres	0,31	0,31	0,28
	<i>Variance expliquée</i>	<i>3,1 %</i>	<i>3,0 %</i>	<i>3,0 %</i>

Tableau 18 Exemples de données de mobilité (boucles/individu), par catégories d'individu et par motif (Source : Bonnel et al, 2001)⁵⁶

Le tableau représente un test de stabilité d'une typologie construite pour l'étape de génération. Chaque boucle est caractérisée par un motif principal, selon un classement par ordre décroissant.

Des travaux équivalents ont été menés sur l'étape de choix modal et sur l'étape de distribution - ce dernier avec moins de succès d'après les auteurs

⁵⁶ Etude PREDIT "Définition d'une typologie de la mobilité adaptée à la modélisation de la demande de transport dans les agglomérations françaises"

Notons que les difficultés liées au nombre élevé de catégories possibles peuvent être réduites en utilisant un modèle fondé sur des catégories de personnes, non sur des catégories de ménages. La difficulté initiale réside dans la recherche de catégories homogènes, après identification des variables significatives, au regard de la problématique.

Une autre solution consiste en l'utilisation de techniques d'analyse de données⁵⁷ qui permettent de déduire, en dépit de la faiblesse des échantillons, les mobilités pour des ensembles constitués à partir du croisement de plusieurs variables (par exemple taille du ménage/nombre de véhicules à disposition) en fonction des mobilités correspondant à chacune des variables prises isolément.

3.7 Les autres modèles

- Il est possible de procéder à une combinaison de modèle catégoriel et de modèle par régression linéaire. On définit alors des catégories de ménages dont les déplacements font l'objet de régressions linéaires en fonction d'autres variables non utilisées dans la segmentation.

- Les modèles tenant compte de l'accessibilité

Les modèles de calcul des générations décrits ci-dessus, intervenant dans la séquence de modélisation en quatre étapes, ne permettent pas, du fait de leurs principes, de prendre en compte l'influence des évolutions du contexte, notamment des réseaux de transport, sur la génération des différentes zones (phénomène d'induction évoqué au *chapitre 4*). En cela, ils se distinguent des modèles de distribution qui incluent ou tout au moins permettent la mise en œuvre de processus itératifs entre distribution et affectation des déplacements.

Pour y remédier, il a été envisagé d'adjoindre aux modèles catégoriels une variable décrivant l'accessibilité des zones, généralement sous la forme :

$$A_i = \sum_j E_j \cdot \exp(-\beta C_{ij})$$

où :

- A_i est l'accessibilité calculée de la zone i ,
- E_j est une évaluation de l'attraction de la zone j ,
- C_{ij} est l'impédance du déplacement entre i et j (le plus souvent le coût généralisé de transport),
- β est un paramètre calculé selon les principes décrits dans le cadre de la distribution des déplacements.

Les tentatives d'utilisation de cette méthode n'ont pas été concluantes⁵⁸.

- Les modèles désagrégés

Il est également possible de mettre en œuvre des modèles désagrégés pour l'établissement des émissions ou attractions. Un exemple est donné dans l'ouvrage du

⁵⁷ Méthode classification évoquée dans "Modelling transport" [Ortúzar et al, 2001]

⁵⁸ selon également "Modelling transport"

Certu [Certu, 1998]. On modélise alors la probabilité d'effectuer 0 ou 1 et + déplacement du motif m , puis la probabilité hiérarchique de faire 1 ou 2 et + déplacements, etc. La formulation est alors de type modèle « logit emboîté » (voir *chapitre 5*).

Les modèles désagrégés sont plus classiquement utilisés pour les modèles de choix de mode que nous abordons au *chapitre 5*.

➤ Les modèles d'activités

Du domaine de la recherche à ce jour, les modèles d'activités tentent de modéliser le choix du motif et la mobilité en se basant sur les besoins d'activités des individus. Ainsi, le modèle représente l'arbitrage entre aller au supermarché et faire ses courses sur internet. Il n'y a pas d'application pratique à notre connaissance en France.

➤ Le modèle MATISSE

Modèle développé par l'INRETS au départ pour les déplacements interurbains. Son application à l'urbain est en cours de développement. Le modèle se base sur une matrice hypothétique dans un monde sans contrainte de transport et lui applique un processus complexe permettant de prendre en compte ses contraintes.⁵⁹

3.8 Les générateurs particuliers

Lorsqu'une zone possède des caractéristiques très spécifiques (grand centre commercial périphérique par exemple), selon l'objet de l'étude, il peut apparaître nécessaire de l'étudier à part, à partir de données appropriées (comptages en sortie de parkings pendant la période considérée...). Pour des générateurs qui n'existent pas encore, on peut s'inspirer de ratios (par rapport à la surface commerciale) comme ceux repris dans le tableau suivant⁶⁰.

	Surface commerciale (en m ²)	Emplois (par m ²)	Visiteurs (ratios en voiture par m ²)					
			Jour ouvré	Samedi	HPM entrée	HPM sortie	HPS entrée	HPS sortie
Centre commercial Beaulieu (Nantes)	24 140	0,025	0,52	0,61	0,026	0,019	0,039	0,050
Hypermarché (Carrefour Aix)	11 375	0,043	1,38	1,54	0,042	0,019	0,14	0,12
Bricolage (Castorama Nantes)	11 355	0,011	0,21	0,28	0,005	0,002	0,022	0,024

Tableau 19 Exemples de données de comptage autour de générateurs de trafic.

Ces ratios masquent des disparités importantes entre les différents sites. Ils ne sauraient être utilisés tels quels pour procéder à une modélisation de la demande. Nous préconisons, en référence aux autres travaux effectués sur ce thème par le CERTU, de procéder par analogie avec d'autres générateurs similaires, notamment du point de vue de la situation urbaine et du contexte de la concurrence.

⁵⁹ Source : Olivier MORELLET, Philippe MARCHAL, *Demande de transport de personnes : une théorie unifiée de l'urbain à l'interurbain*, in RTS, n°71, avril/juin 2001, article en 2 parties.

⁶⁰ Issu du document du CERTU/CETE de l'Ouest "Zones et établissements générateurs de trafic – Avril 1999. Le tome 2 est à paraître

Les émissions/réceptions des générateurs particuliers sont pris en compte soit par substitution dans les matrices obtenues par les méthodes décrites aux points précédents, soit par addition à celles-ci. Le choix dépend essentiellement des bases de données utilisées et de leur traitement, qui font que ces matrices tiennent compte implicitement, ou non, des déplacements liés à la présence des générateurs particuliers.

3.9 Les déplacements internes des non-résidents

Le calcul des déplacements internes réalisés par les personnes n'habitant pas dans l'agglomération ne peut pas être fait directement, sauf à disposer, dans des secteurs bien identifiés, d'enquêtes ciblées (sur le comportement des touristes par exemple ou des migrants résidant hors de l'aire d'étude). Dans ce cas, la méthode la plus courante consiste à ne pas les prendre en compte dans les étapes de modélisation de la demande et à redresser les matrices obtenues en fonction de comptages ou d'enquêtes faits sur des cordons ou des lignes écrans. On se trouve alors dans le processus de calage qui fait l'objet du *chapitre 6*. Le cas des déplacements professionnels, très partiellement captés dans les enquêtes ménages, doit généralement être étudié à part, de façon plus ou moins approfondie selon le problème posé (cf. § 2.3). S'il est nécessaire de disposer de matrices de déplacements professionnels fiables, une méthode consiste à calculer des « poids » représentatifs des émissivités des zones en fonction, par exemple, des flux interceptés lors d'enquêtes cordon : le recours à une méthode combinée décrite en § 5 est alors une bonne solution pour utiliser ces poids en vue du calcul des flux de déplacements professionnels.

3.10 Le calcul de la demande externe

Les enquêtes ménages fournissent des informations très lacunaires sur les déplacements d'échange et de transit à l'échelle d'une agglomération. En effet, par définition, elles ne concernent que ses habitants : or la plus grande partie des déplacements d'échange et la quasi-totalité de ceux de transit sont le fait de personnes habitant hors de la zone. Ainsi, les migrations alternantes collectées par l'INSEE montrent que les flux entrants vers le travail sont toujours supérieurs ou nettement supérieurs aux flux sortants vers le travail. Il s'agit d'une conséquence de l'extension des aires d'influence des agglomérations bien au-delà de leurs limites « physiques » apparentes. De surcroît la part des motifs professionnels dans ces déplacements est plus importante que dans les déplacements internes à l'agglomération : les limites des enquêtes ménages pour ce type de déplacements ont été déjà signalées.

Les volumes de déplacements sont connus par l'intermédiaire des comptages faits en limite d'agglomération : les difficultés de modélisation ne concernent pas tant les émissions/attractions que la distribution sur laquelle nous revenons dans le chapitre traitant de ce point. Signalons toutefois les questions suivantes dont les conséquences sur le calcul peuvent être plus ou moins importantes, selon la problématique considérée :

- les comptages ne suffisent pas à connaître la part du transit dans les flux comptés aux limites d'agglomération,
- si les comptages sont suffisamment précis, il est possible d'en déduire les éléments utiles à une partition de la demande selon les modes et les périodes. Ils ne permettent pas en revanche de partitionner selon la nature des déplacements et leurs motifs.

Pour répondre à ces questions, il est indispensable de disposer d'enquêtes cordon pour les différents modes : plus lourdes et d'organisation plus incertaine du fait du contexte et des difficultés de collecte des données, elles fournissent des résultats statistiquement plus fiables que ceux des autres enquêtes :

- elles permettent généralement de connaître la part du transit par mode. Attention toutefois, dans le cas des TC, à ne pas confondre l'origine/destination d'un déplacement avec les points de montée/descente : les premiers peuvent être hors de l'aire d'étude et, du fait de rabattements sur des gares ou points d'échange, les seconds peuvent être dans son périmètre ;
- lorsque les enquêtes en question permettent l'interrogation des usagers, il en ressort des éléments sur la nature et le motif des déplacements. Cependant, compte tenu des conditions de réalisation, ces renseignements sont fortement agrégés et la simplicité des questionnaires ne permet pas d'engendrer des partitions très fines de la demande, à l'image de ce qui résulte d'enquêtes ménages. On peut alors :
 - soit extrapoler les résultats des calculs faits pour la demande interne (sur les catégories socioprofessionnelles des usagers par exemple),
 - soit, en ce qui concerne les trafics d'échange, utiliser les statistiques collectées dans le cadre des enquêtes ménages et/ou procéder par analogie avec les résultats connus d'autres agglomérations.

Notons que, le plus souvent, les enquêtes, notamment routières, sont réalisées dans un seul sens de parcours⁶¹, généralement en sortie d'agglomération. Il faut donc reconstituer les flux dans l'autre sens (à l'exception du trafic de transit qui est intercepté en totalité lors des enquêtes). On admet alors que les matrices journalières du sens non enquêté sont, pour chaque mode et chaque motif considérés, les symétriques des matrices du sens enquêté. L'extrapolation à la période modélisée, l'heure de pointe du soir par exemple, se fait en référence aux répartitions horaires du mode et du motif issues de l'enquête ménages déplacements.

Le recours aux enquêtes par magnétophone, évoquées au § 1 et décrites en annexe, permet de préciser, le cas échéant, les matrices. Elles ne peuvent cependant se substituer aux enquêtes cordon routières « traditionnelles », en raison à la fois de la nature des informations collectées, qui excluent notamment les motifs de déplacement, les OD précises, les taux d'occupation des véhicules. Par ailleurs, elles sont clairement inadaptées aux grandes agglomérations en raison des contraintes de mise en œuvre et d'exploitation.

Enfin, en cas d'absence d'enquêtes spécifiques à l'aire d'étude, il reste possible, à partir des modèles obtenus par analyse des données disponibles sur un échantillon d'agglomérations de référence, d'évaluer, avec une marge d'erreur relativement élevée, la part du trafic de transit.

3.11 Cohérence d'ensemble

A ce stade du calcul des matrices, le modélisateur doit procéder à un contrôle de cohérence de la démarche. En effet, le calcul de génération doit être globalement cohérent :

⁶¹ Signalons toutefois que les enquêtes cordon pratiquées par les CETE Nord-Picardie et Aquitaine sont faites dans les deux sens.

- à l'échelle de la période considérée : la somme des flux émis par toutes les zones doit être strictement égale à celle des flux attirés (rappel),
- à l'échelle de toute la période modélisée, pour chaque zone, si nécessaire. En effet, dans l'hypothèse où le modèle mis en œuvre couvre toute la « journée » (décomposition en heures de pointe et heures moyennes), heures creuses exceptées (la nuit), il faut s'assurer que le nombre total de déplacements entrant dans chaque zone est égal à celui des déplacements en sortant. Dans ce cas, une tolérance est admise qui tient compte du fait que la symétrie parfaite des déplacements n'est pas nécessairement vraie sur une partie, même importante, de la journée (7h - 19h par exemple),
- sur une période donnée et sur l'ensemble du secteur modélisé, on doit retrouver la mobilité globale de l'agglomération, telle qu'elle ressort des enquêtes ménages.

4. Distribution

La « distribution » consiste, après le calcul des flux émis et attirés par chaque zone, à les répartir en fonction des différentes origines-destinations possibles en vue de constituer des matrices.

L'hypothèse de base du calcul est que cette distribution des générations-attractions des différentes zones est fonction des impédances⁶² des déplacements. En effet, le système à $n \times n$ inconnues et $2n+1$ équations⁶³ qui résulte de la détermination des émissions et attractions de chaque zone a une infinité de solutions positives dont, a priori, quelques-unes seulement sont vraisemblables du point de vue des transports.

4.1 Modèles gravitaires

4.1.1 Principes

On utilise alors généralement des sous-modèles dits gravitaires⁶⁴ :

- leur calibrage peut se faire en utilisant les flux connus et validés soit parce qu'ils ont fait l'objet d'enquêtes particulières soit parce qu'ils sont convenablement représentés dans l'enquête ménages déplacements. Il s'agit alors de rechercher les paramètres des formules qui permettent de reconstituer au mieux les flux effectivement observés ;
- des formules types existent également dont certaines sont mises en œuvre dans des outils « pré-calibrés » de calcul de matrices. Il convient que le modélisateur connaisse leurs algorithmes et leurs paramètres avant de les utiliser, le cas échéant.

⁶² Cf. définition en début de chapitre 6

⁶³ $n \times n$ = nombre de cases de la matrice ; $2n$ = nombre d'équations concernant la somme des flux de chaque ligne (générations) et de chaque colonne (attractions), auxquelles il faut ajouter l'équation d'égalité de la somme des générations et de celle des attractions (+1)

⁶⁴ Ces modèles sont dits gravitaires en ce sens qu'ils s'appuient sur le principe selon lequel les flux échangés entre deux zones données augmentent avec leur « poids » et diminuent avec l'impédance du déplacement nécessaire pour les relier. Si ce principe n'est guère contestable lorsqu'on considère les déplacements tous modes et tous motifs, il peut être remis en cause pour un mode donné, selon les conditions de la concurrence modale

La formulation habituelle des modèles gravitaires est :

$$T_{ij} = K.E_i.A_j.f(C_{ij})$$

où :

- T_{ij} est le flux des déplacements entre les zones i et j
- E_i est le flux total émis par la zone i
- A_j est le flux total attiré par la zone j
- $f(C_{ij})$ est la fonction d'impédance
- K est un coefficient réel, tenant compte le cas échéant de facteurs de correction propres à chaque zone

avec :

$$f(C_{ij}) = C_{ij}^{\alpha} \cdot \exp(\beta.C_{ij})$$

où :

- C_{ij} est le coût généralisé du déplacement entre les zones i et j (éventuellement uniquement la distance du déplacement),
- α et β sont des coefficients réels. α ou β peut être nul. Il faut noter que β est homogène à l'inverse d'un coût. Une des différences fondamentales entre les différentes formulations est leur forme au voisinage de zéro (déplacements courts). En particulier, selon que le modèle de distribution prendra en compte ou non les déplacements en modes lents (donc de coût généralisé faible), on pourra retenir telle ou telle formule. Le modélisateur peut également avoir recours à des indicateurs statistiques issus du calage.

A noter que la fonction de coût généralisé devrait être homogène avec celle utilisée par le modèle de partage modal. Dans le cas des TC, elle intègre nécessairement le paramètre fondamental de la fréquence de desserte.

Le calcul des paramètres α et β se fait souvent de façon « manuelle » et « itérative », de telle sorte que la distribution des distances calculée soit conforme à la distribution observée. Il convient toutefois de remarquer que, dès lors que les matrices sont soumises à une double contrainte (cf. § 4.1.2 ci-après sur les procédures de balancement), cette recherche peut devenir laborieuse et incertaine. Les fonctions « solveur » des tableurs peuvent également être utilisées, mais *Modelling Transport* [Ortúzar et al, 2001] met en garde le modélisateur contre cette technique qui peut s'avérer inexacte du fait des fortes non-linéarités du modèle de distribution.

Il est alors possible d'avoir recours à des algorithmes tel que celui mis au point par Hyman (pour $\alpha=0$). Celui-ci est fondé sur la « conservation » de la valeur moyenne du coût généralisé. Lors de la première itération, la valeur choisie pour β est égale à l'inverse du coût généralisé moyen de la distribution observée. Le processus est poursuivi jusqu'à ce que le coût moyen calculé soit suffisamment proche du coût moyen observé⁶⁵. En pratique, le calage se fait donc en fonction de ce que propose le logiciel.

⁶⁵ Voir *Modelling Transport* [Ortúzar et al, 2001] pour plus de détail

Par ailleurs, le modélisateur peut choisir une fonction d'impédance discrète (le nombre de points constituant la fonction étant normalement compris entre 10 et 15). L'augmentation du nombre de paramètres permet d'avoir un meilleur calage avec les courbes observées. Des techniques particulières de calage sont alors nécessaires et peuvent être disponibles dans les logiciels de déplacements (approche tri-proportionnelle⁶⁶).

A titre d'exemple, nous rapportons ici les valeurs issues d'un calage de courbes d'impédance sur l'agglomération de Dijon pour trois motifs : Domicile-Travail, Domicile-Étude, Domicile-Autres/Secondaires. Les formulations obtenues pour un coût généralisé égal au minimum des coûts généralisés sur les trois modes (VP, TC, Modes doux) sont les suivantes :

Motif	α	β
D-T	-0,66	-0,072
D-E	-0,88	-0,19
D-A/S	-2	-0,11

Tableau 20 Exemple de calage de fonctions d'impédance par motif pour la distribution (Source : CETE de Lyon)

4.1.2 Procédures de balancement

A l'issue du modèle de distribution les relations suivantes doivent être respectées :

$$\sum_j T_{ij} = Ei \text{ et } \sum_i T_{ij} = Aj$$

ce qui, a priori, n'est pas le cas. On procède alors à une procédure de balancement pour assurer la « contrainte aux marges ». La contrainte peut-être simple ou double, selon que l'on reconstitue les émissions et/ou les attractions. En général, on considère que les émissions sont plus fiables que les attractions (sauf pour les motifs obligés où l'on conserve les deux), on contraint alors sur les émissions seulement. Les procédures de balancement font appel à deux algorithmes Fratar ou Furness (voir modèle à facteur de croissance, *chapitre 4*).

4.1.3 Remarques diverses

Quelques remarques importantes résultent de ces formulations :

- Les coefficients figurant dans les formules doivent être pertinents et « logiques » : par exemple, $\beta \leq 0$.
- Le choix du zonage pour la distribution des flux est conditionné par la représentativité des flux utilisés pour calibrer les formules gravitaires. De ce fait, le modélisateur est généralement contraint d'opter pour un macro-zonage (par exemple similaire à celui de la génération). On ne peut pas simplement, comme pour le modèle de génération, caler le modèle sur un macro-zonage et l'appliquer sur un zonage fin. En effet, la non-linéarité des équations ne

⁶⁶ La méthode consiste en fait à caler le modèle sur les marges et sur une 3^{ème} contrainte. Cette dernière permet de s'assurer que le nombre de déplacements observé par classe de coût généralisé est respecté.

permet pas en général d'obtenir des matrices cohérentes, la matrice sur le macro-zonage n'étant plus une agrégation de la matrice sur le zonage fin. Il semble que le modélisateur puisse, néanmoins, utiliser cette méthode pour obtenir une matrice au niveau fin, en vérifiant que les matrices ne sont pas trop éloignées des observations. Une autre méthode consiste à mettre en œuvre un second niveau de distribution à l'intérieur des macro-zones, fondé soit sur des formules normatives, soit, si la taille des macro-zones le permet, sur des formulations linéaires simples (prorata des populations ou des emplois, selon le motif). Il est également possible de caler le modèle directement sur un zonage fin en utilisant des techniques prenant en compte les matrices « creuses » (voir plus bas). Quelle que soit la formulation retenue, la procédure de balancement permet de respecter les contraintes aux marges.

- Le processus de distribution suppose de disposer de matrices d'impédances complètes. Or, précisément, à ce stade d'élaboration du modèle, le modélisateur ne dispose pas de calculs d'impédances fiables c'est-à-dire tenant compte des temps de parcours effectifs, intégrant les conséquences de la charge des réseaux. Il s'agit là d'un paradoxe qu'il n'est possible de contourner qu'en procédant de façon itérative, comme indiqué dans l'organigramme suivant.

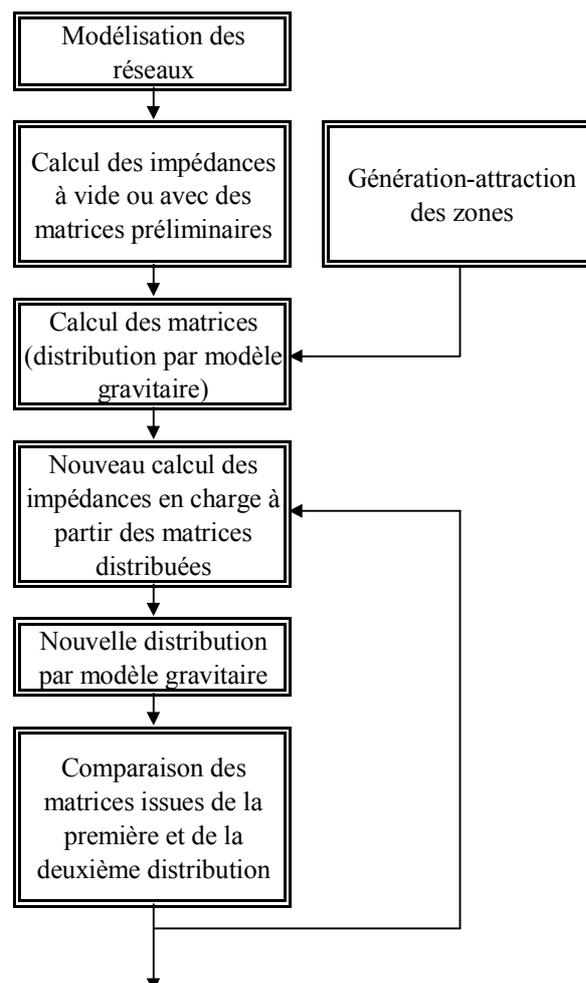


Figure 9. Rétroaction entre la distribution et l'affectation.

Malheureusement, ce processus itératif peut être d'une mise en œuvre laborieuse, difficilement compatible avec les contraintes financières et de délai du modélisateur. De surcroît, il reste approximatif dans la mesure où les matrices utilisées pour le calcul des impédances ne sont pas validées par le calage (mais, étant donné la difficulté et la complexité du processus de calage, il est évidemment hors de question de l'intégrer dans l'organigramme précédent).

La question évoquée ici, à laquelle nous tentons d'apporter un élément de réponse, est d'autant plus sérieuse que le problème de la vraisemblance des impédances utilisées pour le calcul s'accroît lorsque la charge des réseaux augmente...

- Lorsque le processus de génération/distribution combine deux modes ou plus, le choix du coût généralisé intervenant dans la fonction d'impédance peut être relativement délicat selon le contexte :
 - choisir la valeur moyenne des coûts généralisés par mode n'est fondé que dans l'hypothèse où les ordres de grandeur de ces coûts sont comparables. A défaut, un tel choix peut aboutir à des aberrations, en particulier dans le cas où une zone est très mal desservie par un mode, généralement les TC, depuis une zone donnée. Les exemples les plus éloquents concernent les déplacements périurbains (périphérie ↔ périphérie) qui seraient alors sous-estimés par rapport aux déplacements radiaux (périphérie ↔ centre) compte tenu de la bonne qualité des dessertes radiales en TC au regard des dessertes périurbaines ;
 - choisir la valeur minimale des coûts généralisés peut induire des déséquilibres analogues, pour 2 raisons. D'une part, sauf à distinguer des matrices de captifs et de non captifs de tel ou tel mode, le minimum des coûts risque de ne pas être représentatif de l'ensemble des déplacements – par exemple, si les déplacements TC sont nombreux malgré un coût généralisé élevé par rapport à la VP, pour des raisons de contraintes mal prises en compte. D'autre part, une amélioration du mode le plus « coûteux » (à l'horizon) risque de ne pas modifier le minimum, ce qui laissera la matrice inchangée ;
 - pour remédier à ces inconvénients, il est possible de calculer un coût généralisé pondéré en fonction des parts des différents modes. Cette solution est quelque peu paradoxale puisqu'elle suppose que le modélisateur ait une bonne idée de la répartition modale sur toutes les OD : elle prend tout son sens dans le cadre du processus itératif décrit plus haut. La première itération se fait nécessairement en ayant recours à un calcul plus simple : soit l'une des deux précitées, soit en ayant recours à des hypothèses simplifiées de répartition modale par type d'OD. Mais la mise en œuvre de cette dernière méthode peut devenir laborieuse dans le cas de grandes agglomérations aux réseaux TC variés et étendus ;
 - une méthode mixte, combinant, selon les secteurs, l'une ou l'autre des deux premières méthodes ci-dessus, peut être pertinente.
- Le calcul de l'impédance doit évidemment être cohérent avec le choix de la période modélisée et, plus généralement, de la problématique, en particulier selon le mode « privilégié ». Ainsi, les impédances d'heure moyenne sont,

globalement, représentatives de l'attractivité du mode VP alors que celles d'heure de pointe le sont plus pour le mode TC.

- Rappelons enfin que les matrices résultant du processus de calcul de la demande sont susceptibles de modifications plus ou moins importantes dans le cadre de la phase de calage (cf. chapitre 6§3, en particulier procédures de redressement des matrices OD à partir des comptages, par confrontation avec les résultats d'affectation).

4.1.4 Les déplacements intrazonaux

Les déplacements internes aux zones ne participent pas, par construction du modèle, aux affectations. En revanche ils sont comptabilisés dans les calculs de génération et doivent donc être identifiés par le modélisateur dans le processus de distribution. Pour ce faire, il peut faire appel à deux méthodes :

- dans la première, on établit, pour les déplacement émis ou attirés, une proportion de déplacements internes en fonction des caractéristiques de la zone, essentiellement son étendue, sa topographie et ses réseaux de transport,
- dans la seconde, cette distinction s'appuie sur les impédances des déplacements pour les répartir entre les différentes destinations possibles. Or, dans un modèle, l'impédance d'un déplacement interne à une zone donnée n'est pas calculable (ou est nulle). Le modélisateur doit donc proposer pour chaque mode et chaque motif une impédance moyenne des déplacements internes, en fonction, ici encore, de son étendue, de sa topographie et de ses réseaux de transport. Ce choix est en général cohérent avec celui fait pour les longueurs des connecteurs des centroïdes sur le réseau (pondérées en fonction de la répartition probable des trafics sur les différents connecteurs lorsque la zone présente plusieurs connecteurs). (cf. *chapitre 2*)

La pratique montre que le modèle de distribution est très sensible au formalisme adopté pour les déplacements intrazonaux, sans que l'on puisse aujourd'hui faire une recommandation claire à ce sujet.

4.1.5 Les matrices à trous ou technique de matrices lissées

La mise au point du modèle gravitaire tel que décrit ci-dessus suppose de connaître l'intégralité de la matrice des déplacements considérés pour l'année de calage.

Il est cependant possible d'entreprendre la construction de matrices complètes à partir de matrices partielles, provenant par exemple d'enquêtes routières qui n'interceptent qu'une partie des déplacements de l'aire d'étude ; ou en ne retenant qu'une partie jugée fiable de la matrice issue de l'enquête ménages déplacements. On ne cale alors le modèle gravitaire que sur les « cases » disponibles, avec les marges associées. La fonction gravitaire mise au point sur la matrice partielle peut ainsi être étendue à l'ensemble de la matrice. Pour que la technique fonctionne, il ne doit pas être possible de regrouper l'ensemble des OD utilisées pour la mise au point du modèle et celui des OD non utilisées en matrices indépendantes⁶⁷.

⁶⁷ Voir *Modelling transport* [Ortuzar et al 2001] pour plus de détails

Implicitement, cette méthode suppose d'accorder confiance aux distributions issues des enquêtes (entre les flux d'OD enquêtées et les flux d'OD qui ne le sont pas). Or, ces distributions sont a priori statistiquement déficientes : le processus de « remplissage » faisant appel au modèle gravitaire déduit des matrices partielles ne pourra, par construction, compenser les erreurs. Il a tout lieu, au contraire, de les accentuer. Ce risque est d'autant plus grand que les matrices utilisées sont incomplètes (cas de matrices provenant d'enquêtes routières par exemple).

4.1.6 Les agglomérations multipolaires

Dans le cas d'agglomérations de grande taille, comportant plusieurs pôles, un seul modèle gravitaire peut être insuffisant pour décrire convenablement les distributions des déplacements dans les différents secteurs de l'agglomération. En effet, leurs caractéristiques géographiques, topographiques et celles des réseaux de transport peuvent être suffisamment contrastées pour que les distributions « obéissent » à des lois différentes. Il peut donc devenir nécessaire de procéder selon un mode d'emboîtement. En l'occurrence, plusieurs modèles gravitaires doivent être élaborés séparément : pour les flux internes à chaque pôle et pour ceux d'échange entre les pôles (correspondant chacun à une sous-matrice).

4.2 Le cas particulier des trafics d'échange et de transit

Si les volumes des trafics d'échange et de transit sont assez souvent bien connus, leur distribution dans les matrices peut être beaucoup plus délicate.

- Dans l'hypothèse où le modélisateur dispose d'une enquête cordon suffisamment détaillée, fournissant les zones de l'aire d'étude concernées par les trafics d'échange (en général les zones origine puisque la plupart des enquêtes cordon se font dans le sens de sortie des agglomérations), la distribution des OD « à l'intérieur » de l'aire modélisée en résulte directement. La vraie difficulté tient au fait que des flux identiques (mêmes OD, mêmes motifs...) peuvent avoir été interceptés à deux postes d'enquêtes distincts, sur deux itinéraires différents. Au stade de la constitution des matrices de demande, ces flux sont assemblés sur une seule case : l'information relative à l'itinéraire n'apparaît plus. Or, à la différence des OD internes pour lesquelles les itinéraires sont recomposés par l'affectation, les itinéraires des trafics d'échange sont déterminés a priori par les connexions des centroïdes externes sur le réseau modélisé. Le modélisateur doit donc identifier les connexions précises de chaque zone externe et déterminer les caractéristiques des arcs fictifs de telle sorte que les répartitions des flux sur les différents itinéraires soient aussi proches que possible des résultats d'enquêtes⁶⁸.

Il s'agit là d'une limite inhérente aux modèles. Généralement de peu d'influence, cela peut poser de réels problèmes lorsque les aménagements du réseau à l'intérieur de l'aire d'étude, aux horizons du calcul, sont susceptibles de modifier les itinéraires empruntés par les trafics d'échange et de transit et, par conséquent, leurs points d'entrée sur le réseau (par exemple, une

⁶⁸ Signalons que le réseau pris en compte dans la modélisation des déplacements de l'agglomération lilloise va bien au-delà des limites de l'aire d'étude de l'enquête ménages. Il comprend les principaux axes de Picardie, d'Île-de-France et de Belgique. Un tel choix permet de limiter les problèmes décrits dans ce paragraphe.

modification importante de la traversée autoroutière de Lyon). Or les choix faits par le modélisateur pour l'année de référence ne permettent pas d'assurer que ces phénomènes sont convenablement évalués aux horizons du calcul. Des modèles complémentaires, à plus ou moins grande échelle, peuvent être nécessaires pour choisir la meilleure connexion des zones externes aux différents horizons, compte tenu de la problématique.

- En cas d'absence d'enquête cordon suffisamment détaillée, le modélisateur doit avoir recours à des modèles de distribution spécifique des flux de transit et des flux d'échange.

4.3 Distribution des flux liés aux générateurs spécifiques

A notre connaissance, il n'existe pas de méthode standard pour distribuer les flux des générateurs spécifiques, lorsqu'ils ont été identifiés à l'étape de génération (voir chap. 3 § 3.8). Ces flux peuvent être soit réintégrés aux flux similaires avant l'étape de distribution, soit traités à part.

Dans le cas des surfaces commerciales, on recense quelques formulations qui pourront inspirer le modélisateur :

- modèle de chalandise : formule en $1/x$; x pouvant être la distance ou un coût généralisé ; cette méthode revient à tracer des aires d'influence du générateur.
- modèle calculant pour chaque zone l'attractivité des différents générateurs commerciaux en concurrence. Le CETE Nord-Picardie recense 3 formulations :

un modèle dit « de Huff » :

$$a) T_{it} = P_{it} \times E_i$$

où T_{it} est le nombre de déplacements entre la zone i et l'hypermarché H_t , P_{it} la probabilité qu'une personne de la zone i effectuant un déplacement vers un hyper choisisse l'hyper t et E_i le nombre total de déplacements vers un hyper pour la zone i (donné par l'étape de génération)

$$b) P_{it} = \frac{U_{it}}{\sum_{k=1}^{K} U_{ik}}$$

où U_{it} est l'utilité pour l'individu i apportée par l'hypermarché H_t (pour K hypermarchés).

$$c) U_{it} = A_t^\alpha \times D_{it}^\beta$$

où A_t mesure l'attraction de l'hyper H_t , D_{it} mesure l'effet de la distance entre la zone i et l'hyper H_t et α et β sont des coefficients à caler.

un modèle logit classique avec une forme additive pour l'utilité :

$$a) P_{it} = \frac{e^{V_{it}}}{\sum_{k=1}^{k=K} e^{V_{ik}}} \text{ avec } U_{it} = V_{it} + \varepsilon_{it}$$

où U_{it} est l'utilité pour l'individu i apportée par l'hypermarché H_t , V_{it} étant la partie fixe et ε_{it} la partie aléatoire

$$b) V_{it} = \alpha \times A_t + \beta \times D_{it}$$

un modèle logit avec une forme multiplicative pour l'utilité :

$$a) V_{it} = \alpha \times A_{\max} \times \frac{D_{it}}{A_t}$$

où A_t mesure l'attraction de l'hyper H_t , A_{\max} est l'attraction de l'hypermarché le plus attractif parmi ceux étudiés, D_{it} mesure l'effet de la distance entre la zone i et l'hyper H_t et α est un coefficient.

L'attractivité peut être la surface de vente, le nombre de places de parking, etc.. Toutes ces formules peuvent se caler par régression linéaire en passant aux logarithmes. D'autres méthodes, a priori moins courantes, peuvent être envisagées : maximisation de la fonction de vraisemblance, calage « manuel » par itération, ajustement d'une fonction non linéaire.

Le CETE Nord-Picardie a ainsi retenu pour l'agglomération de Valenciennes le modèle de Huff, avec :

$$V_{it} = \text{coeff}_t \times \text{Parking}_t^{1,1} \times D_{it}^{-1,7}$$

Parking étant le nombre de places de parking, D_{it} un coût généralisé, et coeff_t un coefficient correcteur propre à chaque hypermarché, proche de 1.

4.4 Autre modèle : le modèle d'opportunité

Les modèles gravitaires sont incontestablement les plus courants : d'autres approches sont pourtant possibles. Ainsi, le modèle d'opportunité se base sur l'idée que l'existence d'un déplacement n'est pas explicitement liée à la longueur (ou, plus largement au coût généralisé) mais à l'opportunité relative de remplir les objectifs du déplacement dans la zone j plutôt que dans la zone k (à relier au motif). Selon cette approche, pour les déplacements partant de i , on range toutes les zones par ordre décroissant de coût ; le trafic entre deux zones i et j est fonction du nombre d'opportunité dans la zone j (nombre d'emplois par exemple) et de la probabilité que l'opportunité satisfasse l'utilisateur. Chaque zone se remplit au fur et à mesure de leur éloignement.

Les avantages, à la fois théoriques et pratiques, de ce modèle au regard du modèle gravitaire n'étant pas probants, son utilisation est rare.

5. Méthodes combinées génération/distribution

5.1 Génération /distribution conjointes

Les méthodes précédemment décrites peuvent s'avérer incompatibles avec les données dont dispose le modélisateur ou, compte tenu du temps de mise en œuvre et de contrôle qu'elles imposent, avec les contraintes financières et de délai de construction du modèle. On peut alors employer des méthodes « combinées », généralement plus simples.

Celles-ci sont spécialement pertinentes en ce qui concerne les matrices de déplacements VP, en raison de la relative « isotropie » du transport routier. En effet, toutes les zones d'une agglomération donnée ont entre elles des échanges dont les volumes dépendent beaucoup moins des caractéristiques des réseaux routiers, qui couvrent la totalité de l'agglomération, que ceux des échanges en transports collectifs ne dépendent des caractéristiques et des performances des réseaux TC⁶⁹.

Dans ces conditions, il devient licite de supposer que les sous-modèles gravitaires décrits supra peuvent être utilisés non seulement pour *distribuer les flux* mais également pour *les calculer*, en fonction des caractéristiques socio-économiques des zones.

Selon un processus similaire à celui mis en œuvre pour le modèle de distribution décrit supra, il convient de procéder comme suit :

- sélection des flux de référence qui seront utilisés pour calibrer la (les) formule(s) gravitaire(s). Ceux-ci seront généralement extraits des résultats d'enquêtes routières et sélectionnés en raison de leur pertinence (flux entièrement interceptés lors des enquêtes - il est cependant déconseillé de ne retenir que les flux les plus importants compte tenu du fait que leur représentativité statistique serait meilleure) ;
- identification des variables explicatives (poids représentatifs des zones) : les populations et emplois, « segmentés » si nécessaire, et, éventuellement, d'autres paramètres supposés représentatifs de la capacité attractive et émissive des zones⁷⁰. Le modèle de distribution n'utilise donc pas, dans ce cas, les émissions/attractions des zones (non calculées). Le calcul fait en particulier appel à une impédance qui peut être identique ou homogène à l'impédance utilisée pour les affectations. Il est cependant possible d'utiliser des variables « dérivées », comme la distance de déplacement, éventuellement majorée d'un terme fixe pour tenir compte du temps d'accès au véhicule (cas des matrices VP essentiellement) ;
- calcul, selon une méthode comparable à celle utilisée pour le modèle de distribution « classique », des coefficients de la formulation gravitaire de manière à reconstituer de façon satisfaisante les flux de référence. Le paradoxe déjà signalé au sujet du mode de calcul des impédances persiste ; la simplicité de la méthode permet cependant de mettre en œuvre le processus itératif proposé à moindres frais ;

⁶⁹ De surcroît, a priori, cette isotropie se constate plus en milieu urbain qu'en milieu interurbain où les découpages administratifs, les héritages culturels, les frontières nationales peuvent avoir une influence sensible sur les flux de déplacements

⁷⁰ Selon, bien entendu, la fiabilité et l'exhaustivité des sources de données

- application à l'échelle de l'ensemble de l'agglomération des formules gravitaires afin de disposer d'une matrice convenablement structurée dont il faut alors ajuster la marge⁷¹, connue ou calculée par ailleurs.

Quelques remarques importantes :

- la méthode est fondée sur l'hypothèse a priori de la qualité statistique des flux de référence utilisés pour calibrer les formulations gravitaires. Elle s'applique donc plus difficilement en cas de segmentation importante de la demande qui induit une réduction de la représentativité des échantillons ;
- dans la perspective de modélisations multimodales, le recours à de telles méthodes paraît indiqué lorsque le modélisateur dispose par ailleurs de matrices TC complètes et validées et que l'analyse de la demande n'est pas un enjeu majeur du modèle.

5.2 Une méthode simplifiée variante

Dans certains cas, compte tenu des résultats attendus, les modèles n'exigent pas un processus extrêmement fin de construction de matrices de demande de sorte qu'il peut devenir intéressant d'utiliser directement les matrices issues des enquêtes ménages. Cela est notamment envisageable pour le mode VP, beaucoup mieux représenté dans les échantillons des enquêtes ménages que ne le sont les TC. Dans ce cas en effet la représentativité statistique des matrices déduites directement des enquêtes s'améliore nettement, même si le modélisateur segmente la demande selon les motifs principaux⁷².

En procédant de manière identique au § 6, on peut obtenir des matrices tous motifs par période. Le caractère systématique du procédé permet de disposer rapidement de matrices qui peuvent suffire aux objectifs visés⁷³.

Notons que les matrices qui en résultent sont établies en référence au zonage de l'enquête ménages déplacements. Il faut prévoir d'effectuer ultérieurement une redistribution des flux entre les différentes zones du zonage constitué pour les besoins du modèle selon des principes comparables à ceux décrits plus haut. Dans ces conditions, il apparaît préférable, sinon indispensable, que le zonage du modèle corresponde à un sous-découpage de celui de l'enquête ménages déplacements, dans des proportions « raisonnables » (ainsi, dans l'hypothèse où le découpage de l'enquêtes ménages comporte environ 100 zones, la méthode convient moins, a priori, pour un zonage d'étude de plusieurs centaines de zones).

⁷¹ i.e. la somme de tous les flux de la matrice

⁷² Pour les déplacements professionnels, il reste nécessaire de procéder de façon spécifique, étant donné l'inadaptation des enquêtes ménages à la collecte des informations relatives à ces déplacements

⁷³ On peut également signaler ici que, si le calcul des intervalles de confiance résultant d'une enquête est bien connu et justifie la défiance des modélisateurs vis-à-vis des matrices issues d'enquêtes ménages, celui des incertitudes liées au processus classique génération/distribution n'est pas standard... La méthode préconisée peut constituer, dans certains cas, un compromis satisfaisant.

6. Le choix horaire

Le choix horaire est en général une grille de répartition horaire (application de coefficient de passage aux périodes considérées).

Il existe toutefois de véritables modèles de choix horaires, comportementaux. A notre connaissance, ce type de modèle est très rarement utilisé en France. On peut citer les modèles logit (éventuellement désagrégés), comparables aux modèles de choix modal⁷⁴; les modèles dynamiques de choix horaire (modèle de choix horaire/affectation combinée). Ce dernier type de modèle se réfère à une distribution désirée d'heure d'arrivée à destination, les usagers choisissant leur heure de départ en fonction de la congestion des réseaux⁷⁵.

La répartition horaire peut se faire à différents niveaux du processus de modélisation, avant ou après chacune des étapes (génération, distribution, choix modal). Le choix est fonction du contexte et est conditionné essentiellement par :

- la représentativité statistique des échantillons utilisés pour les calculs,
- les disparités d'offre et de conditions de circulation selon les différentes heures de la journée qui peuvent influencer sur l'importance et la répartition de la demande,
- le choix de la période modélisée comme spécifié au chap. 3 § 2.2.

Le premier critère impose souvent que les calculs de matrices soient menés sur une période journalière. En effet, la répartition horaire se fait souvent après l'étape de distribution, la problématique du choix modal étant très dépendante de la période modélisée. Les matrices des périodes modélisées sont alors construites comme des proportions des matrices journalières ainsi constituées. Dans ce cas, compte tenu des variations de structures des matrices horaires qui résultent de la dissymétrie des matrices par motifs et de la variation de leurs parts au cours de la journée, il est très souhaitable de disposer de matrices journalières par motifs pour reconstituer des matrices horaires, même dans l'hypothèse où l'affectation ne prévoit pas de distinction des motifs.

Ainsi à partir des deux hypothèses suivantes :

- la structure globale des matrices de déplacements par grand motif reste stable tout au long de la journée,
- la répartition horaire des motifs est uniforme sur l'ensemble d'une agglomération considérée ou, tout au moins, sur de grands secteurs de celle-ci, il devient donc possible de construire, pour chaque période de la journée, des matrices par motif comme des proportions des matrices journalières de ces motifs.

La construction d'une matrice tous motifs pour chaque période, somme des matrices par motif, est particulièrement simple :

⁷⁴ De tels développements ont cependant été réalisés par l'INRETS et COFIROUTE (sur Davis)

⁷⁵ Le projet Quatuor, financé par le PREDIT met en œuvre sur l'agglomération parisienne un modèle de déplacement dynamique représentant explicitement le choix horaire et les phénomènes de file d'attente [de Palma, 1999]. Le logiciel METROPOLIS, issu de ce projet, est depuis 2001 opérationnel et distribué par le bureau d'étude AdpC.

$$M_h = \sum_i p_{ih} \cdot M_i$$

où :

- M_h est la matrice tous motifs de la période considérée,
- M_i est la matrice journalière du motif i
- p_{ih} est la proportion du motif i à la période h sur l'agglomération (ou une partie importante de celle-ci), telle qu'elle ressort des enquêtes existantes dans l'aire d'étude ou dans des zones similaires.

A défaut de matrices journalières par motifs, il sera nécessaire d'élaborer, à partir des enquêtes disponibles, des ratios (période modélisée)/(journée) pour chaque OD ou ensemble d'OD et de les appliquer aux matrices journalières calculées.

Dans tous les cas, le modélisateur devra prendre garde aux erreurs résultant des arrondis consécutifs aux divisions (*cf. chap. 4 § 3.4*).

Déplacements par jour et par personne	Domicile-Travail			Domicile-Professionnel			Domicile-Études			Domicile-Achats			Domicile-Autres			Secondaire		
	PPM	PM	PPS	PPM	PM	PPS	PPM	PM	PPS	PPM	PM	PPS	PPM	PM	PPS	PPM	PM	PPS
min (1990-2001)	19,8	34,6	13,4	13,3	31,8	13,1	22,7	41,9	5,9	2	60,2	17	9,2	41,7	17,6	9,2	56,3	11,4
médiane (1990-2001)	25,3	40,6	16	20,65	44,4	17,9	34,15	51,75	12,55	4,8	64,45	22,05	10,95	48,15	21,15	10,9	63,65	18,75
max (1990-2001)	29,6	46,9	18,6	27,7	52,8	23,5	40,5	60,7	19,5	10,7	73,5	27,9	15,9	54,2	22,6	16	68	24,5
min (1976-1989)	16,7	38,6	11,2	10,6	31,5	15,1	25,4	43,1	8,5	2	58,9	13,9	6,3	43,1	18,2	5,5	56	16,1
médiane (1976-1989)	23,85	42,35	16,3	17,75	44,9	19,65	31,55	52,65	13,95	6,2	65,45	21,75	9,9	47,95	21,55	11,15	60,6	20,75
max (1976-1989)	27,6	50,3	18,5	26,4	53,7	23,4	35	64,1	22,6	9,7	75,3	26,8	11,7	56,4	24,3	14,1	66,8	28,7

PPM (période de pointe du matin) : 7h00 - 9h00

PM (période moyenne): 9h00 - 17h00

PPS (période de pointe du soir): 17h00 - 19h00

Tableau 21 Répartition des passages PPM/PM/PPS par motif dans les agglomérations françaises en pourcentage

(Source : Enquêtes ménages déplacements. Voir en annexe pour plus de détails)

7. Contrôles et validation

Il convient, au terme de la conception des matrices, de vérifier qu'elles sont :

- *cohérentes entre elles*, c'est-à-dire, lorsque plusieurs périodes sont modélisées, que leur combinaison rend compte des déplacements sur l'ensemble de la période considérée.

Par exemple, dans le cas d'un modèle comportant trois périodes : pointe du matin, période moyenne, pointe du soir, la combinaison des trois matrices ou ensembles de matrices de ces différentes périodes doit être approximativement symétrique éventuellement par mode si l'on a travaillé ainsi (tout au moins le nombre d'entrées dans une zone doit être égal au nombre de sorties de cette zone). Un contrôle de même nature peut être entrepris pour les matrices par motif, en tenant compte toutefois du fait que le phénomène des chaînes de déplacements contrevient à la symétrie.

Une méthode simple et éloquente de vérifier le « niveau » de symétrie d'une matrice M consiste à réaliser des graphiques (nuages de points) représentant les couples $[M_{ij}, M_{ji}]$ ou des couples $[E_i, A_i]$, E_i étant les flux émis par la zone i , A_i les flux attirés ;

- *cohérentes avec les données connues*, notamment par le biais des enquêtes ménages, sur les déplacements des habitants (et, le cas échéant, des autres si des enquêtes existent) : les mobilités globales, par motif et par mode, aux différentes périodes ainsi que diverses caractéristiques des déplacements, en particulier la distance des déplacements (moyenne et distribution par classes de distance), également par mode et par motif ;

D'autres contrôles, ponctuels, peuvent également être effectués par le modélisateur : à titre d'exemple, on peut citer le cas des déplacements intrazonaux, dont on a rappelé que, ne participant pas à l'affectation, ils devaient être identifiés et retirés de la demande modélisée. Ainsi, les distances intervenant dans le calcul de l'impédance des déplacements internes à une zone donnée doivent être compatibles avec les distances séparant cette zone des zones contiguës ou proches. De même, les ordres de grandeur des flux intrazonaux doivent être compatibles avec les flux entre la zone en question et les zones contiguës ou proches.

Enfin rappelons que les matrices obtenues à l'issue des étapes de génération/distribution, compte tenu des imprécisions des méthodes et des données ne permettent pas d'obtenir des matrices validées par rapport aux différentes mesures. Ce point est abordé dans le *chapitre 6* sur l'affectation.

8. Pour en savoir plus

Le présent chapitre a été rédigé en particulier en référence à l'ouvrage *Modelling transport* [Ortúzar et al, 2001], auquel nous renvoyons le lecteur souhaitant en savoir plus, en particulier ses chapitres 4 et 5.

Signalons également le rapport : *Comportements de déplacement en milieu urbain, les modèles de choix discrets* [Certu 2000] (en particulier *chapitre 4 §2*), en ce qui concerne les modèles désagrégés de génération.

Citons enfin la référence suivante :

- **Zones et établissements générateurs de trafic**
Recueil de données de comptage - Administrations, aéroports, gares SNCF, hôpitaux, surfaces commerciales, zones d'activité, etc.
avr-99

Auteur : Département Mobilité, Transport et Service Urbain Éditeur : CERTU
Recueil de données expérimentales (VL et PL) ramenées aux caractéristiques (surfaces, emplois) de différents types de générateurs. Même si les enseignements sont difficiles à généraliser (chaque cas est particulier), ces enquêtes permettent toutefois de déterminer des ordres de grandeur intéressants.

Chapitre 4. Estimation de la demande future

Mots clés :

Histogramme des distances

Histogramme représentant les nombres de déplacements d'une matrice répartis en classes de distance (par exemple : 0-1 km, 1-2 km ...)

Modèle économétrique

Modèle visant à établir des corrélations entre les évolutions d'un paramètre global (circulation...) et celles du contexte économique d'une aire d'étude, caractérisé par des variables économiques (population totale, coût des carburants, revenu moyen par personne...)

Facteur de croissance

Méthode consistant à construire une matrice par déformation d'une matrice existante, faisant généralement appel à un algorithme dit de FRATAR

L'estimation de la demande de déplacements future s'établit après l'élaboration de la demande en situation de référence (*Cf chapitre 3*). Elle se fonde, par définition, sur une anticipation des évolutions du contexte de l'agglomération considérée, tenant plus ou moins compte, selon les objectifs du modèle, des orientations des politiques de déplacements. Cela suppose l'exploitation de **bases de données** spécifiques, en sus de celles déjà exploitées dans le cadre de l'estimation de la demande en situation de référence, en relation avec l'analyse des **paramètres importants**. Le choix fait dans le présent chapitre consiste à présenter, parmi toutes les **méthodes possibles**, les plus « courantes » et les plus « agrégées ». Elles dépendent à la fois de cette analyse, des méthodes utilisées pour l'évaluation de la demande en situation de référence, mais également du processus de calage retenu, qui peut imposer que la demande en situation future découle directement de celle de la situation de référence. En revanche il est délicat de prendre en compte certains phénomènes complexes, dont les mécanismes précis restent peu connus, eu égard à la faiblesse des études et enquêtes les concernant, notamment **l'induction de trafic** et **les reports horaires**. En ce qui les concerne, l'état de l'art est toutefois décrit ainsi que les nécessaires **contrôles et validations** que cette étape impose.

1. Les bases de données

L'élaboration des matrices de demande future se fait selon des méthodes et à partir de bases de données comparables à celles sollicitées pour l'élaboration des matrices de la période de référence.

Les **données socio-économiques** utiles sont :

- les prévisions d'évolution des variables socio-économiques locales (population, emplois, parc automobile...), en premier lieu celles qui ont été utilisées pour les étapes de génération et de distribution. Selon que le modèle développé vise ou non à planifier le développement urbain, ces données pourront être considérées comme des données d'entrée, « intangibles » aux horizons du calcul, ou, au contraire, comme des données susceptibles d'ajustement en fonction des conclusions des modèles sur l'aptitude des réseaux de transport à répondre à la demande nouvelle ;
- les agrégats macro-économiques qui permettent d'établir des corrélations entre les évolutions de la demande de déplacements et celles du contexte : le PIB régional ou local, la consommation des ménages, les coûts des carburants...

Les **enquêtes** utiles à la modélisation de la demande future, outre celles répertoriées au chapitre précédent, sont essentiellement les enquêtes de préférence déclarées. En l'espèce, elles consistent à interroger les usagers sur les changements de comportement qu'ils acceptent ou envisagent dans une situation future donnée. Toutefois, elles peuvent servir à prévoir la répartition modale ou les comportements face à la mise en service d'une nouvelle infrastructure à péage ou à une modification de tarification ; a contrario, les évolutions de la mobilité globale ne peuvent être prévues sciemment à partir de ce type d'enquête. *Cf. Chapitre 5 § 4.1.*

2. Les paramètres importants

Les évolutions de la demande de déplacement à divers horizons du calcul peuvent être liées à celles de paramètres nombreux et interdépendants :

- **la mobilité.** Selon les méthodes de constitution des matrices de la période de référence, cette notion couvre des champs plus ou moins vastes : il peut s'agir des mobilités par secteur ou type de zones, par motif, par mode, selon les différents critères caractérisant les ménages ou les personnes (modèles catégoriels). Les évolutions prévisibles aux horizons de calcul doivent être soigneusement établies en référence aux évolutions générales du contexte, le cas échéant en ayant recours à des intervalles de probabilité qui pourront participer à une analyse de risque (*voir chap. 1*) ;
- **les longueurs moyennes des déplacements** et, plus généralement, les histogrammes des distances pour un mode donné. A l'avenir, il est possible que les évolutions de ce paramètre conditionnent, plus que celles de la mobilité, les évolutions de la circulation sur les différents systèmes de transport et leur aptitude à répondre à la demande de déplacements. L'évolution de la longueur moyenne de déplacement résulte à la fois de l'évolution des comportements « toutes choses égales par ailleurs » et de la modification progressive du paysage urbain (délocalisation des zones d'emploi et d'habitat, extension ou création des zones commerciales périphériques...). En général, ce paramètre n'intervient pas directement dans le calcul des matrices mais il doit constituer un point de contrôle important. En particulier la méthode d'élaboration des matrices aux horizons ne peut aboutir à des évolutions des longueurs moyennes de déplacement incohérentes avec les observations faites lors des enquêtes ménages : par exemple, l'évolution de la longueur moyenne des parcours VP à Marseille entre les enquêtes ménages de 1988 et 1997 en heures de pointe du soir est d'environ 0,4 km ($\approx + 5\%$) ;

- parmi **les évolutions socio-économiques** susceptibles d'être prises en compte dans le processus de calcul de la demande future, on peut citer :
 - la croissance ou décroissance démographique (population et emplois) et, plus généralement, l'évolution de la structure des catégories de population ou de la composition des ménages⁷⁶,
 - le développement urbain et la création de pôles d'activité nouveaux ou de zones d'emplois nouvelles,
 - la modification du profil socio-économique des habitants des différentes zones,
 - la diminution de la taille moyenne des ménages,
 - l'augmentation du parc automobile et du parc de deux-roues motorisés, ou non,
 - la croissance du revenu par personne,
 - la modification des rythmes de travail.

Le recueil des données et séries correspondantes se fait auprès de l'INSEE, des chambres de commerce et d'industrie, des organismes spécialisés locaux (Agence des déplacements, agences d'urbanisme, grands projets de ville...), services fiscaux... Lorsque les organismes en question n'ont pas effectué de prévisions d'évolutions aux horizons considérés, le modélisateur procédera par lui-même aux calculs correspondants, en référence aux politiques locales et aux tendances, et en s'assurant de la cohérence des évolutions des différents paramètres (qui peuvent être plus ou moins corrélés).

Selon les cas, les évolutions des paramètres en question peuvent être considérées à l'échelle de l'ensemble de l'agglomération ou à une échelle plus locale, par zone ou par secteur.

Dans tous les cas, les évolutions de ces différents paramètres utilisées pour les besoins du calcul doivent être détaillées, pour l'horizon « final » et pour chacun des horizons intermédiaires du calcul.

3. Les différentes méthodes

3.1 Génération/distribution en projection

Dans le cas où il a été choisi de modéliser la matrice à l'horizon de référence (voir *chapitre 3*), le modèle de génération/distribution peut s'utiliser à l'horizon de projection. La méthode consiste à construire les matrices des déplacements aux horizons de calcul de la même manière que celles de la période de référence, en adaptant les valeurs des variables du calcul en fonction de leur évolution probable aux horizons considérés. De la sorte, les matrices aux horizons ne sont pas directement déduites de celles de la période de référence.

Rappelons que cette méthode a l'avantage de permettre une description fine des comportements. Seule une modélisation de la matrice de demande permet de comprendre ses évolutions et de distinguer ce qui relève de l'accroissement de mobilité, du report d'itinéraire.... Selon les objectifs du modèle, on pourra analyser les phénomènes par motif, par catégorie de population, etc.

⁷⁶ Cf. travaux de J.L. MADRE (INRETS) sur ce sujet

Il convient également de bien comprendre les limites de la démarche :

- Le calcul de la demande à l'horizon de calcul selon un processus de génération/distribution identique à celui appliqué pour la demande de l'année de référence aboutit à l'absence de lien « direct » entre l'une et l'autre, à la différence, par exemple, du cas où la matrice à l'horizon est une simple extrapolation de celle de référence (*cf. § 3.2.1 ci-après*). En conséquence, la modélisation de la demande aux horizons ne bénéficie pas de la validation du calage, tout au moins autant que les autres éléments du modèle (réseaux, paramétrage, processus d'affectation) ;
- la méthode est relativement moins critiquable lorsque les matrices de la situation de référence n'ont pas fait l'objet de modifications significatives suite au calage de l'affectation, validant ainsi les modèles théoriques utilisés. Dans ce cas, la pertinence des matrices aux horizons se fonde sur la validation du processus théorique d'élaboration des matrices de la période de référence. Cela est cependant rare : en général, les matrices de la période de référence construites selon l'une ou l'autre des méthodes envisagées dans le chapitre précédent sont corrigées et ajustées de façon plus ou moins automatique pour satisfaire aux exigences multiples du calage. Ces corrections ou ajustements ne sont pas reproductibles simplement pour les matrices de demande future.

De relativement peu d'importance dans le cas de modèles destinés à évaluer les conséquences d'une politique de développement urbain sur les systèmes de transport ou, plus généralement, de modèles de niveau stratégique, ce problème peut devenir délicat lorsqu'il s'agit de faire des prévisions de recettes de systèmes à péage ou de systèmes de TCSP.

De surcroît, la méthode qui consiste à reproduire aux différents horizons le processus théorique mis en œuvre pour les matrices de la situation de référence n'est applicable qu'aux flux internes. En ce qui concerne les flux d'échange et de transit qui sont calculés d'abord en référence à des comptages, on procède selon la méthode des facteurs de croissance décrite au paragraphe suivant.

3.2 Méthode par facteur de croissance

La méthode présentée ci-dessous s'applique plus généralement sur des matrices par mode, même si en théorie, rien n'empêche de l'appliquer sur une matrice tous modes, pour peu que l'on trouve un indicateur représentatif de la croissance de mobilité tous modes. Pour des raisons de simplicité de rédaction, nous nous plaçons ci-dessous dans le cas de matrice par mode.

A la différence de la méthode précédente, la méthode par facteur de croissance consiste à construire les matrices des horizons futurs comme des extrapolations des matrices de la période de référence. Les flux composant une matrice donnée sont ajustés de façon systématique et itérative de manière à ce que les émissions/réceptions totales des zones soient égales à des valeurs données. Cette méthode suppose donc de se référer à des matrices existantes ; elle est avant tout utilisée pour leur redressement ou leur éclatement.

Plus généralement, la méthode peut être plus ou moins détaillée, selon que l'on applique un facteur de croissance à la matrice entière, aux lignes et aux colonnes séparément ou aux cases de la matrice directement.

3.2.1 Application d'un facteur de croissance uniforme

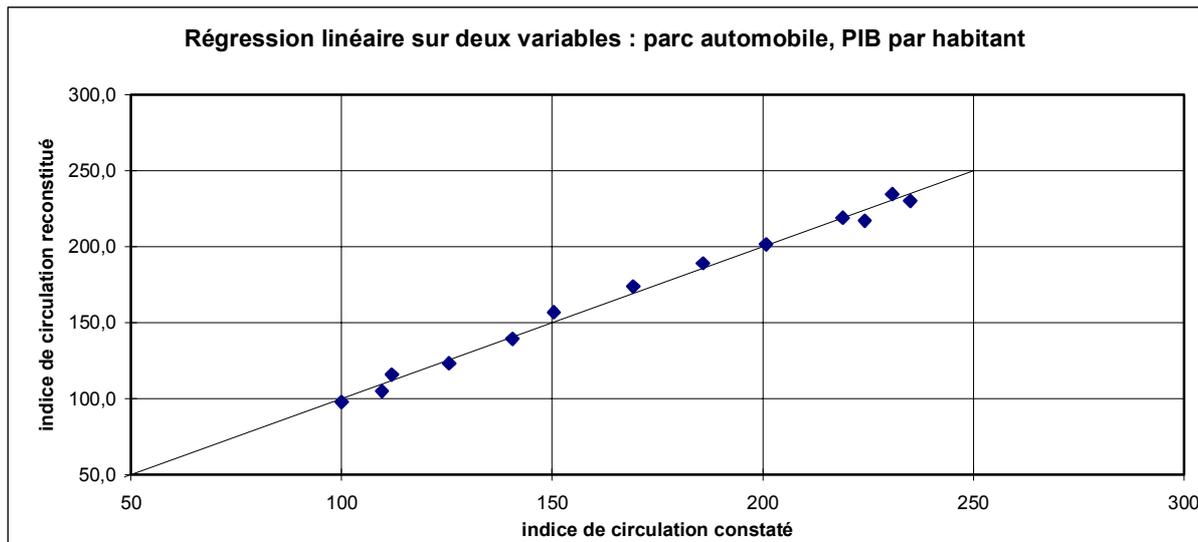
Le premier niveau d'extrapolation possible consiste à appliquer uniformément à l'ensemble des matrices un coefficient de croissance unique. Selon les objectifs du modèle, le mode de calcul de ce coefficient peut être plus ou moins sophistiqué. Par exemple, lorsqu'il s'agit de dimensionner un ouvrage par rapport à une demande future dans un contexte urbain ou périurbain appelé à évoluer peu, un prolongement pertinent des tendances peut suffire. Il est cependant rare qu'un modèle soit développé dans cette seule perspective : il devient alors nécessaire d'établir des taux de croissance à partir de modèles économétriques simples.

L'objectif des modèles en question consiste à rechercher des corrélations entre les évolutions de la circulation sur un réseau donné et celles de paramètres socio-économiques représentatifs de l'activité socio-économique de l'agglomération. Par souci de simplification, on a généralement recours à des indicateurs. Les circulations sont, selon le réseau considéré, en véhicules x km ou en passagers x km, ce qui impose de disposer de bases de données de comptages complètes sur des périodes significatives (au moins d'une dizaine d'années) ou, au minimum, en ce qui concerne le trafic VP, de statistiques complètes sur l'évolution de la consommation des carburants qui peut être assez aisément reliée à celle de la circulation. Les distances utilisées pour le calcul des circulations peuvent être fournies directement par le modèle.

Parmi les variables significatives utilisées pour ce type de modèle, les plus courantes sont :

- le revenu par personne,
- le PIB ou la consommation des ménages⁷⁷
- le coût moyen des carburants (dans ce cas, il faut tenir compte de la diésélisation du parc),
- la population totale ou le nombre total de conducteurs (qui peut avoir évolué de façon légèrement différente de la population totale),
- le parc automobile.

⁷⁷ Ce paramètre est plus adapté à des aires d'étude de grande taille (région parisienne ou lyonnaise par exemple), pour lesquelles les variables macro-économiques sont effectivement représentatives de l'activité économique



$$\text{Indice reconstitué} = 0,62 \cdot \text{indice parc} + 1,40 \cdot \text{indice PIB/hab.} - 104,3$$

$$R^2 = 0,993$$

Figure 10. Exemple d'indicateur de croissance pour la Réunion (séries sur la période 1981-1995) - source SETEC

L'indépendance des variables doit être recherchée⁷⁸. Les prévisions d'évolution des différents paramètres aux horizons, appliquées au modèle ainsi constitué, permettent de prévoir les évolutions futures globales de la circulation.

Dans le cas où l'évolution de la demande est prévue uniforme sur l'aire d'étude, l'évolution de la circulation correspond approximativement à celle de la demande et les taux ainsi calculés peuvent être appliqués à la matrice. En général il faut cependant appliquer à ces taux une légère décote pour tenir compte du fait que l'accentuation des phénomènes de saturation induit, toutes choses égales par ailleurs, des modifications d'itinéraires et des allongements de temps de parcours.

Dès lors qu'il s'agit de tenir compte d'une « déformation » des matrices, cette hypothèse n'est plus licite.

3.2.2 Application de facteurs de croissance pour les émissions et les attractions

En effet, l'hypothèse simplificatrice présentée ci-dessus, n'est généralement pas satisfaisante dans la plupart des modèles dans la mesure où elle ne tient absolument pas compte des modifications du paysage urbain des points de vue de la localisation et de l'importance des populations et des zones d'activité. Lorsque le modélisateur souhaite intégrer ces paramètres, il convient d'appliquer des taux d'évolution différenciés selon les secteurs, voire selon les zones.

⁷⁸ Dans le cas du graphique présenté, il est très probable que les variables utilisées sont partiellement corrélées. Dans un contexte comme celui de l'île de la Réunion, on peut cependant défendre l'idée selon laquelle la croissance du parc est due au moins autant à l'évolution des modes de vie ou aux conséquences du type de développement urbain, sous la pression démographique, qu'à la croissance économique globale. Il apparaît de fait que le parc a poursuivi sa progression dans les périodes de récession.

Le calcul des coefficients de déformation d'une matrice M peut être fait par application de facteurs de croissance par ligne et par colonne. Une répartition sur les différentes OD selon un algorithme de FRATAR étant ensuite effectuée.

Pour plus de précision, on peut comparer les deux méthodes de croissance (aux marges et facteur uniforme) pour affiner la matrice à l'horizon et prendre en compte à la fois une croissance des émissions et attractions et la croissance d'un indice de circulation :

- On compare la matrice issue de la méthode par facteur de croissance aux marges et une matrice issue d'un facteur de croissance calculé de telle sorte que les deux matrices aient le même nombre total de déplacements. On peut alors calculer les déformations case à case ($D(i,j)$, rapport des valeurs obtenues case à case).
- On applique la déformation case à case à la matrice de référence M .

$$M'(i, j) = M(i, j).D(i, j)$$

- L'affectation de cette matrice sur le réseau de référence met en évidence un coefficient de variation de circulation V , qui résulte exclusivement de la différence de structure des matrices de déplacements. Une première (bonne) approximation de la matrice de demande aux horizons futurs M_f est alors :

$$M_f(i, j) = D(i, j).M(i, j).\frac{C}{V}$$

C étant le facteur de croissance uniforme tel qu'il peut être calculé par la méthode exposée au § 3.2.1.

En réalité, comme indiqué précédemment, les effets de la saturation croissante des réseaux imposent en général une légère décote du coefficient de croissance C .

3.2.3 Application de facteurs de croissance directement sur les cases de la matrice

Il est évidemment possible d'appliquer des taux d'évolution spécifiques à certaines cases de la matrice de référence. Il est a priori exclu d'appliquer cette méthode de façon systématique à l'ensemble de la matrice, même focalisée, compte tenu du nombre de cases concernées. Il faut donc, en général, soit constituer une typologie des cases (i.e. des déplacements) auxquelles appliquer certaines valeurs de taux⁷⁹, soit identifier les cases susceptibles d'évolutions spécifiques liées à des projets urbains particuliers (cela concerne plus particulièrement les flux TC, plus sensibles aux évolutions importantes de l'offre). Il est cependant certain que cette dernière méthode est laborieuse et assez arbitraire.

3.2.4 Les limites de la méthode par facteur de croissance

La méthode par facteur de croissance appliquée comme indiqué ci-dessus présente des limites importantes :

⁷⁹ La typologie la plus simple est la répartition des flux en flux internes, d'échange et de transit

- les taux de croissance qui résultent de l'application du modèle économétrique sont globaux. Ils ne permettent pas de mettre en évidence des évolutions différentes selon une partition de la demande fine, en particulier lorsque celle-ci distingue plusieurs motifs. La méthode est donc peu adaptée aux modèles pour lesquels la connaissance fine de la demande est un enjeu important (dont, en général, les modèles concernant des projets de transport collectif) ;
- les évolutions de la circulation sur les différents réseaux considérés sont connues pour des moyennes journalières : sauf à disposer d'un « modèle » de répartition horaire, la méthode conduit à appliquer de façon indifférenciée des taux de croissance identiques pour les différentes périodes modélisées ;
- l'approche économétrique n'intègre pas les paramètres comportementaux, liés notamment à la nature de l'offre de transport. En cela elle est également peu adaptée aux problématiques de développement des systèmes de transport collectif. Dans le même esprit, il est difficile d'intégrer dans la formulation du modèle économétrique des variables traduisant les évolutions de l'offre, en particulier celles relatives à l'amélioration de la desserte de certains secteurs, par TCSP par exemple. Cela est évidemment moins nécessaire pour les déplacements VP, eu égard à la plus grande « isotropie » du transport routier signalée au chapitre précédent. En conséquence cette méthode paraît peu adaptée à la mise en œuvre de modèles visant à apprécier les conséquences d'une politique des déplacements, notamment lorsque celle-ci entend conduire à une modification importante des comportements et de la répartition modale ;
- enfin, l'approche économétrique suppose, de façon plus ou moins explicite, que les corrélations entre les variables explicatives et les variables expliquées sont stables dans le temps.

3.3 Méthode mixte

Afin de réduire les difficultés signalées aux deux points précédents, une méthode mixte, largement empirique, est couramment employée (dite aussi « méthode du point pivot »). Cette méthode consiste à combiner les techniques de modélisation des matrices et de déformation de matrice de référence calée. La méthode présentant les avantages des deux autres : analyse fine de la demande et affectation de matrices calées.

- soient M_0 et M_1 les matrices résultant directement de l'application de la méthode génération/distribution/choix modal pour l'année de référence et pour l'horizon de calcul,
- M_h se déduit de M_r , matrice de référence calée, par homothétie :

$$M_h = M_r \cdot \frac{M_1}{M_0}$$

ou par translation :

$$M_h = M_r + [M_1 - M_0]$$

ou encore par combinaison de ces deux méthodes selon le nombre de déplacements dans la case déformée. Plus le nombre de déplacements est

faible, plus on procède par translation, plus le nombre de déplacement est important plus on procède par homothétie.

On voit donc que :

- la construction des matrices de demande aux horizons M_h fait appel à la même technique (génération/distribution) que celle utilisée pour la période de référence, ce qui permet de tenir compte de l'ensemble des paramètres régissant la demande de déplacements, notamment des paramètres liés au comportement des usagers,
- le travail de calage de la matrice de référence M_r est valorisé du fait que les matrices aux horizons en sont directement déduites.

Notons toutefois que cette méthode ne paraît licite que si le processus de calage qui a transformé M_0 en M_r n'a pas bouleversé la structure.

3.4 Stabilité des coefficients dans le temps

Le recours aux méthodes de génération-distribution en projection suppose souvent, de façon implicite, que les paramètres de calcul sont stables dans le temps, c'est-à-dire que les comportements ne changent pas dans une situation donnée, selon la partition considérée. Cela est évidemment discutable, en particulier lorsque la modélisation vise à des projections à long terme. Il est ainsi probable que les raisons de l'accroissement du parc ne seront pas identiques dans une vingtaine d'années à ce qu'elles sont aujourd'hui. En conséquence, la mobilité automobile des « nouveaux » conducteurs pourrait être différente, plus ou moins élevée et/ou se déployant sur des périodes différentes.

On peut tenir compte de ce facteur, essentiellement dans la mesure où le modélisateur dispose de séries chronologiques suffisantes permettant de connaître l'évolution dans le temps des paramètres retenus. Cela est possible dans la plupart des grandes agglomérations françaises, où des enquêtes ménages sont réalisées régulièrement. La durée, assez longue, séparant deux enquêtes successives pour une agglomération donnée et les problèmes de représentativité déjà signalés (cf. chapitre 3 §1.3) sont partiellement compensés par le fait que les évolutions de comportement se reproduisent largement d'une agglomération à l'autre. Le modèle de prévision ainsi constitué sera validé par un contrôle « à rebours » qui consiste à s'assurer que l'utilisation de données anciennes permet de reconstituer convenablement la situation de l'année de référence. Si cette reconstitution n'est pas satisfaisante, il faut envisager un nouveau recueil de données.

Notons que dans un tel cas, le modèle calé sur une série chronologique fait lui-même appel à de nouveaux paramètres que l'on suppose stables dans le temps. Par exemple, un modèle qui reproduirait une croissance observée de 3% de la mobilité motorisée, fait l'hypothèse que cette croissance est stable.

Signalons enfin que la mise en œuvre pratique de ces méthodes se heurte au fait que les résultats des enquêtes ménages les plus anciennes sont rarement disponibles selon des formats informatiques courants, appropriés à des analyses spécifiques et à la confrontation avec les enquêtes les plus récentes.

3.4.1 Quelques points particuliers

- *Les arrondis* : l'application des taux de croissance de la demande calculés dans le cadre de la méthode d'extrapolation peuvent conduire à des aberrations. Par exemple, un taux de croissance de 10% appliqué à un flux faible en situation de référence (de 1 à 4 déplacements) peut aboutir à des flux identiques à l'horizon de calcul, selon le mode d'arrondi utilisé (1,1 étant arrondi à 1, etc.). Ce problème est généralement identifié par les logiciels d'affectation qui prévoient des dispositifs correctifs, souvent fondés sur des logiques « aléatoires », dans les modules de calcul de matrices.

Le modélisateur est invité à prendre spécialement garde à ce problème lorsqu'il procède par lui-même, à l'aide d'un tableur, à ce travail. Par exemple, soit la matrice de référence M de marge m qui évolue uniformément à l'horizon en M' de marge m' . L'application du coefficient de croissance m'/m à l'ensemble de la matrice peut conduire à une matrice M'' , de marge m'' inférieure à m' du fait des arrondis. Le modélisateur peut être tenté d'appliquer à M un taux de croissance supérieur à m'/m de telle sorte que la marge de la matrice M'' soit effectivement égale à m' . Cette méthode n'est en général pas licite car elle conduit à privilégier les flux les plus importants, peu nombreux, au détriment des flux faibles qui peuvent rester inchangés du fait des arrondis. Or, en réalité, ces flux faibles, le plus souvent périurbains, sont souvent ceux qui connaissent les taux de croissance les plus élevés. La matrice ainsi constituée peut donc présenter un défaut structurel.

- *Les flux de transit* : on a vu au chapitre précédent que le calcul des flux d'échange et de transit ne peut se faire selon les mêmes méthodes que les flux internes. En conséquence, seule parmi les méthodes décrites précédemment, la méthode des facteurs de croissance est applicable à ces flux. Dans la mesure où les bases de données sont disponibles, on peut mettre en évidence des corrélations entre les croissances passées de ces flux et l'évolution du contexte socio-économique. Dans le cas particulier du transit, le modélisateur doit intégrer les éventuelles évolutions d'itinéraires possibles non modélisés (« hors » du modèle) du fait soit du développement de l'offre (nouveau contournement de l'aire d'étude), soit de la saturation du réseau urbain qui incite les usagers à choisir plus nombreux les itinéraires existants de contournement de l'aire d'étude.
- *Les matrices aux horizons intermédiaires* : le calcul des matrices aux horizons intermédiaires de calcul dépend du contexte propre à chaque modèle :
 - lorsque l'horizon en question correspond à une date d'évolution importante du contexte (première tranche d'une extension/modification de l'offre, inflexion prévisible dans l'évolution de la demande, compte tenu des objectifs de la politique de développement urbain...), la matrice correspondante doit être calculée selon les mêmes principes que celle de l'horizon « final »,
 - lorsqu'il s'agit simplement d'évaluer la situation intermédiaire des réseaux de déplacement, par exemple avant une mise en service de TCSP prévue cinq ans plus tard, la matrice peut être une simple interpolation des matrices M_t et M_h , au prorata du temps.

De la même manière, il peut être envisagé de procéder à des affectations à des horizons lointains, au-delà de l'horizon « final », en particulier pour les calculs

d'évaluation socio-économique. Selon les cas, le modélisateur choisira de prolonger les tendances prévues pour les périodes précédentes ou de les atténuer/accentuer, pour anticiper d'éventuels changements de contexte ou de comportement.

4. La prise en compte de l'induction

La modification significative de l'offre de transport peut générer un trafic nouveau (induction) ; à l'inverse, la détérioration des conditions de transport peut inciter la population à réduire ses déplacements (désinduction).

Dans le cas des matrices modélisées, l'induction est prise en compte au niveau du report de destination, et au niveau du report modal. Il est rare que l'induction/désinduction soit prise en considération au niveau de la génération (ce qu'on appelle mobilité induite) – cf. modèle prenant en compte l'accessibilité au *chap. 3 § 3.7*. L'augmentation de mobilité peut également être prise en compte en rapport avec l'accroissement des revenus et/ou de la motorisation.

Dans la pratique de ces modèles, il existe des phénomènes d'induction « contre-intuitifs ». Par exemple, la part modale des TC sur une OD donnée peut augmenter, mais le volume global de déplacements peut diminuer dans des proportions plus importantes. On verrait alors dans ce cas le nombre de déplacements TC diminuer, alors même que l'offre s'est améliorée. Le développement des modèles joints distribution/choix modal répond en partie à cette question.

Dans le cas des matrices reconstituées, tous les effets d'induction (report modal, report de destination, accroissement de mobilité) sont confondus, ce qui permet d'analyser moins finement la demande de déplacement. Dans ce cas, on admet généralement que le trafic T_{ij} entre deux zones à une élasticité de l'ordre de 0,4 à 0,8⁸⁰ aux conditions de transport représentées par leur coût généralisé :

$$\frac{T_{ij_1}}{T_{ij_0}} = \left(\frac{C_{ij_0}}{C_{ij_1}} \right)^e$$

Cette valeur (reprise notamment pour les investissements routiers en rase campagne avec $e = 2/3$) est cependant fort empirique et devrait être corroborée par des études ex post réalisées à la suite de la mise en service d'une nouvelle ligne de TC lourd (métro, tramway) ou d'un ouvrage de franchissement (pont, tunnel) entre deux zones séparées par une coupure physique.

Une difficulté dans l'évaluation de l'induction provient du fait que la création d'un nouveau mode ou d'un nouvel ouvrage a plusieurs effets simultanés : par exemple, l'augmentation de la fréquentation des TC constatée lors de la création d'une ligne de métro ou de tramway semble imputable à parts à peu près égales au trafic nouveau (mobilité induite), au report en provenance de la voiture et au report en provenance des modes doux⁸¹.

Les tableaux suivants récapitulent les enseignements consécutifs à la mise en service des diverses lignes et extensions du métro de Lille, Lyon et Marseille ainsi que des tramways en Île-de-France ; les chiffres lillois confirment globalement la dernière

⁸⁰ Valeurs données à titre d'illustration. Le choix se fait au cas par cas.

⁸¹ Cf. CETUR, Études de suivi des ouvertures des métros de Lyon et Marseille, 1979 et « Dynamiques Urbaines – La question du report modal », Vincent Kaufmann, 2000.

assertion (report modal en provenance des VP et des modes doux, pris globalement, compris entre le double et le triple du trafic induit) ; les chiffres franciliens en semblent plus éloignés. Le quasi-doublement du trafic TC à l'ouverture des lignes de métro paraît constituer un bon résultat, d'autres études semblant plutôt faire apparaître une augmentation totale du trafic TC d'environ 50 %, de l'ordre de celle estimée pour le prolongement de la ligne 2.

Résultats d'enquêtes a Lille, par comparaison avec la situation avant mise en service (moins d'un an entre les deux enquêtes)				
	Déplacements sur le TCSP qui se seraient effectués en transports urbains avec ou sans le TCSP	Déplacements sur le TCSP qui ne se seraient pas faits sans le TCSP : Mobilité induite	Déplacements sur le TCSP qui se seraient faits avec un autre mode de transport : Report modal	Ensemble des déplacements de la ligne de métro
Ligne 1 du métro de Lille	49 %	14 %	37 %	100 %
Ligne 2 du métro de Lille	52 %	11 %	37 %	100 %
Prolongement de la ligne 2 de Lille à Mons (5 stations)	65 %	9 %	26 %	100 %

Tableau 22 *Trafic induit lors de la mise en place du métro de Lille*
(Source : Certu, 1997 - Voir en annexe pour en savoir plus)

	Pas de changement de mode	Mobilité induite et changement d'OD	Report modal	Changement de domicile, de travail ou d'école
Tram St-Denis Bobigny.	69,3%	13,5 %	9,7 %	7,5 %

Tableau 23 *Trafic induit après la mise en place des trams en Île-de-France.*
(Source: RATP. Voir en annexe pour en savoir plus)

Dans le même ordre d'idée, il apparaît que l'augmentation de la fréquentation des TC dans plusieurs grandes agglomérations françaises est due, pour un quart à un tiers, à des reports de la VP (le reste étant à parts à peu près égales du trafic nouveau et du trafic reporté de la marche à pied et du vélo). Ces constats sont confirmés par M. Vincent KAUFMANN dans son rapport *Mobilité quotidienne et dynamiques Urbaines – La question du report modal – 2000. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes.*

Ligne mise en service	Année	Part de la clientèle qui n'utilisait pas les transports collectifs (clientèle nouvelle)	Part de la clientèle nouvelle issue de la voiture particulière
Lyon	1979	35%	31%
Marseille	1977	49%	24%

*Tableau 24 Trafic induit après la mise en place des métros à Lyon et Marseille.
(Source : CETUR, - Études de suivi des ouvertures des métros de Lyon et Marseille, Paris, Novembre 1979)*

5. Les reports horaires

La saturation des réseaux de transport d'une part, les évolutions du mode de vie d'autre part induisent des modifications dans la répartition quotidienne des flux de déplacements⁸². En particulier, une part des usagers peut être incitée à modifier ses horaires pour bénéficier de conditions de déplacement plus favorables (ce phénomène ne pouvant que s'accroître avec le développement des outils d'information en temps réel).

Lorsque le modèle intègre une grille de passage aux périodes horaires, cas général, les reports horaires se modélisent sous forme d'hypothèses sur les phénomènes d'étalement de la pointe, hypothèses largement empiriques. Nous avons également mentionné dans le chap. 3 § 6, les modèles de choix horaire développés par différents laboratoires (par exemple, Métropolis).

6. Récapitulation

Le tableau suivant présente les avantages et limites des différents types de construction de la demande future.

⁸² Les évolutions sont généralement lentes et il est difficile de les corréliser avec une évolution socio-économique particulière. Il est toutefois probable que la réduction du temps de travail a influé sur la répartition quotidienne ou, tout au moins, hebdomadaire des trafics routiers et TC.

Type de construction	Principe comportemental	Avantages	Limites
Réutilisation séquentielle du modèle à quatre étapes	Pérennité des lois de génération et de distribution	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Analyse des comportements et de l'évolution de la demande ▪ Intègre d'éventuelles modifications structurelles de l'offre ou des comportements 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Ne tient pas directement compte du calage de l'affectation ▪ Risque d'aboutir à une situation sans rapport direct avec la solution de référence, même à un horizon proche (5 ans par exemple) ▪ Difficulté de prévoir l'évolution des paramètres
Croissance et déformation de la matrice de référence calée	Évolution de la situation initiale	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Base de travail fiable, en particulier pour les problématiques liées à l'affectation ▪ Évolution « continue » de la demande ▪ Nécessite un nombre restreint de données 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Peut ne pas rendre compte d'une modification importante du système de transport ou des comportements. Ne permet pas d'analyser finement les évolutions de la demande
Combinaison des 2 méthodes	Évolution de la situation initiale en supposant pérennes les lois de génération et de distribution	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Avantages des 2 méthodes précédentes 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Plus lourde à mettre en œuvre

Tableau 25 Récapitulation des différentes méthodes de reconstitution des matrices en projection

7. Contrôles et validations

Les contrôles et validations des matrices aux horizons consistent essentiellement à vérifier, à l'achèvement du calcul, que les évolutions prévisibles depuis la situation de référence sont pertinentes et cohérentes avec les hypothèses de base.

Peuvent notamment servir de repère :

- les distances moyennes des déplacements par mode, par secteur géographique et, le cas échéant, par motif,
- les histogrammes des distances correspondants,
- les flux entre OD principales ou ensembles d'OD (un regroupement en macro-zones est généralement utile).

Par ailleurs, les premières affectations peuvent mettre en évidence des niveaux de saturation, globalement ou localement incompatibles avec les capacités des réseaux. Il convient alors de modifier les hypothèses de base du calcul, notamment du point de vue du développement urbain, et d'entreprendre la mise au point de nouvelles matrices avec, si nécessaire, de nouvelles hypothèses de développement de l'offre.

8. Pour en savoir plus

Le présent chapitre, comme le précédent, a été rédigé en particulier en référence à l'ouvrage *Modelling transport* [Ortúzar et al, 2001], auquel nous renvoyons le lecteur souhaitant en savoir plus, en particulier ses chapitres 4 et 5.

➤ **Prévisions à long terme du trafic automobile**

mai-89

Auteur : CREDOC JL. Madre / T. Lambert Éditeur : SETRA

L'objectif de cette étude était d'expliquer l'évolution de la circulation automobile sur une longue période et de la projeter à long terme, au niveau national ; deux approches ont été menées en parallèle : une approche démographique prenant en compte le vieillissement de la population et une approche économétrique, dans laquelle les principaux facteurs explicatifs identifiés sont la croissance du réseau autoroutier, le parc automobile, le revenu réel des ménages, le prix des carburants.

Chapitre 5. Choix modal

Mots clés :	
<u>Modèle désagrégé</u>	<i>Modèle décrivant le comportement des individus pris séparément, par opposition à un modèle agrégé où l'on décrit le comportement d'individus moyens représentatifs de zones géographiques.</i>
<u>Modèle de choix discret</u>	<i>Modèle permettant de déterminer la probabilité de réalisation des différentes alternatives envisageables (choix d'un mode, choix d'un mode et d'une destination), supposées en nombre fini, à partir de la description des caractéristiques des individus et des alternatives.</i>
<u>Fonction d'utilité</u>	<i>Fonction descriptive du comportement des individus, issue d'observations (enquêtes-ménages, enquêtes de préférences révélées ou déclarées), qui est souvent, mais pas nécessairement, une combinaison linéaire de variables descriptives de l'offre de transport, des individus et éventuellement de la destination du déplacement.</i>

1. Les bases de données

1.1 Détermination des parts de marché

Les parts de marché des divers modes sont évaluées à partir de plusieurs types d'enquêtes, indispensables mais assez lourdes à mettre en œuvre :

- enquêtes ménages, fournissant des matrices OD par mode, éventuellement par motif et par tranche horaire ; elles ne prennent cependant pas en compte l'ensemble des déplacements, en particulier les déplacements professionnels (*cf. chap. 3 § 1.3*) ;
- enquêtes de préférences révélées, souvent ciblées sur une liaison particulière, permettant d'expliquer le comportement actuel des individus en fonction de paramètres socio-économiques et du motif de déplacement d'une part, de paramètres descriptifs de l'offre d'autre part (temps, tarif, pénibilité...) ; les enquêtes ménages peuvent être considérées comme des enquêtes de préférences révélées à l'échelle de l'agglomération ;
- enquêtes de préférences déclarées, ayant pour but de déterminer le comportement futur des individus en fonction de paramètres individuels et des caractéristiques de l'offre de transport (analogues à ceux issus des enquêtes de préférences révélées), généralement réalisées et utilisées pour évaluer l'impact d'un nouveau mode de transport ;
- enquêtes dites « OD » des réseaux TC : c'est la source de données la plus précise en ce qui concerne les transports publics puisqu'elle permet de construire des matrices d'arrêt à arrêt ; en revanche, les origines et destinations ne correspondent pas aux zones homogènes utilisées dans les

enquêtes-ménages, mais seulement aux aires d'influence des arrêts de TC⁸³ (quelques centaines de mètres de rayon autour des arrêts), d'où des problèmes possibles de cohérence entre les zonages.

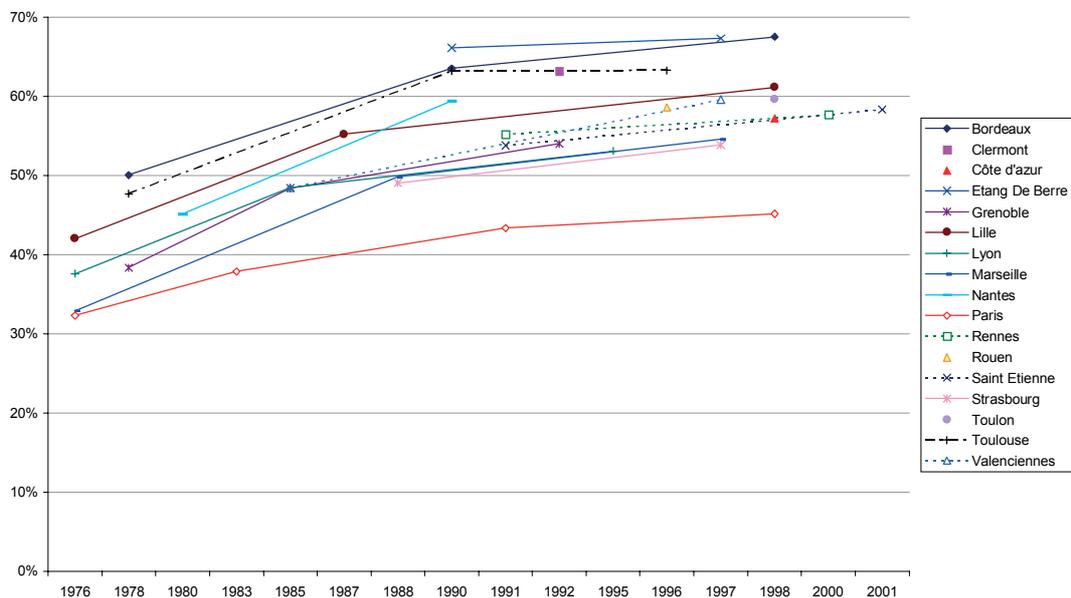


Figure 11. Part de marché VP (% des déplacements), agglomérations de plus de 300 000 habitants (Source : enquêtes ménages déplacements)

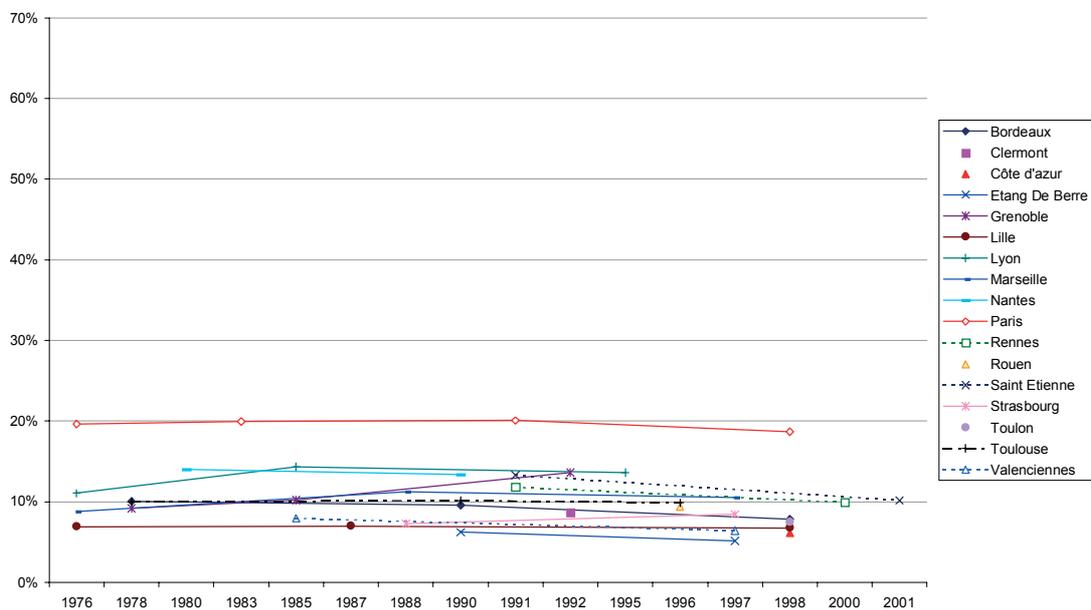


Figure 12. Part de marché TC (% des déplacements), agglomérations de plus de 300 000 habitants (Source : enquêtes ménages déplacements)

⁸³ environ 200 m pour les bus, 400 m pour un tramway, 600 m pour le métro, 800 à 1000 m pour un train

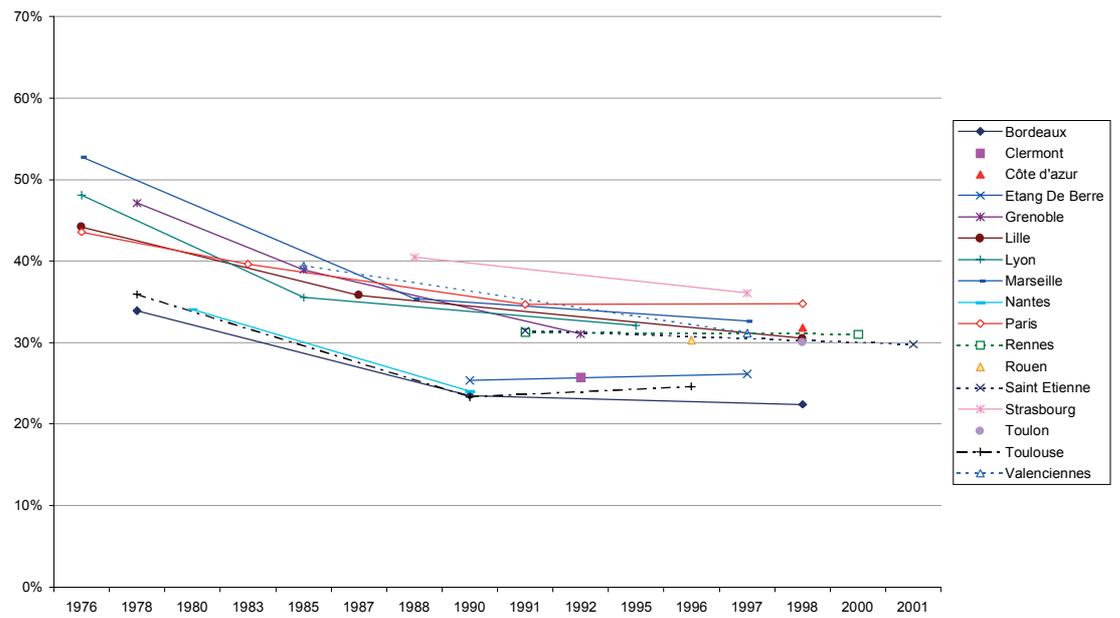


Figure 13. Part de marché des modes doux (vélo+marche) en % des déplacements, agglomérations de plus de 300 000 habitants (Source : enquêtes ménages déplacements)

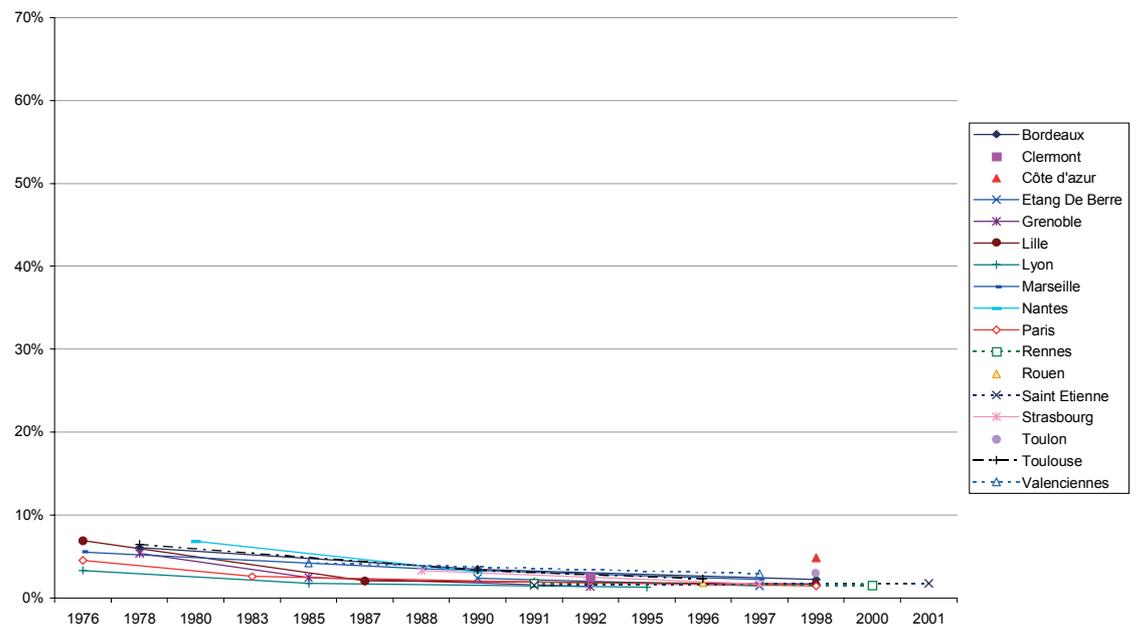


Figure 14. Part de marché autres modes (dont 2R motorisés), en % des déplacements, agglomération de plus de 300 000 habitants (Source : enquêtes ménages déplacements)

1.2 Définition des caractéristiques de l'offre et de la tarification

- (i) La description de l'offre existante (en temps, incluant les attentes et les ruptures de charges, et en coût) peut constituer une tâche complexe et en tout cas assez fastidieuse quand l'agglomération est importante ; sa précision est cependant nécessaire et importante pour expliquer correctement les comportements révélés ou prévisibles. Les modèles désagrégés (voir § 3.1), en particulier, exigent que l'on reconstitue pour chaque individu son univers de choix en matière d'offre de transport : il faut donc décrire à la fois les caractéristiques du déplacement qu'il a effectivement réalisé mais aussi celles des autres modes possibles ; le modèle désagrégé permet ensuite de comprendre les raisons du choix de l'individu.

L'utilisation de modèles d'affectation existant peut être utile, notamment pour évaluer les interactions entre modes. Nous donnons ici des indications pour accéder à ces données d'offre :

- offre TC existante : horaires (pour une ligne donnée), serveur Internet (donne à la fois le temps de parcours et les correspondances), modèle comprenant une description fine du réseau (sur TERESE, Davisum, Emme 2...);
- offre TC future : l'utilisation d'un modèle d'affectation comprenant une description fine du réseau est souvent utile ; en l'absence d'un tel modèle, l'évaluation de l'offre future peut-être évaluée « manuellement » ;
- offre VP existante et future : il est rare de disposer de mesures de temps de parcours à l'échelle d'une agglomération ; certains serveurs Internet (ex : Michelin) permettent d'élaborer des temps moyens (mais qui ne tiennent pas compte du niveau de congestion de la voirie) ; un modèle à contrainte de capacité, calé aux différentes tranches horaires, permet en revanche de générer une base de données de temps de parcours en situation actuelle et également en situation future (une démarche itérative entre le modèle de choix modal et l'affectation VP est souhaitable, de manière à déterminer les temps de parcours correspondant à la demande probable).

Les temps de parcours $t_{ij}(VP)$ et $t_{ij}(TC)$ étant variables selon la tranche horaire, il faut soit raisonner par type de période (pointe du matin, pointe du soir, heures creuses), soit estimer un temps de parcours moyen pondéré si l'on travaille directement à la journée.

- (ii) La tarification TC fait l'objet du chap. 7 § 2.2; celle du stationnement est abordée sommairement au § 4.3 : on retiendra qu'elle peut être éminemment variable (forfaitaire, décroissante avec la durée, croissante avec la durée...) notamment en fonction de la politique qu'elle est supposée favoriser. En ce qui concerne la circulation automobile, on peut distinguer :
- les péages d'infrastructure,
 - les péages de zone,
 - les péages forfaitaires (vignette)
 - les péages proportionnels (à la distance, au temps, etc.)
- Le coût du péage VP (et plus généralement le coût VP) est à répartir, de manière non forcément égale, entre le conducteur et ses passagers éventuels.

Quel que soit le domaine (TC, VP, stationnement), la tarification devient complexe à modéliser au niveau du choix modal dès lors qu'existent des formules d'abonnement⁸⁴, c'est-à-dire dans la quasi-totalité des cas ! Plusieurs solutions sont envisageables, mais toutes présentent des difficultés dès lors que l'on veut se projeter dans l'avenir.

Solution	Principe comportemental	Avantages	Limites
Estimer un tarif moyen	Notion de client moyen	Simplicité	Ne distingue pas les comportements des abonnés et des non abonnés
Scinder la clientèle entre abonnés et non abonnés	Stratification de la clientèle a priori	Permet de différencier les comportements	Difficulté de connaître la répartition géographique et l'évolution de la part des abonnés dans le futur
Scinder la clientèle par motifs supposés refléter la distinction abonnés / non abonnés	Le motif conditionne l'abonnement	Relativement simple à mettre en œuvre (le DT est généralement connu)	Risque de simplification abusive

Tableau 26 Récapitulation des différentes méthodes pour prendre en compte les abonnements

1.3 Données socio-économiques

Dans les cas d'un modèle désagrégé, il convient de vérifier que l'échantillonnage est représentatif de la population totale. Pour un modèle agrégé, il faut disposer de statistiques par zone. Or celles-ci peuvent être difficiles à connaître :

- la population peut être connue de façon fine (à l'échelle de l'îlot), y compris par tranche d'âge et par catégorie socioprofessionnelle (CSP)⁸⁵ ;
- en revanche, les données sur l'emploi fournies par l'INSEE sont rarement précises du point de vue de la localisation (peu de données à une échelle plus fine que la commune) ; des exploitations spécifiques de fichiers SIRENE ou de fichiers URSSAF peuvent fournir une précision supplémentaire ; les données d'emploi sont cependant rarement utilisées pour la détermination du choix modal, sauf pour les modèles conjoints mode/destination ;
- certains SIG permettent d'identifier les types d'habitat ;
- les revenus et les taux de motorisation ne sont pas connus statistiquement à une échelle plus fine que la commune ou l'arrondissement dans les grandes villes. Les enquêtes-ménages peuvent cependant fournir des indications intéressantes au niveau des quartiers, mais rarement fiables statistiquement.

⁸⁴ Pour les motifs non obligés certains modèles prennent en considération le fait que les voyageurs peuvent avoir un abonnement (du fait qu'ils effectuent par ailleurs des déplacements obligés avec un abonnement)

⁸⁵ L'INSEE doit fournir de plus en plus de données au niveau IRIS2000, ce qui permettra des zonages plus précis dans les grandes communes qui sont souvent urbaines, notamment à partir des recensements (ce qui serait plus précis et couvrirait un champ plus général que les enquêtes ménages).

2. Partitions de la demande

2.1 Les différentes segmentations

- (i) Le comportement des individus est difficilement explicable par une unique formulation qui s'appliquerait à tous et à chacun. Aussi est-il généralement nécessaire de segmenter la population et/ou les déplacements.
- (ii) Plusieurs types de segmentation sont possibles, notamment :
- par tranche horaire,
 - par motif,
 - par âge et/ou sexe,
 - par catégorie socioprofessionnelle (CSP),
 - par nationalité,
 - par secteur géographique,
 - en fonction de la disponibilité d'une voiture⁸⁶,
 - en fonction des possibilités de stationnement.

Toutefois, la disponibilité de l'information conditionne fortement les possibilités de stratification.

- (iii) Le § 2 du chapitre 3 décrit en détail les différents processus de partition de la demande et le lecteur s'y reportera utilement. Notons toutefois que, dans le cas du choix modal, la segmentation doit être recherchée dans le but d'expliquer des comportements individuels plutôt que dans celui de quantifier des masses de déplacements par grand type, ce qui peut conduire à utiliser des segmentations rarement utilisées dans les modèles classiques; ainsi, pour évaluer la part de marché d'un mode TC dédié à la desserte d'un aéroport, la nationalité ou le sens du voyage (aller ou retour) peuvent constituer des paramètres déterminants au même titre que le motif (affaires ou loisirs) : en effet, un étranger non résident dans le pays d'accueil disposera rarement d'une voiture personnelle, ou connaîtra moins bien qu'un autochtone les subtilités du réseau de TC local. Le secteur géographique (centre-ville, proche périphérie, banlieue éloignée), et en particulier la manière dont il est desservi par les TC, est également souvent un facteur très discriminant quant aux choix modaux, de même que le type d'urbanisation, par la forme des réseaux de transports qu'il implique et son influence sur le taux de motorisation (nombreux ménages multimotorisés en grande banlieue⁸⁷), ou encore le niveau de revenu de l'individu.

2.2 Définition des modes pris en compte

Entre quels modes le choix modal s'opère-t-il ?

- entre voiture particulière et transport en commun ?
- entre ces deux modes et les modes doux (vélo, marche, roller) ?
- entre la voiture et les différents TC possibles (bus, métro, tramway...)?

⁸⁶ La disponibilité de la voiture constitue souvent la meilleure segmentation pour modéliser le partage modal. Généralement, on en rend compte par le nombre d'automobiles dont dispose le ménage, mais on peut combiner cette information avec la disposition du permis de conduire (plus ou autant de permis que de voitures dans le ménage,...).

⁸⁷ Des travaux réalisés en Île-de-France montrent une forte décroissance du taux de motorisation quand la densité augmente.

- entre voiture conducteur, voiture passager et TC ?
- etc.

La réponse à cette question va structurer les modèles et les rendre plus ou moins complexes (voir la distinction entre logit multinomial et logit hiérarchique au § 3.2).

Il n'y a pas de règle générale, chaque cas pouvant être considéré comme spécifique; plusieurs facteurs nous paraissent devoir être pris en considération :

- l'objectif du modèle : s'agit-il d'estimer comment une politique en faveur des TC peut influencer sur la part de la voiture (auquel cas un modèle bi-mode VP/TC est probablement suffisant) ou d'évaluer le trafic (et éventuellement la recette) d'un projet particulier comme un nouveau TCSP ? Dans le deuxième cas, selon le modèle on pourra traiter le choix du sous-mode TC au niveau du choix modal ou de l'affectation. Plus les sous-modes TC sont concurrents, plus il sera nécessaire de les traiter au niveau du choix modal.
- l'importance relative des différents modes (si un mode ne capte que quelques pourcents de part de marché, il sera de toutes façons difficile de valider statistiquement le modèle),
- pour la distinction éventuelle entre plusieurs modes TC, il semble pertinent de distinguer le cas où un opérateur est gestionnaire de l'ensemble des modes TC (avec intégration tarifaire) et celui où les divers modes sont en concurrence avec des tarifs distincts (cas de la desserte d'un aéroport par le réseau ordinaire de TC et par des modes dédiés : navettes des compagnies aériennes, mode ferré rapide...).

3. Les familles de modèles existantes

3.1 Modèles agrégés / modèles désagrégés

Les modèles de choix modal sont souvent qualifiés d'agrégés ou de désagrégés ; il est donc important de bien comprendre la distinction entre les deux catégories, en soulignant bien au préalable qu'une même technique (ex : logit) peut être utilisée en agrégeant, c'est-à-dire en regroupant, plus ou moins les données disponibles. L'opposition agrégé/désagrégé concerne les données d'estimation et non les principes économiques des modèles : on parlera donc "d'estimation sur données agrégées" (ou zonales) ou sur "données désagrégées" (ou individuelles).

En France, la plupart des modèles (stratégiques ou utilisant des logiciels d'affectation) sont dits « agrégés » car ils sont basés sur des observations moyennes ou segmentées au niveau zonal. En revanche, les pays anglo-saxons et nordiques utilisent fréquemment la modélisation désagrégée et multimodale des comportements de déplacement.

Ces modèles désagrégés sont appliqués et calés directement à partir des observations des voyageurs individuels (caractéristiques socio-économiques et comportement spécifiques), les résultats étant ensuite pondérés de manière à produire une matrice représentant l'ensemble des déplacements. Toutefois, les projections aux horizons éloignés sont généralement réalisées à un niveau

agrégé car la répartition de la population et des comportements évolue avec le temps.

Le CERTU a consacré un ouvrage spécifique aux modèles désagrégés : « Comportements de déplacement en milieu urbain : les modèles de choix discrets, vers une approche désagrégée et multimodale » (CERTU, ADEME, Juin 1998). L'introduction de cet ouvrage résume ainsi la modélisation désagrégée :

« La modélisation désagrégée renvoie à la mesure du poids des variables intervenant dans le processus de décision des individus. Elle permet de comprendre leurs logiques de comportement de déplacement en matière de choix discret simple (mode de transport par exemple) ou combiné (choix de mode et de destination par exemple). La notion de choix discret renvoie donc à un ensemble d'alternatives dénombrables. Pour ce faire, on associe, à chaque alternative constituant l'ensemble étudié, une fonction d'utilité, qui dépendra essentiellement des caractéristiques des individus et des caractéristiques de l'alternative elle-même. Les résultats sont présentés sous forme de probabilité. Grâce à eux, on obtient le niveau de la demande de déplacements futurs (par mode si le choix concerne les modes), compte tenu des tests de politique de transport qui ont été effectués en faisant varier les composantes des fonctions d'utilité. Les modèles de ce type sont appelés modèles de choix discret, par analogie avec le terme anglo-saxon (Discrete Choice Model) ».

3.2 Modèles logit

3.2.1 Principes

- (i) A partir d'enquêtes (enquêtes-ménages, enquêtes de préférences révélées ou déclarées), on cherche à expliquer le comportement des individus à partir d'un certain nombre de critères socio-économiques d'une part, de critères descriptifs de l'offre de transport d'autre part ; on définit ainsi une utilité u_m , qui dépend à la fois du mode m , du trajet et des caractéristiques de l'individu ou du groupe d'individus⁸⁸. Un individu donné utilisera le mode dont l'utilité est la plus grande pour lui ; mais cette utilité comporte un terme aléatoire dû à divers facteurs (manque d'information, contraintes diverses...), qui explique des différences de comportement entre individus « semblables » et qui aboutit à évaluer un comportement probable (et non strictement déterminé). Au total, quand le terme aléatoire suit une loi de Gumbell, la probabilité p_m d'utiliser le mode m pour un trajet donné est égale à :

$$p_m = \frac{e^{u_m}}{\sum_k e^{u_k}}$$

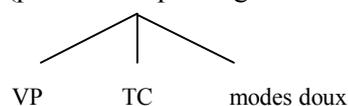
- (ii) Les modèles logit peuvent être segmentés par strates de population (CSP, motifs, type d'urbanisation...), éventuellement croisées avec un découpage géographique plus ou moins fin (voir § 2.1).
- (iii) Dans le cas d'un modèle agrégé, la part de marché du mode m est égale à la probabilité p_m .

⁸⁸ Ainsi que d'un terme aléatoire supposé suivre une loi de Gumbell

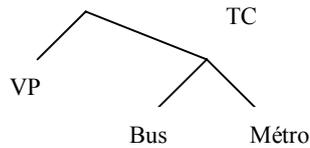
- (iv) Dans le cas d'un modèle désagrégé, la part de marché du mode m est égale à la somme des probabilités individuelles d'utiliser le mode m , dans la mesure où l'échantillon est supposé être représentatif de la population concernée. Si l'échantillon n'est pas parfaitement représentatif, il faut le redresser au préalable.
- (v) Une méthode grossière consiste à estimer une valeur moyenne pour chaque attribut des fonctions d'utilité, mais le biais est assez grand car la distribution des attributs n'est pas linéaire ; une approche plus fine consiste à découper la population en plusieurs tranches dont les attributs varieront.
- (vi) Le modèle logit suppose a priori que chacun peut choisir entre les différents modes. Or, ceci est faux puisqu'il y a des usagers captifs d'un mode (VP ou TC) dont il faut tenir compte :
 - soit en introduisant une variable de « captivité » dans les formules d'utilité,
 - soit en bornant la part de chaque mode,
 - soit en n'appliquant le modèle logit qu'aux seules personnes en situation de choix modal,
 - soit encore en utilisant un modèle dogit (cf. chap. 5 § 3.6.2).

3.2.2 Forme générale

- (i) Le postulat de base du modèle logit est l'indépendance des alternatives (les paramètres d'offre de chacun des modes ne sont pas liés à ceux des autres modes). Or, parmi les variables non explicitées, certaines peuvent être corrélées et cette indépendance est alors fictive.
- (ii) Une conséquence importante de l'indépendance supposée des alternatives est le paradoxe bus rouge / bus bleu : si on introduit un mode quasi identique à un mode existant (par exemple, une nouvelle ligne de bus ayant exactement les mêmes horaires qu'une ligne existante dont elle se distingue uniquement par la couleur), la part de marché de l'ensemble des modes concurrents diminuera au profit des bus : s'il y a initialement concurrence entre VP et bus et si l'utilité de ces deux modes est identique, on aura au départ une répartition $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{2}$ et à la mise en place de la nouvelle ligne une répartition $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{3}$, $\frac{1}{3}$ au lieu de $\frac{1}{2}$, $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{4}$. Cet inconvénient peut être pallié en partie grâce à l'utilisation d'un modèle hiérarchique.
- (iii) Il existe en effet deux grandes familles de modèles logit :
 - multinomial,
 - hiérarchique.
- (iv) Le modèle logit multinomial met l'ensemble des modes sur le même plan et il les suppose donc indépendants ; il en résulte que la probabilité relative reste constante si l'on introduit ensuite un mode nouveau, celui-ci prenant du trafic uniformément aux autres modes (pour un couple origine-destination donné).



- (v) Le modèle logit hiérarchique a pour objectif de reconstituer l'ordre de choix des individus, lorsque deux modes sont proches (et non strictement indépendants) ; par exemple, on choisira d'abord entre VP et TC, et ensuite entre bus et métro.



3.2.3 Expression des fonctions d'utilité

- (i) Le tableau suivant donne une liste de variables possibles pour un modèle désagrégé (les variables d'individus peuvent également servir à définir des strates de population pour un modèle agrégé) :

Variables d'offre ⁸⁹	Variables individuelles
Temps de parcours total	Coût de transport total divisé par le revenu du ménage de l'individu
Temps de parcours à bord	Kilométrage annuel divisé par le revenu du ménage de l'individu
Temps d'accès à pied	Revenu du ménage
Distance d'accès à pied	Nombre d'automobiles dans le ménage
Temps d'attente	Taille du ménage
Temps de correspondance	Nombre de détenteurs de permis de conduire dans le ménage
Nombre de correspondances	Sexe
Coût de transport total	Age
	Motif du déplacement
	Densité d'emplois au lieu de travail
	Type d'habitat

Tableau 27 Exemple de variables utilisé dans les fonctions d'utilité d'un modèle logit

- (ii) L'utilité est en général définie comme une combinaison linéaire des divers paramètres ; par exemple :

▪ **dans le cas d'un modèle agrégé :**

$$u_{ij}(Mode) = \alpha t_{ij}(Mode) + \beta C_{ij}(Mode) + \gamma(Mode) + \varepsilon_{ij}(Mode)$$

t_{ij} = temps de parcours pour le couple OD (i, j)

C_{ij} = coût pour le couple OD (i, j)

γ = constante modale du mode, qui permet de prendre en compte les paramètres non décrits explicitement (ici les paramètres autres que le temps et le coût), comme les avantages-inconvénients en terme d'image, de confort, de sécurité, etc. Le modèle étant défini à une constante près, on fixe une des constantes modales à 0.

⁸⁹ Chaque variable peut également être prise sous forme de logarithme ou par une transformée de Boc-Cox, ou encore stratifiée (par exemple temps supérieur et inférieur à 20 minutes)

ε_{ij} = variable aléatoire des erreurs, supposée distribuée suivant une loi de Gumbell

Pour une strate donnée, les coefficients α et β peuvent être soit constants, soit fonction du mode. Le rapport β/α donne la valeur du temps (éventuellement fonction du mode).

▪ **dans le cas d'un modèle désagrégé :**

$$u(\text{Mode}, \text{Individu}) = \sum_k \alpha_k O_k(\text{Mode}) + \sum_n \beta_n I_n(\text{Individu}) + \varepsilon(\text{Mode}, \text{Individu})$$

où $O_k(\text{Mode})$ sont les différentes variables décrivant l'offre de transport (temps, coûts, ...),

$I_n(\text{Individu})$ sont les différentes variables permettant de décrire l'individu (revenu, type d'habitat, âge, ...)

$\varepsilon(\text{Mode}, \text{Individu})$ est une variable aléatoire des erreurs, supposée distribuée suivant une loi de Gumbell

- (iii) L'utilité peut également être une fonction non-linéaire, parfois plus appropriée. On utilise alors une transformation de Box-Cox (ou Box-Tukey), qui permet de caler un paramètre supplémentaire prenant en compte une éventuelle non linéarité de la variable (par exemple, la sensibilité à la distance décroît avec la distance).
- (iv) Le modèle hiérarchique est lui aussi constitué à partir d'une formulation non-linéaire de l'utilité, en faisant intervenir une utilité composite u pour l'ensemble des modes i situés à un même niveau :

$$u = \theta \text{Log} \left(\sum_i e^{u_i} \right)$$

avec $\theta \in [0,1]$ (si $\theta = 1$, le modèle hiérarchique est équivalent au modèle multinomial).

3.2.4 Mise en œuvre pratique

- (i) Il existe plusieurs logiciels spécifiques au transport permettant de caler ce type de modélisation, parmi lesquels Alogit (HCG), Hielow (STRATEC), Trio (Université de Montréal).
- (ii) Le calage des formules d'utilité est généralement basé sur la méthode dite du maximum de vraisemblance V_r , défini par :

$$\log(V_r) = \sum_i \sum_m \log p_{i,m} \times \lambda_m$$

où $p_{i,m}$ est la probabilité pour l'individu i de choisir le mode m .

$\lambda_m = 1$ si m est effectivement choisi, 0 sinon

Il est cependant possible de caler les différences de fonction d'utilité avec une simple régression linéaire, en passant par les logarithmes, en cas de modèle bi-mode, comme l'indique Modelling Transport [Ortúzar et Williamsen, 2001].

- (iii) Le choix de la stratification dépend à la fois d'une démarche logique (les différentes strates sélectionnées doivent refléter des comportements effectivement différents révélés par les enquêtes) et de la disponibilité de l'information (il en va ainsi par exemple du découpage éventuel en tranches horaires, en motifs, par sexe, ainsi que de la finesse du zonage géographique). La plus ou moins grande sophistication du modèle conditionne aussi les délais de mise en œuvre et peut s'avérer inutile si l'échantillon statistique est insuffisant ou si les paramètres descriptifs sont difficilement prédictibles.
- (iv) Il convient de vérifier la logique de la formule d'utilité notamment par le signe affecté aux différents paramètres (l'utilité d'un mode diminue quand le coût augmente, s'accroît quand le temps de parcours se réduit, etc.). La qualité de l'ajustement est également donnée par différents indicateurs statistiques tels que le ρ^2 (pseudo- R^2)⁹⁰ et le test du chi-2, qui permettent d'apprécier la qualité globale du modèle, et le T de Student, relatif à chaque coefficient, qui permet d'estimer la pertinence du paramètre (le T de Student doit être supérieur à 1,96 en valeur absolue pour affirmer à 95% que le coefficient est non nul). Toutefois, les indicateurs statistiques permettent seulement de vérifier que le modèle n'est pas faux.

"Modelling Transport" résume ainsi la procédure de choix d'une variable :

Signe du coefficient	Test t de Student	Variable	
		incluse dans la politique à tester	autre
signe correct	significatif	à retenir	à retenir
	non significatif	à retenir	peut être rejetée
signe non correct	significatif	problème important ⁹¹	à rejeter
	non significatif	problème	à rejeter

Tableau 28 Procédure de choix des variables explicatives dans un modèle désagrégé

- (v) La statistique du L (log de vraisemblance) permet de comparer deux spécifications différentes des fonctions d'utilité. En procédant pas à pas par ajout de variable, on peut ainsi retenir le "meilleur" modèle et tester si l'introduction d'une variable supplémentaire est utile. Toutefois, on ne peut pas comparer à l'aide d'indicateurs statistiques un modèle multinomial à un modèle hiérarchique.
- (vi) Il est également important de vérifier que les constantes modales obtenues (généralement on prend 0 pour un mode donné et les autres se déduisent du calage) ne sont pas excessivement fortes ou faibles. Dans ce cas qui correspond à un bonus ou à un malus du mode reflétant les avantages ou inconvénients du mode non explicités par les paramètres d'utilité introduits dans le modèle, on peut aboutir à une stabilité (ou instabilité) excessive du modèle.

⁹⁰ Le ρ^2 issu d'une procédure de maximum de vraisemblance est en général nettement plus faible que le r^2 d'une régression linéaire classique

⁹¹ Le cas d'un signe incorrect sur une variable clé (comme le temps de parcours) n'est pas seulement théorique. Il peut s'agir alors d'un problème de cohérence d'ensemble du modèle (variable corrélée, hiérarchie, ...), de mauvaise qualité des données observées ou d'une mauvaise reconstitution des données sur l'univers de choix des individus.

- (vii) Enfin rappelons que, comme pour une régression linéaire classique, les variables explicatives ne doivent pas être corrélées entre elles, sous peine de rendre très instables la procédure de calage.

3.3 Courbes de partage modal

- (i) Une façon parlante de présenter la répartition entre deux modes (typiquement VP et TC) consiste à établir une courbe de partage modal en fonction de la différence ou du rapport des temps et/ou des coûts de transport (éventuellement généralisés) de chacun des deux modes.
- (ii) Ce type de courbe peut être obtenu d'au moins trois manières :
- directement à partir de l'observation des déplacements,
 - comme résultat d'un modèle logit agrégé dont les fonctions d'utilité dépendent des temps ou des coûts
 - déduites, par régression, d'une répartition constatée : on recherche alors les coefficients A, B et α d'une fonction du type :

$$\% \text{ d'usagers TC} = [A + B \exp (-\alpha (C - C_0))] / [1 + \exp (-\alpha (C - C_0))]$$

où C est une fonction des temps ou coûts VP et TC

A et B, compris entre 0 et 1, sont les parts de captifs VP et TC

$\alpha > 0$

C_0 est la valeur centre ($\% \text{ TC} = (A+B)/2$ si $C = C_0$)

- (iii) Ainsi, la Direction Régionale de l'Équipement d'Île de France utilise un jeu de courbes en S (variable selon la croisement type de liaison x CSP), avec deux asymptotes, pour évaluer la répartition VP/TC en fonction de la différence relative sur le temps de parcours entre les deux modes. Les asymptotes correspondent aux parts de captifs respectives de chacun des deux modes :

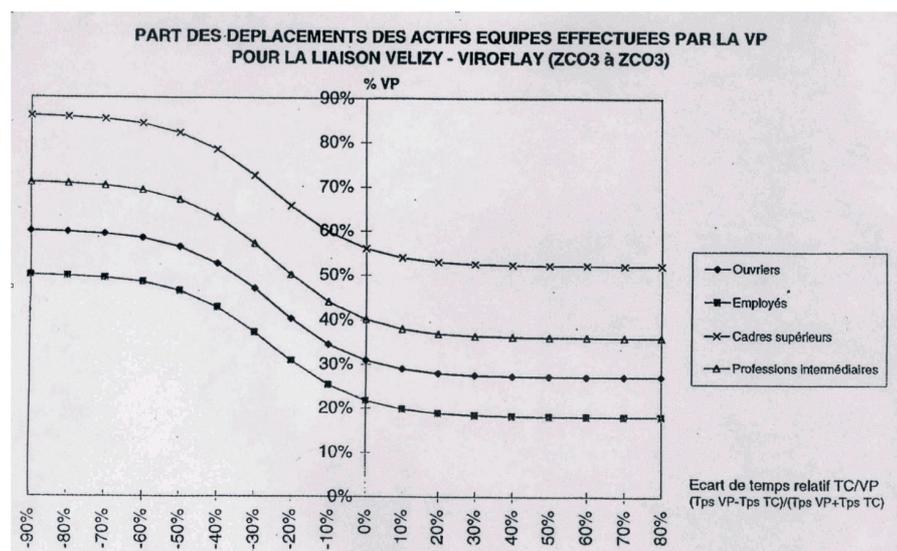


Figure 15. Exemple de courbes de partage modal
(Source : DREIF)

- (iv) Ce type de courbe a le mérite de la simplicité. Le risque est que l'écart de temps ou de coût généralisé ne soit pas le seul facteur explicatif des choix modaux, du moins sur une tranche horaire donnée.

A titre d'exemple, la SETEC a pu caler simultanément un modèle VP et un modèle TC sur une grande agglomération de province ; les matrices (HPM) étaient issues d'enquête-ménages et d'enquêtes OD embarqués et le calage en débit, en vitesse, en flux OD, en taux de correspondance pour les TC, était bon. Les recherches de régression des courbes de partage modal sont restées infructueuses. Ce constat n'a pas varié malgré l'élimination des valeurs non significatives (petits nombres de déplacements) et malgré de nombreuses tentatives pour classer les déplacements en catégories homogènes (typologies par catégories socio-professionnelles, par liaison géographique, par la qualité de l'offre TC, par le style d'habitat... ces critères ayant également été croisés). Plusieurs phénomènes peuvent être invoqués pour comprendre cet insuccès : les générateurs particuliers compliquent l'analyse (gare, lycée, entreprise offrant ou non le stationnement à ses employés...); une autre explication possible est imputable à la spécificité de l'heure de pointe du matin : une zone peut compter 75% de captifs TC (nombreuses personnes âgées) et émettre 40% de déplacements VP entre 7h et 8h (les travailleurs).

3.4 Grilles de partage modal

- (i) Dans le même esprit, on peut utiliser des grilles de partage modal, constituées d'un tableau croisé où est estimée la part des TC en fonction :
- de la chaîne modale d'une part (métro direct, métro/métro, métro/métro/métro, bus direct selon la distance, bus/métro, etc.)
 - du type de relation d'autre part (vers l'hypercentre, entre communes périphériques, interne à une commune périphérique, etc...).

Ces grilles sont issues de l'analyse réelle de la répartition modale telle qu'elle est mesurée à un moment donné par une enquête.

- (ii) La typologie des zones peut dépendre de différentes sortes de critères :
- socio-économiques (catégories socioprofessionnelles, taille des ménages, répartition par âge...)
 - géographiques et urbains (centre/périphérie ; habitat individuel/collectif ; habitat social/résidentiel...)
 - liés à l'offre de transport (desserte TC, contraintes de stationnement...).
- La recherche de cette typologie est largement empirique.

- (iii) Les grilles peuvent être établies soit globalement, soit par motif, en fonction notamment de la précision des données d'enquêtes disponibles.

- (iv) Les tableaux suivants donnent les valeurs représentatives des mobilités et des parts de marché par mode dans les agglomérations françaises :

Déplacements par jour et par personne	Marche	Vélo	TCU	Autres TC	2R motorisé	VP conduct	VP passager	Autres	Total motorisé	Total
min (1990-2001)	0,42	0,01	0,05	0,03	0,02	1,05	0,32	0,01	2,07	2,91
médiane (1990-2001)	0,98	0,06	0,24	0,06	0,04	1,55	0,52	0,03	2,47	3,52
max (1990-2001)	1,25	0,26	0,60	0,24	0,14	2,10	0,66	0,06	2,92	4,19
min (1976-1989)	0,66	0,01	0,02	0,02	0,03	0,77	0,24	0,01	1,50	2,27
médiane (1976-1989)	1,19	0,11	0,27	0,05	0,11	1,09	0,37	0,03	1,92	3,26
max (1976-1989)	1,79	0,35	0,59	0,15	0,27	1,56	0,55	0,25	2,59	4,14

Tableau 29 Valeurs représentatives des mobilités par mode dans les agglomérations françaises

(Source : Enquêtes ménages déplacements. Voir en annexe pour plus de détails)

	1990-2001				1976-1989			
	% VP	% TC	% Doux	% autres	% VP	% TC	% Doux	% autres
min	43,4%	4,1%	13,6%	1,2%	32,3%	2,3%	25,5%	1,7%
médiane	59,5%	9,4%	30,2%	2,3%	48,4%	10,0%	39,0%	4,2%
max.	79,3%	20,1%	36,1%	4,8%	64,0%	19,9%	52,8%	11,3%

Tableau 30 Valeurs représentatives des parts de marché par mode dans les agglomérations françaises

(Source. Enquêtes ménages déplacements. Voir en annexe pour plus de détails)

- (v) L'exemple ci-après montre la typologie retenue à Lyon par l'exploitant, ou apparaît notamment l'importance des correspondances sur la part des TC.

PART DE MARCHÉ TCL/ TYPE D'OFFRE ET FLUX

	FLUX VERS PRESQU'ILE	FLUX VERS MG/PART DIEU	INTER COMMUNE	INTERNE
Métro direct M1	50 - 60	40 - 50		15 - 25
Métro/Métro M2	40 - 50	30 - 40		10 - 20
Métro/Métro Métro M3	30 - 40	20 - 30	15 - 25	
Axe Vert direct A1	45 - 55	35 - 45	25 - 40	10 - 20
Axe Vert/AV A2	35 - 45	25 - 35	20 - 35	5 - 15
Axe Vert/AV/AV A3	25 - 35	15 - 25	10 - 25	
Bus direct B1 (< 5 km) B2 (5 à 10 km) B3 (> 10 km)	40 - 50 35 - 45 25 - 35	30 - 40 25 - 35 15 - 25	20 - 30 15 - 25 10 - 20	10 - 15
Bus / Bus BB1 (< 5 km) BB2 (5 à 10 km) BB3 (> 10 km)	30 - 40 25 - 35 15 - 25	20 - 30 15 - 25 5 - 15	10 - 20 5 - 15 0 - 10	5 - 10
Bus / Métro B1M (< 5 km) B2M(5 à 10 km) B3M (> 10 km)	40 - 50 35 - 45 25 - 35	30 - 40 25 - 35 15 - 25	20 - 30 15 - 25 10 - 20	5 - 10
Bus/Métro/métro B1MM (< 5 km) B2MM (5 à 10 km) B3MM (> 10 km)	30 - 40 25 - 35 15 - 25	25 - 35 20 - 30 10 - 20	10 - 20 5 - 15 0 - 10	
Bus / Axe Vert B1 A1 (< 5 km) B2 A1 (5 à 10 km) B3 A1 (> 10 km)	35 - 45 30 - 40 20 - 30	25 - 35 20 - 30 10 - 20	15 - 25 10 - 20 5 - 15	5 - 10
Bus /AV /AV B1 A2 (< 5 km) B2 A2 (5 à 10 km) B3 A2 (> 10 km)	25 - 35 20 - 30 10 - 20	20 - 30 15 - 25 5 - 15	5 - 15 0 - 10 0 - 5	

En gras : Chiffres observés
En maigre : Hypothèses de travail

T.C.L
OCTOBRE 1991

Tableau 31 Exemple de grille de partage modal
(Source : TCL)

3.5 Modèles prix - temps

3.5.1 Principes

(i) Les modèles prix-temps agrégés, plus souvent utilisés en interurbain qu'en urbain, reposent sur le postulat que pour une OD donnée, le choix entre deux modes se fera en fonction du coût généralisé de chacun des modes, chaque usager choisissant le mode le moins coûteux pour lui ; ce type de modèle suppose à juste titre que les valeurs du temps sont distribuées au sein de la population et que la valeur du temps d'un individu donné est indépendante du mode qu'il choisit, cette dernière hypothèse étant plus discutable.

(ii) L'expression du coût généralisé pour chaque mode est en général :

$$\bullet \quad C_g(\text{VP})_{ij} = V_t \times t_{ij}(\text{VP}) + V_d \times d_{ij} + P_{ij} - B_{ij}$$

- où
- V_t = valeur du temps
 - $t_{ij}(\text{VP})$ = temps de parcours en VP sur l'OD ij
 - V_d = coût kilométrique marginal (essentiellement l'essence)
 - d_{ij} = distance ij
 - P_{ij} = somme des péages éventuels (autoroutes, parkings,...)
 - B_{ij} = bonus/malus éventuels (confort, sécurité ou au contraire désagrément de la route, alors affecté d'un signe négatif)

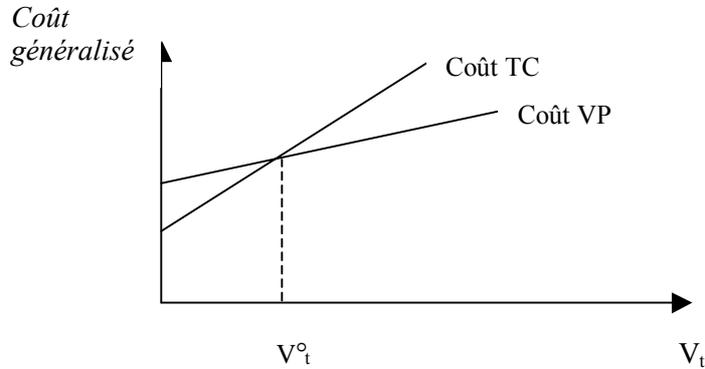
$$\bullet \quad C_g(\text{TC})_{ij} = V_t \times t_{ij}(\text{TC}) + T_{ij} - B_{ij}$$

- où
- V_t = valeur du temps
 - $t_{ij}(\text{TC})$ = temps de parcours généralisé en TC, incluant avec d'éventuels coefficients de pénalité (déterminés par le calage du modèle), les temps d'accès en marche à pied, les temps d'attente et de correspondance, le temps de circulation dans le véhicule
 - T_{ij} = tarif des TC
 - B_{ij} = bonus/malus éventuels (confort, sécurité ou au contraire désagrément du transport en commun, alors affecté d'un signe négatif)

(iii) La distribution de la valeur du temps est en général une loi log-normale, caractérisée par sa médiane m et son écart-type σ . La forme de cette distribution est calquée sur celle des revenus ; toutefois, d'après les enquêtes disponibles, il semble bien que sa répartition soit plus étalée que celle des revenus (*voir chap. 6 § 2.2*). La fonction valeur du temps peut être unique pour l'ensemble de la population (dans ce cas, sa variabilité est grande) ou différenciée par motif de déplacement.

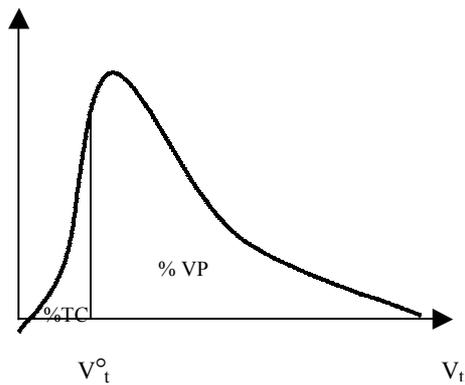
(iv) Les étapes du calcul sont les suivantes :

- on calcule la valeur du temps V_t^0 dite d'indifférence pour laquelle les coûts VP et TC sont égaux :

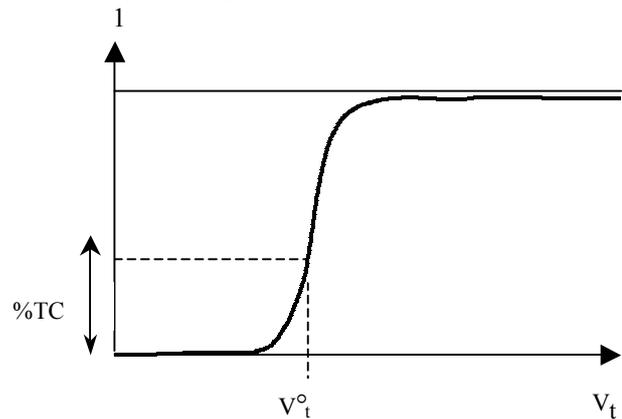


- la valeur du temps n'étant pas uniforme, les usagers des V_t sont ceux dont la valeur du temps est supérieure à V_t^0

f, fonction de densité de la valeur du temps



F, fonction de répartition du trafic



3.5.2 Mise en œuvre pratique, calage

- Les parts modales étant connues, les paramètres d'ajustement du modèle sont essentiellement les paramètres définissant la valeur du temps (médiane et écart-type dans le cas d'une loi log-normale), les coefficients de pénalité des diverses composantes du temps généralisé TC, et le bonus éventuel (celui-ci pouvant être négatif, c'est-à-dire un malus).
- Le calage sur les paramètres m et σ est réalisé par régression linéaire sur les transformées des parts de marché (transformation de Laplace-Gauss). Les tableaux permettent ce type de calcul (fonction statistique "loi.normale.standard.inverse").

3.6 Autres modèles

3.6.1 Modèle de choix discret à coefficient variable (ou d'utilité aléatoire à coefficient distribué)

Il est possible d'introduire un coefficient variable dans une formule d'utilité de manière à décrire la distribution statistique d'un paramètre (c'est typiquement le cas de la perception de la valeur du temps). Ainsi, pour l'évaluation de la valeur du temps à Marseille à partir des comportements révélés vis-à-vis du tunnel à péage du Prado-Carénage, les auteurs de l'étude⁹² ont testé un modèle dit « mixed-logit » ou « prix-temps + logit », où le coefficient de la variable temps dans la fonction d'utilité du modèle suit une loi log-normale. Ce type de modèle semble cependant poser des problèmes d'ordre statistique pour déterminer la partie aléatoire et la partie liée à la valeur du temps.

3.6.2 Modèle PROBIT multinomial

Dans son principe, ce type de modèle est peu différent du modèle logit multinomial décrit au § 3.2 : au lieu de considérer que le terme aléatoire de l'utilité est distribué selon une loi de Gumbell (ce qui permet d'exprimer de manière explicite les parts de marchés comme une fonction des utilités), on suppose dans le modèle probit que les termes aléatoires de l'utilité sont distribués selon une loi normale et on abandonne les hypothèses restrictives du modèle logit (uniformité de l'écart type des résidus, indépendance des alternatives). Le modèle Probit permet donc de lever le paradoxe bus bleu/bus rouge, supprimant ainsi la notion de modèle hiérarchique.

Mais, cette hypothèse sur la forme du terme aléatoire de l'utilité compliquant singulièrement les calculs, l'utilisation d'un modèle Probit est très peu répandue et n'est pas proposée dans les logiciels classiques de planification.

3.6.3 Modèle DOGIT

Ce type de modèle permet de prendre en compte les clientèles captives d'un mode. Il revient à réserver des captivités, donc à segmenter la demande en plusieurs classes « Ayant le choix » et « Captifs ». Le principal avantage d'un traitement intégré, en définissant un modèle Dogit, est de faire varier selon le couple origine-destination les proportions respectives des classes, de les modéliser et de les estimer.

La probabilité qu'un individu i utilise le mode t est donnée par la formule :

$$p_{it} = [\exp(u_{it}) + Q_t \sum \exp(u_{jt})] / \{[1 + \sum Q_t] * [\sum \exp(u_{jt})]\} \text{ avec } Q_t \geq 0, Q_t \text{ étant un paramètre permettant de retrouver la part de captifs du mode } t, \text{ qui est supposée égale à } Q_t / [1 + \sum Q_t]$$

ce qui peut se formuler :

$$p_{it} = p0_{it} + (1 - \sum p0_{it}) \text{ (part modale logit)}$$

où

⁹² « Comportement des automobilistes face au péage urbain : l'expérience du tunnel Prado-Carénage », CERTU, février 1999

$p_{0it} = Q_t / [1 + \sum Q_i]$ représente la part modale minimale du mode i pour l'individu t , c'est-à-dire la probabilité que l'individu i soit captif du mode t

et

$(1 - \sum p_{0it}) = \sum Q_t / [1 + \sum Q_i]$ représente la probabilité que l'individu soit libre de son choix

Si pour tous les individus et pour tous les modes, $Q_i=0$, on retombe sur un modèle logit.

3.6.4 Modèle conjoint distribution / choix modal

Il est possible de construire un modèle désagrégé fournissant en même temps le choix du mode et la destination, au lieu d'établir successivement un modèle de distribution et un modèle de choix modal. L'ouvrage du CERTU déjà cité supra (au § 3.1) en donne un exemple.

La procédure est du type logit hiérarchique désagrégé : à partir d'enquêtes, on recherche des fonctions d'utilité intégrant, outre les variables descriptives de l'offre et de l'individu (voir § 3.2), des variables (dites de taille) reflétant l'attractivité des différentes zones (population, emploi, commerces et équipements, etc.).

On obtient alors, non pas la simple probabilité d'utiliser un mode, mais la probabilité d'utiliser un mode pour une destination donnée. Faute de données suffisamment précises, on segmente en général le type de destination en : déplacements intrazone, déplacements dans les zones voisines, déplacements en centre-ville et autres déplacements.

L'intérêt de cette méthode est qu'elle permet d'analyser les changements de destination liés à la modification de l'offre d'un mode. Dans le cas d'un modèle désagrégé et si l'on souhaite avoir des éléments sur la redistribution des déplacements, lors de la modification d'une offre, on recommande en général de faire un modèle conjoint distribution/choix modal pour les motifs non obligés (autres que travail et études), ce qui représente mieux la souplesse d'adaptation à court terme de la demande (faire ses achats en centre-ville en TC ou en banlieue en voiture).

3.7 Contraintes techniques et financières / critères de choix

- (i) Dans tous les cas de figure, deux éléments sont absolument indispensables pour déterminer le choix modal :
 - une enquête permettant d'expliquer le choix modal des individus⁹³ (modèle désagrégé) ou donnant directement la part de marché des différents modes selon la période de la journée, le type de relation géographique (OD par OD ou, à défaut, au moins par grands courants pour essayer de définir une grille de partage modal : centre-périphérie, centre-centre, périphérie-périphérie)
 - la description de l'offre de transport au moins par grands courants et pour le mode TC.

⁹³ Un modèle désagrégé exige des données permettant d'élaborer les parts de marché

- (ii) L'approche la plus rapide, évidemment relativement grossière, consiste alors à utiliser ou, à défaut d'une grille existante, à créer une grille de partage modal (souvent binaire : VP/TC), déduite d'une analyse comparative part de marché TC/offre TC, ce qui suppose implicitement que la qualité de l'offre VP n'entre pas en ligne de compte, autrement que par la segmentation hypercentre, centre, etc.

- (iii) Des modélisations plus sophistiquées nécessitent à la fois des données plus précises (nécessairement des temps de parcours VP) et plus de temps ; le délai nécessaire augmentera généralement avec le niveau de désagrégation du modèle.

3.8 Récapitulation des différents modèles

Le tableau de la page suivante récapitule les principaux avantages et limites des modèles décrits précédemment.

Type de modèle	Principe comportemental	Avantages	Limites	
Agrégé	Logit multinomial	<ul style="list-style-type: none"> - Les usagers, classés en groupes homogènes, comparent l'utilité de chacun des modes possibles, avec un facteur aléatoire 	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de prendre en compte divers paramètres tout en utilisant des données d'entrée relativement simples - Permet d'évaluer un nouveau mode 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite des enquêtes assez fines avec de gros échantillons - Néglige un certain nombre de paramètres explicatifs - Nécessite des précautions (bornes, segmentation) pour traiter des captifs - Paradoxe bus bleu/bus rouge
	Logit hiérarchique	<ul style="list-style-type: none"> - Idem, mais en plusieurs temps : une première comparaison est effectuée, puis une ou plusieurs autre(s) 	<ul style="list-style-type: none"> - Idem logit multinomial - Reflète bien le processus de choix - Permet de limiter le paradoxe bus bleu/bus rouge 	<ul style="list-style-type: none"> - Relativement complexe à mettre en œuvre - Captifs : idem logit multinomial
	Courbe	<ul style="list-style-type: none"> - Les usagers se décident de manière déterministe et uniquement en fonction du coût et du temps 	<ul style="list-style-type: none"> - Simplicité d'utilisation 	<ul style="list-style-type: none"> - Suppose temps et coûts comme seuls facteurs explicatifs - Processus d'élaboration du choix modal masqué
	Grille	<ul style="list-style-type: none"> - Les parts de marché des différents modes sont évaluées à partir de ce qui a été constaté en fonction des chaînes modales et du type de relation OD 	<ul style="list-style-type: none"> - Simplicité d'utilisation - Pertinent dans le cas de modifications ponctuelles du réseau 	<ul style="list-style-type: none"> - Assez grossier - Processus d'élaboration du choix modal masqué - Ne permet pas l'évaluation d'un mode nouveau
	Prix-temps	<ul style="list-style-type: none"> - Les usagers se répartissent sur les différents modes en fonction de la valeur du temps qu'ils attribuent au temps de parcours par rapport au coût 	<ul style="list-style-type: none"> - Prend en compte la distribution de la valeur du temps 	<ul style="list-style-type: none"> - Suppose temps et coûts (éventuellement généralisés) comme seuls facteurs explicatifs - Suppose une valeur du temps identique pour VP et TC
	Logit + prix-temps	<ul style="list-style-type: none"> - Prend en compte à la fois la notion d'utilité avec un terme aléatoire et la distribution de la valeur du temps 	<ul style="list-style-type: none"> - Intègre dans le modèle logit la distribution de la valeur du temps 	<ul style="list-style-type: none"> - Relativement complexe à mettre en œuvre - Difficulté de distinguer la paramètre aléatoire du logit et la distribution statistique de la valeur du temps
	Probit	<ul style="list-style-type: none"> - Proche du logit 	<ul style="list-style-type: none"> - Idem logit multinomial 	<ul style="list-style-type: none"> - Complexe mathématiquement
	Dogit	<ul style="list-style-type: none"> - Proche du logit, mais les usagers captifs d'un mode n'ont pas le même choix 	<ul style="list-style-type: none"> - Permet de prendre en compte les captifs 	<ul style="list-style-type: none"> - Complexe mathématiquement
Désagrégé	Logit multinomial	<ul style="list-style-type: none"> - Chaque usager, pris individuellement, compare l'utilité de chacun des modes possibles avec un facteur aléatoire 	<ul style="list-style-type: none"> - Cadre théorique et méthodes robustes - Très intéressant pour analyser finement les comportements, et déterminer les paramètres explicatifs 	<ul style="list-style-type: none"> - Ne nécessite pas des échantillons très importants - Difficultés d'accès aux données (nombreuses variables dont il est parfois difficile de prévoir l'évolution) - Complexité et fiabilité incertaine des enquêtes servant de base à la modélisation
	Logit hiérarchique	<ul style="list-style-type: none"> - Idem, mais en plusieurs temps 		
	Conjoint distribution/choix modal	<ul style="list-style-type: none"> - L'utilisateur, pris individuellement, choisit à la fois son mode et son lieu de destination 	<ul style="list-style-type: none"> - Utile pour tester des politiques de transport en particulier à court et moyen terme 	

Tableau 32 Récapitulation des différents modèles de choix modal.

3.9 L'utilisation des modèles en projection

L'utilisation des modèles agrégés en projection se fait de manière intuitive en modifiant les variables caractéristiques des modes et éventuellement en modifiant les paramètres si l'on pense qu'il n'y a pas stabilité de ceux-ci dans le temps.

L'utilisation en projection des modèles désagrégés est en revanche moins évidente. On distingue trois méthodes (d'après [A Self-Instructing Course in Disaggregate Mode Choice Modeling]) classées par ordre croissant de complexité et de précision.

(i) la méthode « naïve »

La méthode « naïve » consiste à prendre sur chaque zone la moyenne des valeurs des différentes variables à l'horizon futur et d'appliquer le modèle basé sur les fonctions d'utilité ainsi construites de zone à zone. Cette méthode donne des résultats très approximatifs du fait de la non-linéarité des équations. Ainsi, l'application de cette méthode à l'horizon de référence ne redonne pas les parts de marché observée.

(ii) la méthode catégorielle

La méthode catégorielle consiste à appliquer la méthode naïve par catégorie d'individu que l'on suppose identiques à l'intérieur de la même catégorie mais différents entre d'une catégorie à l'autre. On aura ainsi pour chaque catégorie et pour chaque OD une part de marché distincte. La construction des catégories doit se faire en fonction de la réalité connue du comportement de choix modal et des catégories que l'on souhaite représenter dans le modèle.

(iii) la méthode par énumération d'un échantillon

La méthode consiste à créer un échantillon d'individus caractérisés par des variables individuelles déterminées au hasard (au sens statistique du terme, la méthode la plus appropriée étant du type de Monte Carlo), l'échantillon étant représentatif de la population de la zone à l'horizon futur. On applique ensuite le modèle à cet échantillon.

4. Traitement des problèmes particuliers

4.1 L'introduction d'un mode radicalement nouveau

- (i) Au cas où un mode de transport entièrement nouveau est envisagé (un tramway ou un métro là où n'existent que des bus, une liaison rapide entre deux points...), il peut être très utile de réaliser une enquête de préférences déclarées⁹⁴ afin d'évaluer les critères qualitatifs (bonus) liés au nouveau mode (image, sécurité, fiabilité de temps de parcours, confort, ...) non directement liés aux critères fonctionnels de choix (vitesse, tarif, nombre de correspondances...); ce type d'enquête est généralement traité à l'aide d'un modèle logit. Il est également possible de traiter simultanément avec un modèle logit des enquêtes de préférences révélées et déclarées de manière à rechercher une formulation de l'utilité commune à la fois aux modes existants et aux modes nouveaux.
- (ii) Dans ce cas, on se base souvent sur des enquêtes de préférences déclarées, où l'on demande par exemple : « si le nouveau mode de transport décrit précédemment avait existé aujourd'hui, auriez-vous utilisé :

⁹⁴ Un ouvrage sur les enquêtes de préférences déclarées est en préparation dans le cadre du PREDIT

- certainement le nouveau mode ?
- probablement le nouveau mode ?
- probablement le mode actuel ?
- certainement le mode actuel ? »

Il convient de mentionner les difficultés propres aux techniques de préférence déclarées : mode de passation du questionnaire, interprétation des réponses, quantification des réponses ...

4.2 Les captifs

4.2.1 Les captifs TC

- (i) Leur volume global est relativement aisé à déterminer à partir des données du recensement ; ils comprennent en effet :
 - les non titulaires de permis de conduire, en particulier les scolaires ;
 - les non propriétaires de véhicules particuliers (en partie inclus parmi les non titulaires du permis de conduire)
 - les membres des ménages de plus d'une personne (sauf un membre) en possession d'une seule voiture
 - les personnes malades ou impotentes
- (ii) Leur répartition géographique peut être approchée au travers des enquêtes-ménages et des enquêtes spécifiques.
- (iii) Si on utilise un modèle logit, des variables telles que l'âge, la détention ou non du permis de conduire, le nombre de voitures par ménage... doivent permettre de tenir compte de ces captifs. Les modèles Dogit peuvent par ailleurs fournir un moyen de les prendre en compte.

4.2.2 Les captifs VP

Leur évaluation est plus délicate que celle des captifs TC. Ils sont en effet captifs de la voiture :

- soit parce qu'ils effectuent dans la journée un déplacement où il n'y a pas d'offre TC,
- soit parce qu'ils doivent transporter quelqu'un à un moment de la journée,
- soit en cas de boucle, parce que le fait de choisir un mode pour le premier déplacement d'une boucle limite souvent le choix des modes possibles pour les autres déplacements de la boucle.

Le motif de déplacement, le nombre de personnes avec lesquelles le déplacement est effectué peuvent servir à les modéliser.

4.3 Le stationnement

- (i) L'objet du présent paragraphe est de donner des pistes pour intégrer les contraintes de stationnement dans un modèle de choix modal. « La modélisation des contraintes de stationnement » a fait l'objet d'un rapport de recherche pour le compte de la DTT, réalisé par la SEMALY et le LET (juin 2000). Le lecteur pourra se reporter avec profit à ce document.
- (ii) Les contraintes de stationnement agissent de manière particulièrement complexe sur les déplacements : l'offre de stationnement et la tarification jouent de manière non trivial. Ainsi pour un résident stationnant sur voirie payante, il faudrait imputer le coût du stationnement pendant la journée au mode alternatif à la voiture, puisque c'est lorsqu'il ne l'utilise pas qu'il paye. La concurrence entre le stationnement payant de courte durée, le stationnement payant de longue durée, et le stationnement illicite complique encore les choses. Enfin finissons par dire que les données d'offre de stationnement (en particulier privée) sont rares et difficiles à reconstituer d'après les spécialistes. Il n'existe pas, à ce jour, de modèle permettant de prendre en compte explicitement les contraintes de stationnement (sinon parfois le temps de marche à pied entre la place de stationnement et le point de destination ou d'origine) et de tester des politiques de stationnement à l'échelle d'une agglomération.
- (iii) En pratique on relève plusieurs techniques pour représenter les contraintes de stationnement, aucune n'étant pleinement satisfaisante. On peut introduire un paramètre de pénibilité du stationnement (temps de recherche moyen + coût moyen horaire), propre à chaque zone et s'ajoutant au coût généralisé VP. On peut également imaginer réaliser une segmentation de la demande en fonction de la disponibilité ou non d'un stationnement gratuit à destination, par exemple en fonction du motif. Enfin, il est toujours possible de corriger les matrices OD modales en fonction de la disponibilité réelle de place ; si le nombre de déplacements est supérieur à l'offre de stationnement (à un taux de rotation près), un écrêtement de la demande VP pourra être effectué. A notre connaissance, seule la première de ces techniques a été appliquée en France.

4.4 Les déplacements intermodaux et les pôles d'échanges

- (i) « La modélisation des déplacements intermodaux » a fait l'objet d'une étude réalisée par la SEMALY dans le cadre du PREDIT, et datée de septembre 1999.
- (ii) Ce rapport met bien en évidence l'ambiguïté des déplacements intermodaux (qui ne représentent en France que quelques pourcents du nombre total de déplacements motorisés) ; ils peuvent en effet être considérés :
 - soit comme un mode particulier (VP + TC)⁹⁵
 - soit comme un sous-mode TC, la voiture ne constituant qu'un mode de rabattement pour les utilisateurs des TC,
 - soit comme un sous-mode VP, les difficultés de stationnement incitant alors à se garer en dehors de la zone cible (généralement l'hypercentre) et les TC constituant alors un simple mode d'accès terminal au lieu de destination finale.

⁹⁵ Les échanges entre TC (d'un car à un train par exemple) rentrent dans un cas classique de correspondance

- (iii) Compte tenu de ces remarques, parmi les différents modèles de choix modal décrits au § 1, deux paraissent pouvoir être utilisés avec profit pour prendre en compte les déplacements intermodaux, tout en ayant bien en tête que le faible nombre de ces déplacements rend difficile l'exploitation statistique des enquêtes disponibles (il peut donc être pertinent de réaliser des enquêtes spécifiques) :
- la grille de partage modal, en déduisant des enquêtes la part VP + TC, (considéré comme un mode spécifique) selon le type de relation,
 - le modèle logit, avec différentes possibilités :
 - multinomial si (VP + TC) est pris comme un mode à part
 - hiérarchique si (VP + TC) est considéré comme un sous-mode TC ou VP.
- (iv) Dans le cas où l'on recherche des fonctions d'utilité, il importe de décrire correctement les performances de l'offre au niveau du pôle d'échange, ce qui inclut :
- le stationnement (temps de recherche et tarif),
 - le temps de marche à pied entre deux modes.
- (v) Plusieurs techniques existent pour estimer le nombre de déplacements VP+TC à venir, généralement à travers des méthodes de dimensionnement des parcs-relais :
- méthode du bassin versant : on évalue la population globale potentiellement intéressée par une station TC à proximité de laquelle est prévu un parc-relais et, par analogie avec les parcs-relais existants dans l'agglomération, on retient une part de cette population comme susceptible d'utiliser le mode VP+TC ;
 - méthode analogique directe : on évalue d'abord la clientèle TC de l'arrêt, et par analogie, on évalue la part de cette clientèle se rabattant en voiture. Aucune de ces deux méthodes n'est vraiment satisfaisante car chaque cas est particulier : l'importance du rabattement dépend non seulement de la distance au centre-ville mais aussi de la facilité d'accès au parc-relais en voiture et des difficultés de la circulation automobile vers le centre-ville. Il paraît nécessaire de réaliser des enquêtes spécifiques sur les parcs-relais existants afin de mieux comprendre leur fonctionnement.
- (vi) Il existe également des logiciels d'affectation multimodale où choix modal et affectation sont combinés (ex : Polydrom).

4.5 Les chaînes de déplacement

- (i) Le choix modal peut dépendre non d'un seul déplacement mais de l'ensemble des déplacements qui seront réalisés dans la journée. Ainsi, si une personne doit récupérer un enfant à la sortie de son travail, elle pourra être amenée à utiliser la voiture alors que pour ses trajets Domicile-Travail et Travail-Domicile, elle emprunterait les TC. Cette notion de chaîne ou boucle de déplacement est rarement prise en compte (*voir chap. 3 § 2.3*) au niveau du choix modal comme de la modélisation de la demande en général. Notons toutefois que le logiciel VISEM met en œuvre un modèle basé sur la notion de boucle.
- (ii) Aux États-Unis, des modèles basés sur les chaînes d'activité sont apparus récemment (*voir « Modèles de déplacements en milieu urbain : l'expérience américaine », DRAST, Octobre 2000*). Ce type de modèle nécessite des enquêtes

assez proches des enquêtes-ménage, mais où apparaissent à la fois la chaîne d'activité (Travail / Aller déjeuner / Aller faire du shopping / Aller à la maison) et la chaîne de déplacements associée (Se rendre au travail en voiture / Aller au restaurant en marchant / Faire un achat par Internet / Se rendre au domicile en voiture) ainsi que la fréquence des déplacements.

4.6 Les modes doux (vélo, marche, roller)

Dans le principe, la prise en compte des modes doux n'est pas différente de celle des VP ou des TC. Comme toujours, le problème est de disposer d'abord d'une base de données représentative (les 2 roues ne représentent qu'une faible fraction des déplacements) et fiable (tous les déplacements à pied ne sont probablement pas cités dans les enquêtes). Parmi les paramètres explicatifs descriptifs de l'offre, la plus ou moins grande pénibilité du trajet devrait apparaître (par exemple la dénivelée d'un trajet conditionne l'utilisation du vélo). En général, on confond les modes marche et vélo en prenant comme utilité la distance selon le plus court chemin et une vitesse de 4 km/h.⁹⁶

Deux méthodes sont en général pratiquées :

- (i) les modes doux sont 'sortis' des matrices, en appliquant par exemple un pourcentage de mode doux en fonction de la distance du trajet, cette courbe étant calée à partir d'une enquête ménage par exemple. Le modèle de choix modal s'applique ensuite sur les modes motorisés. Il n'y a donc pas dans ce cas de modélisation du « choix » pour le mode doux mais une « répartition ».
- (ii) les modes doux sont intégrés au modèle de choix modal au même titre que les autres modes.

On choisira telle ou telle méthode en fonction des contraintes de l'étude, de ses objectifs en matière de mode doux et des données disponibles.

4.7 Le covoiturage

Théoriquement, rien n'empêche de traiter le covoiturage comme un mode à part entière, quitte à le traiter dans un modèle logit hiérarchique comme un sous-mode du mode VP. Dans la pratique, la part du covoiturage peut être évaluée à partir du mode VP_{dépose} s'il est distingué du mode VP_{garé} dans les enquêtes ; c'est généralement le cas dans les études concernant par exemple la desserte d'un aéroport ou d'une gare, ça ne l'est pas toujours dans les enquêtes-ménages ; comme dans le cas des modes doux, le problème de la modélisation du covoiturage vient essentiellement des données disponibles et de leur validité statistique. Parmi les paramètres explicatifs figurent probablement le revenu des individus et le nombre et la notoriété des associations de covoiturage existant sur l'agglomération. Cependant, on ne connaît pas d'expérience en France de modélisation spécifique du covoiturage (du moins pour les déplacements DT), où les enjeux ne le nécessitent peut-être pas autant qu'aux USA par exemple où des voies autoroutières sont dédiées au covoiturage ; en pratique, on utilise plus classiquement des taux de remplissage des véhicules (variables selon l'heure et le

⁹⁶ Une recherche en cours dans le cadre du PREDIT vise à modéliser explicitement le choix du mode vélo à Strasbourg, ville disposant de la plus grande part de marché vélo en France et donc du plus grand nombre d'observations.

motif de déplacement) qui permettent de passer des matrices de déplacements en automobile aux matrices de véhicules.

	Taux d'occupation VP (1990-2001)	Taux d'occupation VP (1976-1989)
min	1,28	1,22
médiane	1,32	1,33
max	1,46	1,50

Tableau 33 Valeurs représentatives du taux d'occupation des véhicules
(Source : Enquêtes ménages déplacements)

4.8 Les trajets terminaux VP/TC

Ce sujet a déjà été abordé au § 4.4 sur les déplacements intermodaux.

Les trajets VP terminaux sont considérés comme du rabattement sur le réseau TC lourd (parc-relais en extrémité de ligne) tandis que les trajets TC terminaux sont plutôt la conséquence de difficultés de stationnement qui empêchent les VP d'effectuer un déplacement complet, en général vers l'hypercentre (parking de délestage à la limite de l'hypercentre).

5. Contrôles et validation

5.1 Contrôles

Il est nécessaire au terme du processus de choix modal de vérifier la cohérence des résultats avec les données connues, qu'elles soient issues d'enquêtes ménages dans des agglomérations comparables ou d'enquêtes spécifiques réalisées par exemple après la mise en service d'une infrastructure :

- mobilité par personne, globale et par mode,
- part de marché des différents modes (globale, par tranche horaire, par motif, par zone géographique...)
- part de trafic induite et reportée des différents modes vers une infrastructure nouvelle,
- etc.

5.2 Validation

Trois grands types de tests, déjà évoqués au § 2, permettent de valider les modèles de choix modal :

- la comparaison entre prévision et réalisation,
- l'utilisation d'une segmentation non utilisée lors de la construction du modèle (tranche d'âge, sexe, type de zone...),
- la réalisation de tests de plausibilité, notamment en vérifiant que les élasticités des comportements à certains paramètres (exemple : la diminution du coût généralisé) sont conformes aux valeurs habituellement reconnues.

6. Pour en savoir plus

➤ **Modelling transport**

1990, troisième édition : 2001

Auteur : ORTUZAR et WILLUMSEN Éditeur : John Wiley & Sons

Le contenu mathématique, les limites, les aspects statistiques des techniques de choix modal sont développés au chapitre 5 de cet ouvrage général.

➤ **Discrete Choice Analysis : Theory and Application to Travel Demand**

1985

Auteur : M. Ben-Akiva - S. Lerman Éditeur : The MIT Press

Ouvrage fondamental sur les méthodes de choix discret. La théorie et tous les développements mathématiques et statistiques de ces méthodes y sont exposés en détail.

➤ **A Self-Instructing Course in Disaggregate Mode Choice Modelling**

<http://www.bts.gov/NTL/DOCS/381SIC.html>

déc.-86

Auteurs : J. L. Horowitz, F. S. Koppelman & S. R. Lerman

Préparé pour University Research and-Training Program / Urban Mass Transportation Administration (actuellement Federal Transit Administration, FTA)

Ce cours disponible sur Internet fournit les bases de la pratique de la modélisation désagrégée en associant théorie et exercices.

➤ **Comportements de déplacement en milieu urbain**

les modèles de choix discrets. Vers une approche désagrégée et multimodale

juin-98

Auteur : CERTU / MVA Éditeur : CERTU

Ce dossier a pour objectif de présenter en français les modèles de choix discret et d'impulser un mouvement pour la diffusion de la modélisation désagrégée et multimodale des déplacements en France. Il comprend deux grandes parties : approche théorique et méthodologique, puis approche pratique (exemples concrets, notamment sur un modèle conjoint choix modal/distribution).

➤ **Stated Choice Methods : Analysis and Application**

2000

Auteur : J. J. Louvière - D. A. Hensher - J. D. Swait

Editor : Cambridge University Press

Ouvrage de référence sur les méthodes de préférences déclarées destinées à étudier et à prévoir les choix et les comportements du consommateur. Un chapitre spécifique donne des études de cas pour le secteur des transports.

Chapitre 6. Affectations VP

Mots clés :

<u>VP</u>	<i>Véhicule Particulier, servant au déplacement des voyageurs par opposition aux transports en commun (TC) et aux véhicules utilitaires légers (VUL) ou lourds (PL), destinés non au déplacement de personnes mais au transport de marchandises .</i>
<u>UVP</u>	<i>Unité de véhicule particulier, permettant d'assimiler un bus ou un PL à plusieurs VP, du fait de l'espace qu'ils occupent sur la voirie (par exemple 1 PL = 2 UVP).</i>
<u>Affectation</u>	<i>Répartition de la demande sur le réseau modélisé.</i>
<u>Impédance</u>	<i>Par analogie avec un circuit électrique, grandeur caractéristique de la difficulté d'écoulement du trafic (temps de parcours, coût généralisé, ...). L'impédance a pour inverse la conductance.</i>
<u>Calage</u>	<i>Phase de la modélisation qui a pour objet de reconstituer une situation connue par des comptages, des mesures de temps de parcours, des enquêtes OD.</i>

1. Les familles de modèles existantes

Depuis leur création, les logiciels d'affectation ont connu une sophistication croissante et un développement cumulatif (parallèles d'ailleurs aux progrès de l'informatique), depuis l'affectation en tout ou rien sur le plus court chemin. La présentation suivante reprend cette évolution, à la fois théorique et chronologique, en distinguant d'une part les modèles sans et avec contrainte de capacité, et d'autre part les modèles déterministes et les modèles stochastiques; un paragraphe spécial est consacré à la prise en compte des péages et aux problèmes de choix horaires.

1.1 Les modèles sans contrainte de capacité (ou « à temps fixé »)⁹⁷

1.1.1 L'affectation selon le plus court chemin

Pour chaque couple origine-destination, on calcule le plus court chemin (en temps, en temps généralisé ou en coût généralisé) et on affecte la totalité du trafic de ce couple origine-destination sur les arcs composant ce chemin le plus court. Ce raisonnement simple a deux défauts principaux :

- il ignore les chemins légèrement plus longs,

⁹⁷ Le temps de parcours est fixe puisqu' indépendant de la charge du réseau (pas de contrainte de capacité)

- il ne prend pas en compte l'évolution du temps de parcours (ou du coût) en fonction de la charge des arcs.

1.1.2 L'affectation stochastique simple

- (i) Dans la réalité, tous les automobilistes n'empruntent pas nécessairement le meilleur chemin pour eux, soit par manque d'information, soit parce qu'ils se trompent, soit par volonté de varier leur itinéraire. Il est donc apparu nécessaire à certains d'introduire un facteur aléatoire. Deux manières de prendre en compte ce caractère stochastique de l'affectation ont été proposées :
- les méthodes ayant recours aux algorithmes de type Monte-Carlo,
 - une méthode de type logit, plus opérationnelle.
- (ii) Dans le premier cas (développé par Burrell en 1968), on considère que le coût généralisé d'un arc est perçu différemment par les automobilistes, selon une loi de distribution à définir (normale, uniforme, triangulaire...). La notion de plus court chemin n'est donc plus absolue, mais liée à la perception de chaque individu et plusieurs itinéraires pourront donc être choisis. Le résultat de l'affectation dépendra, comme toujours quand on utilise la méthode de Monte-Carlo, du nombre de tirages aléatoires; plus ce nombre est grand, plus on limite l'incertitude.
- (iii) Une autre solution pour aboutir à l'utilisation de plusieurs chemins pour un couple OD donné est l'introduction d'un logit qui traduit la plus ou moins grande probabilité d'utilisation des différents chemins possibles (Abraham 1961, Dial 1971). L'algorithme détermine les n chemins les plus courts reliant une origine à une destination donnée ; la probabilité d'utiliser le chemin i est donné par :

$$p_i = \frac{\exp(-\alpha \cdot C_i)}{\sum_{k=1}^n \exp(-\alpha \cdot C_k)}$$

où C_i est l'impédance ou le coût généralisé du chemin i et α un coefficient positif.

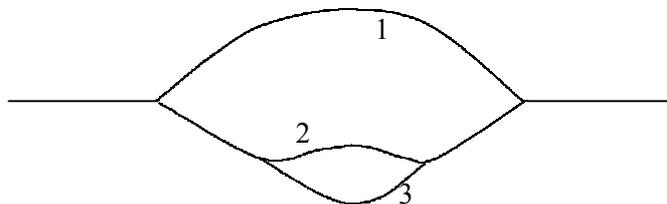


Figure 16. Limite de l'approche logit simple pour des affectation sur itinéraire proches.

Pour chaque couple origine-destination, le trafic est réparti sur les différents chemins possibles proportionnellement à leur probabilité d'utilisation. Un inconvénient de cette méthode est qu'elle ne distingue pas les chemins principaux des sous-chemins se distinguant peu entre eux. Ainsi, dans le cas suivant :

si les coûts sont identiques sur les trois itinéraires, la répartition sera 1/3, 1/3, 1/3 alors qu'en réalité on aura plutôt 1/2 (pour le chemin 1), 1/4, 1/4.

Il existe des algorithmes qui minimisent le problème en ne retenant que des chemins suffisamment différents. Toutefois la faiblesse générale de cette méthode est de comporter une certaine dose d'arbitraire, que ce soit dans la détermination du nombre maximum d'itinéraires, ou de tout autre facteur de sélection des itinéraires (rapport des coûts, etc.) qui ne pourront pas être calés sur des observations en général.

1.2 Les modèles à contrainte de capacité (prenant en compte la congestion)

1.2.1 L'affectation par tranches

Pour prendre en compte la charge du réseau, une solution simple (et aujourd'hui très rarement utilisée) consiste à affecter le trafic par tranches successives, généralement décroissantes⁹⁸, en utilisant des courbes débit-vitesse :

- la première tranche de la matrice est affectée selon le plus court chemin ou en utilisant une méthode stochastique, en supposant le réseau vide⁹⁹ ;
- on recalcule alors le temps ou le coût généralisé de chaque arc, en prenant en compte la charge de trafic issue de l'affectation précédente ;
- la deuxième tranche est ensuite affectée sur le (ou les) nouveau(x) plus court(s) chemin(s), qui peu(vent) être différent(s) du précédent ;
- etc.

Plus la segmentation de la matrice est fine, mieux on tient compte de la charge du réseau; en revanche, à la fin de l'affectation, les différents chemins utilisés pour un couple OD donné peuvent avoir des temps ou des coûts généralisés différents.

1.2.2 L'affectation à l'équilibre

(i) Premier principe de Wardrop

Le premier principe de l'équilibre de Wardrop peut être énoncé de deux manières distinctes, mais finalement équivalentes :

- à l'équilibre, aucun individu ne peut réduire le coût de son déplacement en changeant d'itinéraire;
- pour une OD donnée, tous les chemins empruntés ont le même temps ou coût généralisé, et celui-ci est minimal.

Ceci suppose implicitement que chaque automobiliste connaît l'état réel du réseau au moment où il va prendre la route; le développement des outils d'information (panneaux à message variable, ordinateurs de bord utilisant des données au temps réel) devrait logiquement rapprocher le comportement effectif des automobilistes de leur comportement théorique supposé par le principe d'équilibre.

Faute d'une solution algébrique simple, les algorithmes (en particulier celui de Frank-Wolfe), utilisés par tous les logiciels les plus courants aujourd'hui (Emme/2, Davisum, Trips, Transcad...), permettent d'aboutir à l'équilibre, à l'issue d'un processus itératif

⁹⁸ Par exemple : 40%, 30%, 20%, 10% (OPERA utilise 6 à 8 tranches)

⁹⁹ Ou préchargé (par exemple avec du trafic local ou du trafic PL)

(affectation avec réorientation du trafic) sanctionné par la convergence d'un indicateur assurant la stabilité des résultats d'une itération à l'autre.

L'affectation avec réorientation du trafic peut être résumée comme suit :

- une affectation à vide produit d'abord un chargement "courant",
- on procède ensuite à une affectation fictive sur les nouveaux temps, qui fournit un chargement "fictif",
- un mélange des chargements courant et fictif donne un chargement courant actualisé. Ce mélange est une combinaison convexe avec une certaine proportion de fictif, qu'on itère en faisant décroître la proportion de fictif. Cela suffit à assurer la convergence vers l'équilibre.

L'application du principe d'équilibre de Wardrop peut intégrer un modèle prix-temps¹⁰⁰, via une distribution statistique de la valeur du temps (ainsi, dans Davisum ou Transcad, elle peut suivre une loi log-normale).

Il est possible de trouver un équilibre simultané (dit « multiclasse ») pour plusieurs classes de véhicules (typiquement VL/PL).

(ii) Deuxième principe de Wardrop

Alors que le premier principe de Wardrop permet d'évaluer l'optimum individuel, le deuxième principe de Wardrop suppose que, à l'équilibre, le coût global de transport est minimisé pour la collectivité (il équivaut à l'équilibre de l'utilisateur à condition d'internaliser les coûts sociaux de congestion, à l'intérieur des fonctions de coût pour l'utilisateur). Quand le réseau est peu saturé, les affectations résultant des deux principes sont peu différentes; en revanche, l'écart s'accroît significativement quand la congestion augmente. Pour rapprocher la somme des optimums individuels de l'optimum collectif, il faudrait procéder à un jalonnement des itinéraires, ce qui pourrait se modéliser à l'aide de bonus. Certains logiciels permettent une affectation de ce type, qui peut être utile aux planificateurs de transport dont l'objectif est de déterminer les conditions d'un optimum social.

1.2.3 L'affectation stochastique

(i) Modèle logit à contrainte de capacité

Les principes exposés au § 1.1.2 peuvent être appliqués en introduisant une contrainte de capacité, en procédant par itérations. En France, le modèle interurbain Ariane utilise ce type de relation appelé loi d'Abraham ($T_i CG_i^{10} = cste$, où T_i est le trafic sur l'itinéraire i , CG_i le coût généralisé de l'itinéraire i , et ce pour l'ensemble des itinéraires i possibles pour aller d'une origine à une destination données ; on retrouve bien la formule donnée au chap. 6 §1.1.2(iii) avec $\alpha = 10$ et C_i le log népérien du coût généralisé CG_i).

¹⁰⁰ Le chapitre 5 § 3.5 décrit ce type de modèle pour la détermination du choix modal; les principes sont identiques pour la répartition entre deux itinéraires routiers, dont l'un est éventuellement à péage.

(ii) Modèle d'équilibre incluant un facteur aléatoire

L'équilibre stochastique diffère de l'équilibre de Wardrop en ceci qu'il suppose que chaque automobiliste a sa propre perception du coût du trajet. L'introduction d'un facteur aléatoire complique significativement l'algorithme d'équilibre (Sheffi, 1985) et sa convergence (qui n'est plus monotone), et augmente les temps de calcul. Cependant, la prise en compte simultanée des contraintes de capacité et de phénomènes probabilistes est probablement ce qui reconstitue le mieux le comportement des automobilistes sur des réseaux où existent des problèmes de saturation, mais cependant pas trop congestionnés (Sheffi a montré que dans ce cas, l'algorithme de Wardrop fournissait des résultats voisins avec des temps de calcul nettement plus faibles¹⁰¹).

1.3 Prise en compte de problèmes spécifiques

1.3.1 Le passage à l'UVP

Le débit est la quantité de véhicules qui passe, en un point donné, pendant une période de temps donnée. Il peut être nécessaire d'introduire la notion de coefficient d'équivalence, permettant de tenir compte du fait que le trafic n'est pas homogène et qu'un poids lourd peut être « équivalent » à plusieurs véhicules. Le débit tenant compte de cela est exprimé en uvp/h (unités de véhicules particuliers par heure), avec par exemple les coefficients d'équivalence suivants :

- • 1 véhicule léger (PTC < 3,5 t) = 1 uvp.
- • 1 poids lourd ou 1 bus (PTC > 3,5 t) = 2 uvp.
- • 1 deux roues (lourd ou léger) = 0,3 ou 0,5 uvp.

Un coefficient d'équivalence 3 pourra être utilisé pour des véhicules spécifiques tels que les bus articulés ou les semi-remorques. Si le réseau comporte des rampes importantes, le coefficient d'équivalence des PL pourra être significativement plus important (voir Highway Capacity Manual).

1.3.2 Le traitement des péages

La présence de péages dans le réseau complique l'affectation. En effet, même en introduisant la notion de coût généralisé, il est probable que l'on décrive mal le comportement des automobilistes si on ne distingue pas les chemins avec péage des chemins sans péage.

Les Anglais poussent souvent cette logique jusqu'au bout en n'introduisant pas directement le péage dans les réseaux, mais en procédant en deux temps :

- estimation du trafic sur une infrastructure sans péage,
- puis calcul du trafic de l'infrastructure à péage à partir d'une courbe de partage, issue implicitement ou non, d'un modèle prix-temps.

¹⁰¹ D'après "Modelling Transport", [Ortuzar et al, 2001]

En revanche, en France où la notion de péage est ancienne, les concepteurs de logiciels¹⁰² ont intégré directement cet aspect du problème et l'ont perfectionné, grâce à l'introduction d'une distribution statistique de la valeur du temps (généralement une loi log-normale, correspondant à la répartition des revenus). A chaque itération, le modèle d'affectation compare le plus court chemin sans péage avec un ou éventuellement plusieurs chemins avec péage.

Si le logiciel ne permet pas d'introduire une distribution statistique de la valeur du temps (par exemple Emme/2 ou Trips), il est tout de même possible de refléter la diversité des comportements face au péage en tronçonnant la matrice en plusieurs tranches correspondant chacune à une valeur du temps différente, de manière à reconstituer de façon discrète la répartition log-normale de la valeur du temps.

Pour la prise en compte de plusieurs niveaux de péage pour une même catégorie de véhicules, par exemple abonnés et non-abonnés, il n'est généralement pas possible de connaître *a priori* les matrices correspondant aux différentes catégories d'usagers. Deux solutions au moins sont alors possibles pour traiter ce cas de figure : soit on introduit un péage moyen, révélé, ou dans le cas de projet, estimé (ce qui suppose tout de même que l'amplitude des tarifs reste raisonnable) ; soit on prévoit deux réseaux différents, l'un avec le plein tarif, l'autre avec un tarif réduit et l'on pondère a posteriori les résultats en faisant des hypothèses sur la proportion d'abonnements.

1.3.3 Les modèles de choix horaire

Sur un réseau congestionné, certains automobilistes peuvent avoir intérêt à anticiper ou retarder leur déplacement. Il est possible d'évaluer l'importance de ces choix horaires en modélisant les différentes tranches horaires consécutives, en calculant le gain de temps global (pénalité de changement de tranche horaire + gain de temps procuré par ce changement), puis en estimant les reports horaires par une formule de type logit sur le temps ou le coût généralisé résultant. Certains modèles dynamiques calculent automatiquement les reports horaires (voir chap. 1 § 3.3).

Ce problème est traité plus en détail au chap. 3 § 6.

1.3.4 Affectation sur les connecteurs

Le trafic affecté sur un connecteur (ou arc fictif) dépend du volume du trafic émis ou attiré par le centroïde correspondant et du nombre de connecteurs attachés à ce centroïde (voir chap. 2 § 3.6). Les débits sur les arcs du réseau situés à proximité immédiate des connecteurs sont rarement significatifs et il faut mieux éviter de s'en servir pour le calage.

1.4 Contraintes techniques et financières

Les différents outils actuels permettent pour la plupart de choisir un type d'affectation parmi ceux décrits précédemment.

En pratique, le choix du logiciel dépendra de:

¹⁰² En particulier François Barbier Saint-Hilaire (INRETS) avec la famille des logiciels DAVIS, dont l'algorithme a été repris par DAVISUM.

- la préexistence ou non d'un modèle, le client pouvant être désireux de conserver le même outil d'affectation ;
- la disponibilité ou non d'un logiciel, les difficultés d'apprentissage et le coût de ces outils (de 15000 à 30000 Euros environ) imposant souvent au praticien d'utiliser régulièrement le même logiciel ;
- la problématique de l'étude, en particulier si celle-ci est multimodale ou si elle intègre la notion de péage, plus ou moins bien traitée par les différents logiciels (à cet égard, Davis et maintenant Davisum ont fait l'objet de développements poussés) ;
- l'importance de la congestion (souvent liée à la taille de l'agglomération étudiée), elle aussi plus ou moins mal traitée par les divers outils (*cf. chap. 2B §3.5*).

1.5 Récapitulatif des différentes méthodes d'affectation statique pour les VP

Le tableau suivant récapitule les principaux avantages et limites des différents types d'affectation décrits précédemment :

Type d'affectation		PRINCIPE COMORTEMENTAL	Avantages	LIMITES
Sans contrainte de capacité	Tout ou rien	Pour chaque OD, les automobilistes prennent le chemin le plus court, indépendamment de la charge du réseau	Grande simplicité	Ne prend pas en compte les variations de vitesse en fonction de la charge Ne permet pas d'affecter sur plusieurs chemins concurrents
	Stochastique	Pour chaque OD, les automobilistes se répartissent sur les différents chemins possibles proportionnellement à leur probabilité d'utilisation	Introduit un caractère aléatoire dans l'affectation Permet d'affecter le trafic d'une OD sur plusieurs chemins concurrents	Ne prend pas en compte les variations de vitesse en fonction de la charge Difficulté de choisir les itinéraires à retenir
Avec contrainte de capacité	Par tranches	Suppose un chargement progressif du réseau, avec aux différentes étapes, une affectation sur le plus court chemin tel qu'il ressort du chargement précédent	Simplicité ; bien adapté aux petites agglomérations aux réseaux peu saturés Tient compte des contraintes de capacité Permet d'affecter le trafic d'une OD sur plusieurs chemins concurrents	Ne respecte pas le principe d'équilibre Le choix de la taille des tranches et de leur nombre est arbitraire et peut conduire à des approximations
	Équilibre simple	Pour une OD donnée, les différents chemins empruntés ont le même coût généralisé et ce coût est minimal	Décrit un comportement logique et moyen des automobilistes	Suppose que les automobilistes ont une parfaite connaissance du réseau et des temps de parcours
	Modèle prix-temps	Les automobilistes choisissent leur itinéraire en fonction de leur valeur du temps, supposée suivre une distribution statistique	Prend en compte une forme de différenciation des automobilistes, utiles dans les réseaux très congestionnés ou à péage	Suppose que les automobilistes ont une parfaite connaissance du réseau et des temps de parcours
	Logit	Idem stochastique avec prise en compte de la charge du réseau	Introduit un caractère aléatoire dans l'affectation	Suppose les itinéraires indépendants et distingue difficilement les chemins principaux des sous-chemins
	Équilibre stochastique	Idem équilibre simple à un facteur aléatoire près	Prend en compte le caractère à la fois rationnel et aléatoire des comportements	Temps de calcul assez élevé

Tableau 34 Récapitulatif des différentes méthodes d'affectation statique pour les VP

2. Le paramétrage des modèles

2.1 Les différents éléments du coût généralisé et leur mode de détermination

- (i) Une formule assez générale du coût généralisé C_g (ou impédance) peut s'écrire :

$$C_g = V_t [t_0 + k_f (t - t_0)] + C_d d + P - B$$

(mais très souvent, on prend : $C_g = V_t t + C_d d + P - B$)

où

V_t : Valeur du temps (fait l'objet du § 2.2)

t : temps en charge

t_0 : Temps à vide

d : Distance

k_f : Coefficient de fiabilité

C_d : Coût kilométrique

P : Péage

B : Bonus

- (ii) Le coefficient de fiabilité k_f , souvent pris égal à 1, traduit la prise en compte de l'incertitude de temps de parcours dans le choix d'un itinéraire : l'automobiliste intègre le temps qu'il peut perdre ($t - t_0$) comme un facteur pénalisant, ce qui se traduit par une valeur de k_f supérieure à 1. Difficilement quantifiable, ce phénomène existe pourtant bien comme le prouvent d'ailleurs les enquêtes de préférence révélées où les temps de parcours estimés sont généralement supérieurs aux temps de parcours moyens réels (l'automobiliste a tendance à se souvenir du temps qu'il a perdu lors d'un bouchon); logiquement, le « surtemps » pris en compte devrait être de l'ordre de l'écart-type des temps de parcours. Les Anglo-Saxons semblent l'évaluer entre 0,4 et 0,6, soit k_f compris entre 1,4 et 1,6 (mais on trouve peu de littérature sur le sujet) ; dans Davisum, k_f est pris égal à 1,25 par défaut. Il faut en tous cas être bien conscient que plus k_f sera grand, plus les voies à faible variabilité (autoroutes et voies rapides, ouvrages à péage peu chargés...) seront favorisées par le modèle.
- (iii) Le coût kilométrique retenu dans les modèles n'intègre généralement pas l'amortissement ou les frais généraux, mais correspond plutôt au coût marginal ressenti par l'automobiliste, à savoir essentiellement le coût du carburant (il n'est pas sûr que le coût des autres consommables, huile et pneus, soit réellement pris en compte). Pour un véhicule consommant 8 l/100 km, avec un prix du carburant d'1 €/l, $C_d \cong 0,08$ €/km. Son évolution dans le temps est très délicate à prévoir (quelle peut-être l'évolution de la TIPP, du cours du pétrole et du dollar dans l'avenir ?) et il est généralement gardé constant sauf dans le cas de scénarios spécifiques (forte taxation du carburant par exemple).

- (iv) Le péage dépend uniquement du réseau. On a vu au chap. 2 § 3.9 la difficulté à prendre en compte les abonnements ou des tarifs par entrée/sortie peu liés à la distance.
- (v) Le bonus (ou le malus) s'applique généralement à deux types de voies :
- les voies à caractère autoroutier (notamment, souvent, les ouvrages à péage),
 - les voies attractives (paysage, itinéraires touristiques...) ou répulsives (fortes pentes¹⁰³, forte sinuosité, tunnels longs...).

Dans le premier cas, la Direction des Routes a évalué – en interurbain – un bonus maximal de confort et de sécurité, qu'il est souvent tentant de reprendre (0,05 €/km). Dans le deuxième cas (et en fait également dans le premier cas), seul le calage du modèle fournit une indication sur la valeur du bonus (ou du malus) à retenir. D'ailleurs, les enquêtes de préférence révélées et/ou déclarées ne permettent pas de définir de façon claire le bonus, souvent mêlé à la valeur du temps (voir § 2.2.1).

Logiquement, le bonus-malus évolue dans le temps comme la valeur du temps.

2.2 La valeur du temps

2.2.1 Le couple valeur du temps, bonus

La valeur du temps est un paramètre fondamental pour l'affectation du trafic surtout lorsque intervient un péage (ouvrage ou péage de zone), puisque c'est elle qui est supposée refléter l'intérêt des usagers pour le gain de temps qu'offre un tel ouvrage ou un secteur payant.

Encore faut-il souligner que le temps n'est pas nécessairement le seul paramètre en jeu : des critères tels que la sécurité et le confort peuvent également inciter l'utilisateur à acquitter un péage ; ceux-ci sont modélisés comme un bonus. Les deux paramètres, valeur du temps et bonus, sont en fait difficilement dissociables et seul le couple (valeur du temps, bonus) est réellement significatif. Si on néglige le bonus, le paramètre "valeur du temps" doit donc être considéré comme la résultante du couple (valeur du temps, bonus). On l'aura compris à la lecture de ce paragraphe, la valeur du temps est un paramètre du modèle, qui dépend donc de la nature et de la construction du modèle lui-même.

Dans la pratique, il est courant d'appliquer une valeur du temps, et une distribution le cas échéant, trouvée dans la littérature. Nous en reprenons quelques éléments ci-dessous.

2.2.2 L'analyse du rapport Boiteux

Le Commissariat Général au Plan a publié en 1994 un rapport intitulé : « Transports : pour un meilleur choix des investissements », dit également « rapport Boiteux », du

¹⁰³ On admet parfois que 100 m de dénivelée sont équivalents à 1 km de longueur.

nom du Président du groupe rédacteur. Le sujet a fait l'objet d'un deuxième rapport, édité en juin 2001, intitulé : « Transports, choix des investissements et coût des nuisances » [Commissariat Général du Plan 2001]. L'objectif du rapport initial était d'harmoniser les méthodes d'évaluation des projets d'infrastructure utilisées en France, les divergences étant nombreuses entre la Direction des Routes, la Direction de la Prévision, la SNCF, l'INRETS, Air France.

Le rapport Boiteux recommande d'utiliser des valeurs tutélaires du temps pour l'évaluation socio-économique qui peuvent être différentes des valeurs du temps utilisées pour calculer la clientèle, qui doivent être au plus près des comportements. Il est néanmoins utile d'avoir ces valeurs tutélaires comme référence.

Le « rapport Boiteux » de 2001 actualise et complète certains des chiffrages proposés en 1994. Un chapitre important de ce rapport est consacré à la valeur du temps, dont nous donnons un court résumé ci-dessous :

- (i) La valeur du temps révélée (ou comportementale) utilisée pour convertir en Francs les gains de temps des usagers est un élément essentiel du calcul des avantages d'un projet.
- (ii) Le choix de la valeur du temps est délicat car celle-ci ne peut pas s'observer directement mais se déduit de la mise en œuvre d'un modèle, en fonction de divers paramètres.
- (iii) Les valeurs du temps retenues par les Administrations ou les consultants varient considérablement, tant en France qu'à l'étranger. Cette dispersion a pour origine :
 - la diversité et le caractère changeant des comportements,
 - l'insuffisance des informations statistiques disponibles,
 - la forme mathématique des modèles, aucun ne s'imposant vraiment,
 - la nature des paramètres explicatifs des comportements : confort, sécurité, lisibilité, temps peuvent être valorisés avec un seul paramètre (souvent la valeur du temps) ou avec plusieurs (la valeur du temps et un bonus-malus)¹⁰⁴
- (iv) La valeur du temps dépend du motif de déplacement, de la longueur du trajet, du revenu de l'usager, etc. Concernant la longueur du trajet, la valeur du temps augmente avec la distance dès le premier kilomètre, mais moins vite que la distance.
- (v) La valeur du temps évolue d'une année à l'autre en fonction de la dépense de consommation des ménages par tête avec une élasticité de 0,7.

En conclusion, le rapport Boiteux recommande d'utiliser des valeurs du temps normalisées et différenciées par mode, à la lumière de diverses études étrangères et de celle concernant le tunnel de Prado-Carénage [Certu, 1998]. Il appelle cependant, comme en 1994, à ce « qu'un programme de recherche soit engagé afin de pouvoir, à l'avenir, asseoir les recommandations sur la valeur du temps en milieu urbain sur des bases mieux assurées ».

¹⁰⁴ Les éléments de confort et de commodité sont évalués entre 20 et 50% des avantages procurés par une autoroute (modèle Matisse : 20 à 50 %, modèle de la DR : 30 %).

Le tableau qui suit, extrait du rapport Boiteux sur l'estimation économique des projets de transport, fournit quelques exemples de valeurs du temps par motif en site urbain. Ces valeurs ont été estimées en référence aux salaires horaires mais d'autres types d'approche existent (techniques de préférences déclarées par exemple).

Motif	% du coût salarial	% du salaire brut	Valeur du temps (€ 1998/h)	
			France entière	Île-de-France
Professionnel	61 %	85 %	10,5	13
Domicile-travail	55 %	77 %	9,5	11,6
Autres motifs (achat, loisir...)	30 %	42 %	5,2	6,4
Tous motifs	42 %	59 %	7,2	8,8

Tableau 35 Valeurs du temps par motif pour l'évaluation socio-économique
(Source rapport Boiteux 2001)

Le rapport cite en outre en annexe un certain nombre d'études européennes sur la valeur du temps auquel le lecteur pourra utilement se référer. Nous avons par ailleurs mis en annexe les résultats du projet européen TRACE qui recense une vingtaine d'études en Europe.

2.2.3 L'expérience récente des ouvrages urbains à péage

Depuis quelques années sont apparus, à l'étranger d'abord, puis plus récemment en France, des ouvrages urbains à péage qui, bien que spécifiques, fournissent des éléments d'analyse statistique. Les cas les plus fréquents sont ceux de péage de financement d'infrastructures routières sur des tronçons techniquement difficiles : TEO à Lyon ou Pont sur le Tage à Lisbonne par exemple.

L'analyse du tunnel Prado-Carénage a fait l'objet d'une étude publiée par le Certu [Certu, 1998], cofinancée par la Direction des Routes et Cofiroute, et réalisée par le CETE Méditerranée avec les contributions de Cofiroute, de l'INRETS et du LET. Sur le cas du tunnel Prado-Carénage, la médiane a ainsi été évaluée à 57 F/h et l'écart type à 52 F/h (valeur 1995 – 8,69 et 7,93 €). Pour ce qui concerne la transposabilité géographique, l'INRETS et Cofiroute ont suggéré des conclusions différentes : agrément sur la médiane, mais désaccord¹⁰⁵ sur l'écart type des logarithmes des arbitrages prix-temps : 1,2 ou 1,3 selon Cofiroute, 0,6 environ selon l'INRETS¹⁰⁶). L'ouvrage suggérait ainsi d'utiliser un indicateur de richesse ou de niveau de vie pour déformer la médiane, comme le revenu par tête publié par l'INSEE. Une autre conclusion importante de cette étude est la confirmation de l'augmentation de la valeur du temps avec la longueur du trajet¹⁰⁷, déjà mise en évidence en interurbain. Enfin, il apparaît que le motif influe nettement moins sur la valeur du temps des usagers que le remboursement ou non du péage.

¹⁰⁵ Le désaccord porte non pas sur les résultats de l'étude Prado-Carénage, mais sur la manière de les transférer à d'autres sites

¹⁰⁶ Médiane et écart-type sont les deux paramètres caractéristiques d'une loi log-normale

¹⁰⁷ Propriété modélisable, soit directement dans le logiciel, soit en segmentant la matrice par tranches de distances OD.

Des modélisations réalisées par la SETEC avec le logiciel Davis sur Lyon et l'Île-de-France ont confirmé que cette valeur médiane, corrigée en fonction du revenu de la population, et en supposant que la valeur du temps évolue comme 0,7 fois la consommation par tête, permettait de reconstituer correctement le trafic sur d'autres ouvrages à péage (TEO à Lyon, A14 en Île-de-France) à condition d'utiliser un écart-type important de l'ordre de 0,9.

2.2.4 La valeur du temps des poids lourds

La plupart des études de trafic retiennent pour les poids lourds une valeur du temps correspondant au coût de revient horaire des poids lourds calculé par les transporteurs (en France la Fédération Nationale des Transports Routiers (FNTR) ou le Conseil National des Transports (CNT)), soit autour de 30 €/heure (la valeur précise dépend de la répartition entre les différents types de poids lourds, du nombre d'heures travaillées : 200 à 220 par mois, etc ...).

Quant on examine attentivement à quoi correspond le coût horaire de transport, et quand on interroge les transporteurs routiers, il apparaît clairement que le coût horaire est un majorant de la valeur du temps. En effet :

- le coût horaire est calculé uniquement pour le transport pour compte d'autrui, qui sert donc directement à fixer les prix de vente des services de transport ; il est probable que les transports pour compte propre aient des coûts plus faibles (surtout pour les petites entreprises),
- surtout, il n'y a pas, au dire des transporteurs, de relation directe entre le coût horaire et la propension à prendre un ouvrage à péage : si le routier gagne une heure mais ne réalise pas une recette supplémentaire grâce à cette heure gagnée, il n'y a aucun intérêt pour un dirigeant d'entreprise de transport à sortir de l'argent pour un péage autoroutier puisque le chauffeur étant salarié, il importe peu qu'il passe une heure de plus ou de moins s'il ne réalise pas une livraison supplémentaire (dans la limite des règlements en vigueur !),
- les résultats des modèles paraissent confirmer ces observations : à Lyon, le trafic PL réel est environ la moitié du trafic modélisé avec une valeur du temps égale au coût horaire.

3. Le calage

3.1 Les différents types de calage

Pour un modèle d'affectation VP, trois calages simultanés sont nécessaires pour espérer disposer d'un modèle convenable :

- en temps de parcours, sur des itinéraires plus ou moins longs ;
- en débits (horaires et par sens) ;
- en flux origine-destination.

3.2 Le calage en temps de parcours

- (i) Les temps de parcours peuvent être reconstitués sur des sections relativement longues ; en revanche, il est illusoire de vouloir caler un temps de parcours sur

un arc très court. L'important est de retrouver les vitesses réelles sur des sections homogènes suffisamment longues par rapport à la problématique et de localiser convenablement les problèmes de saturation.

- (ii) De même que pour le calage en débit, il est difficile de définir a priori un seuil admissible ; disons qu'un écart – non systématique – de 15 à 25% entre temps mesuré et temps modélisé est relativement satisfaisant dès qu'existent des problèmes de congestion, qui – de toutes façons – rendent délicat la définition d'un temps de parcours « moyen ». On constate en effet généralement que, sur une dizaine de mesures dans une même période horaire, huit à neuf sont proches l'une de l'autre tandis qu'une ou deux s'en éloignent significativement.

3.3 Le calage en débit

- (i) Comme on l'a vu au chap. 2 § 3.9.2, il est souhaitable de constituer au préalable une base de données de comptages horaires la plus large possible afin de vérifier :

- le volume de la demande modélisée par grandes coupures¹⁰⁸ ou sur des axes particuliers jugés fondamentaux par rapport à la problématique de l'étude,
- la répartition du trafic entre les différents axes d'une coupure donnée.

Il faut éviter de choisir des points de comptage à proximité d'un centroïde car le comptage et le résultat du modèle peuvent très différents en ce point (l'injection d'un centroïde en un point sur le réseau est toujours réductrice par rapport à la réalité du stationnement dans la zone).

- (ii) Les coupures sont choisies en fonction de l'objectif du modèle :

- s'il s'agit d'un modèle global pour une agglomération, les coupures (ou lignes-écrans) seront choisies de manière à couvrir l'ensemble des flux, décomposés selon de grands secteurs géographiques :

Par exemple, pour l'Île-de-France, SETEC a pu contrôler l'adéquation entre débits comptés et reconstitués sur cinq coupures interceptant la Francilienne, six coupures interceptant A86, six coupures interceptant le boulevard périphérique (BP), afin de contrôler le trafic « radial ». Pour le trafic « tangentiel », un contrôle similaire a été effectué entre le BP et A86, entre A86 et la Francilienne, et à l'extérieur de la Francilienne sur le trafic coupant les grands axes autoroutiers (A1, A3, A4, A6, A10-A11, A13, A15). En outre, dans Paris intra-muros, a été vérifié le niveau du trafic franchissant la Seine.

- si la modélisation a un objectif plus restreint, comme par exemple l'évaluation du trafic sur un projet d'infrastructure, les coupures sont déterminées de manière à contrôler le trafic sur toute la longueur du projet et sur tous les axes concurrents.

- (iii) La procédure d'ajustement de la demande peut être **plus ou moins automatisée** selon les logiciels ; d'une manière générale, le principe est de considérer les sous-matrices OD du trafic franchissant chaque coupure et de les multiplier par le coefficient adéquat en minimisant la déformation globale (maximisation de l'entropie). Cette procédure permet théoriquement de reconstituer la meilleure matrice compte-tenu de l'information disponible. La procédure présente

¹⁰⁸ La procédure d'ajustement se fait parfois sur un ensemble de points de comptages quelconques

toutefois le risque de modifier substantiellement la structure de la matrice, de manière assez opaque lorsque tout est automatique ; c'est pourquoi, il faut contrôler le calage en flux OD par macro-zones issu d'enquêtes-ménages ou par interviews (voir chap. 3 § 3.4).

- (iv) L'équilibre entre les axes d'une coupure donnée peut résulter soit d'ajustements des caractéristiques du réseau (capacité, bonus autoroutier, vitesse) à condition qu'ils soient justifiables physiquement, soit en dernier recours d'un ajustement de la demande comme explicité au point (iii).
- (v) Le calage en débits passant en une heure donnée présente le risque de minorer la demande en masquant des phénomènes de congestion ; un débit horaire significativement inférieur à la capacité peut en effet être le résultat de la saturation de l'arc, le couple débit-vitesse réel se situant alors sur la partie basse de la courbe du même nom (cf. chap. 2, partie B, § 3.5). Si tel est le cas, le modèle ne sera pas ajusté correctement en temps de parcours et il conviendra alors d'arbitrer entre la qualité du calage en débit (qui peut être trompeuse) et celle du calage en vitesse. Il est également souhaitable d'éviter de retenir des postes de calage saturés (mais ce n'est pas toujours possible dans certaines agglomérations).
- (vi) Il est possible de fixer un seuil d'erreur pour évaluer la qualité du calage : écart absolu sur coupure et par poste à fixer en fonction du volume de trafic, ou écart relatif, par exemple moins de 10% d'écart (non systématiquement en plus ou en moins) sur les coupures et moins de 15% ou 20% sur chaque poste. Il faut cependant avoir en tête les éléments suivants :
- plus on s'impose un grand nombre de coupures et de postes, plus on fiabilise le modèle mais, en même temps, plus la tâche du modélisateur est difficile ;
 - les écarts relatifs sont plus adaptés aux grands volumes de trafic, alors que les écarts absolus sont plus adaptés aux petits volumes : si le modèle donne 150 véhicules/heure en un point où le comptage est de 100, l'écart sera de 50% et pourtant, il est correctement calé surtout si le volume des autres points de la coupure est significativement plus élevé ;
 - un calage peut toujours être amélioré, mais les contraintes de délai imposent de s'arrêter à un moment donné ;
 - la fiabilité des comptages est elle-même incertaine, surtout en ce qui concerne les postes non permanents ; ainsi, il peut arriver que des résultats d'affectation non concordants avec des comptages mettent en évidence des déficiences au niveau des compteurs ;
 - en règle générale, et sans que ceci constitue une vérité intangible, un calage peut donc être considéré comme correct par exemple si :
 - les écarts entre comptages et débit modélisés sont globalement faibles, (10-15% sur coupure, 20-25% par poste), non systématiquement dans le même sens, même si des écarts plus importants existent en certains points particuliers (dont le nombre n'excède pas 5% à 10% du total des postes servant au calage) ;
 - les phénomènes de saturation sont correctement reproduits.
- (vii) Si plusieurs tranches horaires sont modélisées pour reconstituer la journée, il faut vérifier que l'ensemble des calages permet bien de reconstituer le trafic journalier.
- (viii) Un souci de transparence doit guider le modélisateur. Toute étude de trafic devrait faire apparaître clairement la qualité des ajustements et signaler d'éventuels points faibles.

3.4 Le calage en flux origine-destination

(i) Rarement effectué, ce type de calage apparaît d'autant plus nécessaire que des procédures automatiques sont utilisées lors du calage en débit (voir le risque de déformation abusive de la matrice au § 3.3).

(ii) Ce type de calage concerne la vérification des volumes de flux entre macro-zones, les seuls réellement significatifs si l'on dispose d'une enquête-ménage (confrontation des matrices ajustées avec les matrices d'enquête-ménage) ou d'une enquête OD par interview (confrontation du chevelu¹⁰⁹ d'un arc avec les OD des matrices d'enquête par interview).

4. Le traitement des problèmes particuliers

4.1 La congestion

La reconstitution simultanée du débit et du temps de parcours est extrêmement difficile, voire impossible, en situation congestionnée du fait du caractère bi-univoque des courbes débit-vitesse modélisées (voir chap. 2, partie B, § 3.5). Certains artifices sont possibles, mais imparfaits :

- réduction de la capacité réelle au niveau du trafic passant en situation congestionnée (mais si la congestion disparaît, par exemple à la suite de la mise en service d'une infrastructure nouvelle, la voie considérée absorbera selon le modèle un trafic réduit par rapport à ce qu'elle peut réellement écouler) ;
- augmentation de la courbure de la courbe débit-vitesse (mais alors, le même réseau ne sera pas satisfaisant pour décrire par exemple la situation en heure moyenne; de surcroît, en cas de forte saturation, cette technique peut être insuffisante) ;
- introduction d'une pénalité de temps, mais il est impossible de prévoir son évolution dans l'avenir ;
- écrêtement de la demande (débit limité à la capacité) et calcul d'un temps d'attente¹¹⁰ : approximation relativement satisfaisante, mais qui présente l'inconvénient de ne pas faire apparaître la conservation du trafic aux nœuds (du moins dans sa mise en œuvre classique) ;
- report d'une partie de la demande sur l'heure suivante : le trafic qui ne peut s'écouler du fait de la saturation du réseau le fera dans la tranche horaire suivante.

La seule bonne solution pour reproduire les phénomènes de congestion consiste à utiliser un modèle dynamique, les seuls modèles dynamiques actuellement opérationnels faisant presque tous de la simulation microscopique (Vissim, DynaMIT, DynaSmart, Paramics, Integration, Matisse, Metropolis...), voir chap. 1 § 3.3.

4.2 Le traitement des poids lourds

(i) Les paramètres (facteur distance, valeur du temps, bonus-malus...) sont distincts de ceux des VP. Rappelons à ce sujet les valeurs préconisées par la Direction des Routes dans la circulaire d'octobre 1998 intitulée « Méthodes d'évaluation économique des investissements routiers en rase campagne » :

¹⁰⁹ Chevelu d'un arc : distribution géographique (OD et itinéraires) du trafic passant par cet arc

¹¹⁰ Sur certains logiciels seulement (Davis, Davisum)

	VL	PL
Valeur du temps (F94/heure/véhicule)	74 F/h (11,3€/h)	194 F/h (29,6 €/h)
Malus d'inconfort pour une route de 7m ordinaire (F94)	0,31 F/km (0,047 €/km)	0

Tableau 36 Valeurs du temps pour VL et VP

De plus, comme signalé au *chapitre 2*, les paramètres du réseau pour les PL sont généralement distincts de ceux pour les VL.

- (ii) L'affectation d'une matrice PL peut être réalisée de deux manières différentes :
- soit on considère que les PL s'affectent indépendamment des VP, et dans ce cas il est souhaitable d'affecter la matrice PL préalablement à celle des VP (préchargement PL),
 - soit on admet l'idée que PL et VP interagissant entre eux et il faut alors affecter les deux matrices simultanément ; certains logiciels permettent un tel équilibre « multiclasse ».
- (iii) Les PL peuvent être affectés soit en véhicules, soit en uvp (unités de véhicules particuliers).

4.3 Le préchargement du trafic local

Sur certains arcs du réseau existe un trafic purement local que le modèle sera incapable de décrire puisqu'il n'apparaît pas dans la matrice (trafic intrazonal).

Dans ce cas, les logiciels permettent généralement de précharger le réseau, de manière à tenir compte des réductions de capacité et de vitesse ainsi créées pour le trafic interzonal.

4.4 Les interactions VP/TC

(voir également *chap. 7 § 1.4*)

Un bus dans le flot de la circulation n'ira pas plus vite que les VP (et même moins vite du fait des arrêts et de ses caractéristiques mécaniques). Dans le cas où l'on modélise à la fois VP et TC, il est possible de tenir compte des interactions réciproques entre les modes :

- en préchargeant les bus sur le réseau VP,
- en déduisant la vitesse des bus de celle des VP.

4.5 L'analyse de carrefours

Il est souvent tentant pour un maître d'ouvrage de vouloir étudier un carrefour à l'aide d'un logiciel d'affectation ; l'inconvénient est que la plupart des modèles d'agglomération ne sont pas conçus pour ce degré de finesse : les flux interzonaux ne donneront qu'une idée approximative des mouvements tournants, souvent liés à des phénomènes locaux. Cette difficulté augmente sensiblement avec la taille du modèle.

4.6 L'utilisation des modèles de simulation dynamique¹¹¹ (ou de gestion de trafic)

Voir chap. 1 § 3.3

5. Pour en savoir plus

- **Affectation du trafic - Présentation économique des modèles et quelques aspects pratiques - Cours d'ingénierie du trafic**

Auteur : Simon Cohen

Éditeur : INRETS

Cours de l'ENPC présentant de façon synthétique les différents modèles d'affectation du trafic.

- **Network knowledge and route choice**

Sept.-01

Auteur : Michael Scott Ramming

Éditeur : Massachusetts Intitute of Technology

Cette thèse part de la constatation que, contrairement au postulat de la plupart des modèles d'affectation, la majorité des conducteurs ne minimise pas le temps ou la distance de son trajet. L'auteur tente ensuite d'expliquer le comportement réel des conducteurs par différentes modélisations.

- **Méthodes interactives de simulation – Aspects méthodologiques de la construction du jeu de simulation dans les enquêtes interactives – Comparaison de deux partis méthodologiques**

Déc.-95

Auteur : B. Faivre d'Arcier

Éditeur : INRETS

Cette étude s'intéresse à une famille d'enquêtes : les méthodes Interactives de Réponses Déclarées (IRD), qui correspondent à un dispositif d'enquête où les contraintes sont imposées, mais où les réponses comportementales sont libres. Le but de cette technique est d'identifier comment des attributs (et leurs niveaux) décrivant l'évolution des conditions environnantes vont ou non provoquer des changements, lesquels et pourquoi.

- **Manuels de l'utilisateur de TRIPS, EMME/2, DAVISUM, TRANSCAD**

¹¹¹ Ces modèles ne font pas partie du champ de ce manuel. Un ouvrage du Certu leur est consacré « Simulation dynamique du trafic routier », Certu, 2000, Lyon, 147 pages.

Chapitre 7. Affectations TC

Mots-clés :	
<u>TC</u>	<i>Transports en commun par opposition au transport en véhicule individuel (voiture ou moto personnelle) ; les taxis n'appartiennent pas aux transports en commun sauf dans des cas spécifiques où des taxis collectifs assurent une offre de transport public</i>
<u>Ligne</u>	<i>ensemble des véhicules assurant la desserte d'un itinéraire précis, caractérisée par un horaire de passage ou bien une fréquence de desserte et une vitesse commerciale</i>
<u>Mission</u>	<i>Liste d'arrêts desservis sur une ligne par un même véhicule : on aura par exemple sur une ligne des missions directes entre terminus et des missions omnibus desservant tous les arrêts.</i>
<u>Temps de trajet (ou temps à bord)</u>	<i>temps à l'intérieur du véhicule</i>
<u>Temps de parcours (porte à porte)</u>	<i>c'est le temps passé entre le moment où on quitte son lieu d'origine et où on arrive à sa destination finale ; ce temps inclut le temps passé pour se rendre à l'arrêt de TC le plus proche ou le mieux adapté, le temps d'attente, le temps de trajet (dans le véhicule TC), le temps de correspondance éventuel puis le temps pour se rendre du dernier arrêt de TC à sa destination finale.</i>
<u>Rupture de charge</u>	<i>correspondance entre deux TC</i>

1. Les familles de modèles existantes

1.1 Affectation et recherche des meilleurs itinéraires

Comme dans le cas de l'affectation VP, on peut distinguer pour l'affectation TC les procédures d'affectation proprement dite des procédures de recherche du ou des meilleurs itinéraires¹¹². Les particularités dans le cas TC viennent de la concurrence complexe qui peut exister entre lignes desservant des OD comparables avec des temps de parcours et des fréquences variés.

En effet, le rôle de l'affectation est de répartir sur l'ensemble des lignes et des tronçons du réseau TC les usagers selon le niveau de service offert. Cependant, il n'est pas toujours nécessaire d'identifier immédiatement la charge des lignes ou les montées-descentes aux arrêts : la modélisation du réseau de transport public peut être effectuée pour fournir dans un premier temps les éléments nécessaires à l'estimation

¹¹² Le terme d'itinéraire est souvent remplacé par le terme de chemin en référence aux procédures issues de la recherche opérationnelle pour le parcours de graphes et de réseaux.

du partage modal : coût généralisé de transport par les TC entre deux zones, distingué selon ses différentes composantes, nombre de ruptures de charge...

Cette dichotomie – affectation / recherche des meilleurs itinéraires – est rendue possible par le fait que les procédures d'affectation TC les plus utilisées sont rarement itératives : la congestion des lignes et son impact sur le calcul des coûts généralisés est plus difficile à modéliser que l'impact de la circulation VP sur les vitesses de déplacements, la notion de confort étant encore plus subjective que celle de temps de parcours.

1.2 Procédures de recherche des meilleurs itinéraires

Historiquement, de nombreuses procédures de recherche des meilleurs itinéraires ont été développées : en pratique, les différences entre ces différentes procédures proviennent avant tout des hypothèses faites sur le comportement de l'utilisateur, et de la manière dont elle peuvent reproduire les cas de concurrence complexe qui peuvent exister entre des lignes desservant des OD comparables avec des temps de parcours et des fréquences variées.

(i) Procédure de base dite du « Plus court chemin »

Dans cette procédure, il est fait l'hypothèse que tous les usagers qui voyagent entre une origine i et une destination j choisissent l'itinéraire qui minimise leur coût généralisé de déplacement..

Cette procédure est évidemment simpliste pour des réseaux urbains où certains corridors sont desservis par de nombreuses lignes : en effet, sur chaque tronçon, on ne prendra en compte qu'une ligne si plusieurs lignes desservent le tronçon, voire aucune si une ligne concurrente passant sur un autre tronçon est plus avantageuse. Au moment de l'affectation, cette méthode peut donc aboutir à l'absence de chargement de tronçons du réseau.

Lorsqu'il existe des troncs communs sur le réseau et que l'on souhaite utiliser une procédure de « plus court chemin », on recourt classiquement au codage de "lignes fictives" sur ces tronçons, qui cumulent les fréquences des différentes lignes. Dès lors et si le réseau est codifié de manière fine au niveau des arrêts et des lignes, la procédure de « plus court chemin » peut fournir de bons résultats.

(ii) Procédure de « Stratégie optimale »

Cette procédure peut être considérée comme une généralisation de la procédure précédente : un voyageur peut retenir un ensemble de chemins et utiliser les informations qu'il reçoit en cours de route pour décider quel chemin il va effectivement choisir.

En faisant l'hypothèse que l'utilisateur sait uniquement quelles lignes desservent un arrêt particulier, il est possible d'établir un ensemble de règles – une stratégie – lui permettant de voyager d'une origine i à une destination j . A chaque arrêt, la stratégie a pour objectif de définir un ensemble de lignes attractives pour le voyageur et pour chaque ligne attrayante l'arrêt de descente.

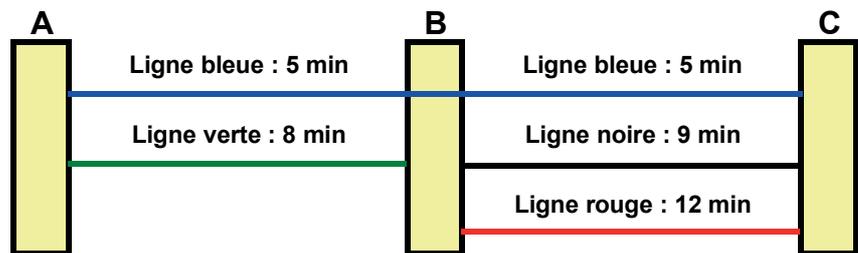
Pour définir l'ensemble des lignes attractives à un arrêt donné, on procède de manière itérative, une ligne étant ajoutée à l'ensemble des lignes attractives

uniquement si elle permet de réduire l'espérance du coût généralisé de cet arrêt jusqu'à la destination.

A l'inverse de la procédure du « plus court chemin », les chemins issus de la procédure de stratégie optimale peuvent présenter des branches : on parle alors parfois d'hyper-chemins.

On trouvera ci-après un exemple de stratégie optimale : dans cet exemple, nous considérerons pour simplifier la démonstration que la rupture de charge n'est pas pénalisée et que le paramètre de temps inter-fréquence est égal à $1/2$ ¹¹³.

Stratégie optimale pour aller de A à C



Temps inter-fréquence

Ligne bleue	30 min
Ligne verte	15 min
Ligne noire	5 min
Ligne rouge	5 min

Les éléments de base pour le calcul de la stratégie optimale sont

- Le temps d'attente au nœud i :

$$\frac{1/2}{\sum_{\text{Toutes les lignes attractives au nœud } i} \text{frequence}}$$

- La probabilité de quitter le nœud i par la ligne l :

0 si la ligne l n'est pas attractive

$$\frac{\text{frequence}_l}{\sum_{\text{Toutes les lignes attractives au nœud } i} \text{frequence}} \quad \text{si la ligne } l \text{ est attractive}$$

Pour trouver la stratégie optimale de A à C, on part du point C et on s'intéresse au nœud précédent, ici B.

Au nœud B :

¹¹³ Cf. chap. 2, partie B, § 4.3

1) Si l'on n'est pas déjà à bord d'un bus bleu et si les bus des trois lignes bleue, noire et rouge arrivent en même temps, c'est la ligne bleue qui permet de gagner C en un temps minimum ; la ligne bleue est donc la première des lignes attractives : l'espérance du temps de parcours est alors :

$$\frac{1/2}{1/30} + 5 = 20 \text{ min}$$

Si le bus de la ligne noire était arrivé en premier, le temps de parcours jusqu'à C aurait été de 9 min soit un temps inférieur aux 20 minutes de la ligne bleue. La ligne noire fait donc également partie des lignes attractives ; dès lors l'espérance du temps de parcours jusqu'à C est égale à :

$$\frac{1/2}{1/30+1/5} + \left(\frac{1/30}{1/30+1/5} \right) \times 5 + \left(\frac{1/5}{1/30+1/5} \right) \times 9 = 10.6 \text{ min}$$

Si le bus de la ligne rouge était arrivé en premier, le temps de parcours jusqu'à C aurait été de 12 min soit un temps supérieur aux 10,6 minutes calculé avec les lignes bleue et noire. La ligne rouge ne fait donc pas partie des lignes attractives au niveau du nœud B pour atteindre C.

2) Dans l'hypothèse où l'on se trouve déjà dans un bus de la ligne bleue, le temps de parcours pour gagner le point C est égal à 5 min si on reste dans le bus bleu et à 10,6 min si on descend pour changer de ligne : dans cette hypothèse, la stratégie optimale consiste à rester à dans le bus de la ligne bleue et à ne descendre qu'au nœud C.

Au nœud A :

Si les bus des lignes bleue et verte arrivent en même temps, on arrivera au nœud C en $5 + 5 = 10$ min par la ligne bleue et en $8 + 10,6 = 18,6$ min par la ligne verte avec un changement au nœud B. La première des lignes attractives est donc une nouvelle fois la ligne bleue et l'espérance du temps de parcours est alors :

$$\frac{1/2}{1/30} + 10 = 25 \text{ min}$$

Cependant, si le bus de la ligne verte était arrivé le premier, l'espérance du temps de parcours aurait été de 18,6 min ce qui est inférieur aux 25 min calculées précédemment. La ligne verte avec changement en B fait donc également partie des lignes attractives. L'espérance du temps de parcours est alors :

$$\frac{1/2}{1/30+1/15} + \left(\frac{1/30}{1/30+1/15} \right) \times 10 + \left(\frac{1/15}{1/30+1/15} \right) \times 18.6 = 20.7 \text{ min}$$

En résumé, la stratégie optimale pour aller de A à C conduit à prendre la ligne bleue de bout en bout ou bien la ligne verte en changeant au nœud B. L'espérance du temps de parcours est de 20,7 minutes.

On notera ici que les procédures de stratégie optimale sont très sensibles à la qualité de la codification du réseau et à l'introduction d'une nouvelle offre qui peut faire disparaître une ou plusieurs lignes de la liste des chemins optimaux : l'impact d'une modification d'offre peut ainsi être exagérément amplifiée par la procédure retenue.

(iii) Autres types de procédures

Il existe d'autres types de procédures qui dépendent souvent du logiciel employé alors que la procédure de stratégie optimale est généralement implantée de manière analogue dans les différentes boîtes à outils de planification multimodale disponibles sur le marché.

On citera à titre d'exemple la procédure « Pathfinder » disponible au sein du logiciel TransCad ; cette procédure à chemins multiples a pour caractéristique de combiner les caractéristiques des différentes lignes de TC empruntant le même tronçon même dans les cas non triviaux (politiques d'arrêts différentes, chemins empruntant des points de correspondance,...). La procédure prépare tout d'abord le réseau TC en combinant certaines lignes sur certains tronçon tout en respectant différents critères (par exemple l'impédance d'un tronçon combiné ne peut pas représenter plus d'un certain pourcentage de l'impédance du meilleur itinéraire d'origine à destination) : une fois le réseau préparé, la procédure détermine les différents chemins possibles.

On citera également la procédure de recherche déterministe ou encore « à horaire » disponible au sein des logiciels Emme/2, Davisum ; cette procédure mise en œuvre sur de nombreux sites internet de recherche d'itinéraires (par exemple Le Pilote à Marseille¹¹⁴) permet de rechercher le chemin optimal lorsque l'ensemble des horaires TC est connu. On peut ainsi imposer l'heure de départ ou d'arrivée. Cette procédure est bien adaptée à des réseaux interurbains où les fréquences sont faibles ou irrégulières mais est bien sûr très lourde à mettre en œuvre sur des réseaux urbains de grande taille puisqu'elle implique la codification totale de l'horaire. De même, en situation future, il peut être très difficile d'avoir une idée de la grille horaire alors qu'il sera toujours plus facile de faire des hypothèses de fréquence et de temps de parcours qui suffisent pour mettre en œuvre les autres procédures.

Enfin, on peut citer la procédure consistant, à partir du réseau et des centroïdes, à créer un graphe de " connectivité " ; à savoir pour chaque ligne du réseau, on détermine quelles sont les zones et les autres lignes qui y sont connectées, et à quel nœud de la ligne s'établissent ces connections. A partir de ce graphe, on établit pour chaque ligne les liaisons centroïde à centroïde sans correspondance, avec une correspondance, avec 2 correspondances...Sont gardés les chemins dont le temps maximum est une fonction du temps sur le chemin le plus court

¹¹⁴ www.lepilote.com

($t < t_{min} * a + b$) La probabilité d'emprunter une ligne parmi plusieurs desservant les mêmes itinéraires se fait au prorata des fréquences.

1.3 Procédures d'affectation

Elles découlent directement des méthodes utilisées pour rechercher les itinéraires mais d'autres méthodes directement inspirées des modèles d'affectation VP peuvent aussi être utilisées.

(i) Affectation en tout ou rien « plus court chemin »

La demande sur une relation est affecté dans sa totalité au meilleur itinéraire. Pour des réseaux complexes avec présence de corridors TC, cette procédure est peu pertinente sauf lorsque l'on code des « lignes fictives » cumulant les fréquences des différentes lignes. La répartition des trafics entre les lignes peut alors être effectuée au prorata des fréquences ou sur la base de calculs plus élaborés (Cf (iv) ci-après).

(ii) Stratégie optimale classique

Dans le cas de la stratégie optimale, la demande est répartie au prorata des fréquences des lignes attractives aux différents nœuds qui appartiennent à l'hyper-chemin. A l'inverse de la procédure de construction des chemins qui se fait de destination à origine, l'affectation progresse nœud à nœud d'origine à destination. On remarquera cependant que l'affectation ne prend pas en compte les temps de parcours des différentes branches de l'hyper-chemin.

(iii) Affectation d'équilibre

On peut également envisager d'utiliser une procédure d'affectation à l'équilibre analogue dans son principe à celle utilisée pour les VP : on fait alors intervenir dans le calcul de l'impédance des éléments variables en fonction du trafic : il s'agit principalement de la charge de la ligne sur un tronçon¹¹⁵ et de l'effet des montées/descentes au niveau d'un arrêt¹¹⁶.

Enfin, de même que dans le cas des affectations VP, la procédure d'équilibre peut intégrer une dimension stochastique. Dans ces conditions, un terme d'erreur est ajouté à la fonction d'impédance sur chaque tronçon et éventuellement à la fréquence des lignes. Selon la forme des fonctions d'erreur (Gumbel ou normale), les usagers sont répartis sur différents itinéraires d'impédance proche selon des lois logit ou probit.

Notons enfin que certains logiciels proposent des procédures d'équilibre limitées à un sous-réseau résultant d'une procédure de stratégie optimale : l'affectation sur les différents chemins n'est plus limitée au terme de fréquence,

¹¹⁵ Plus une ligne est chargée et plus les usagers auront tendance à utiliser une autre ligne : il s'agit d'une prise en compte de la congestion mais contrairement aux courbes débit/vitesse les données disponibles pour ajuster les courbes débit/niveau de confort sont plus difficile à trouver. TransCAD permet ainsi d'utiliser des courbes de type BPR avec une valeur par défaut des paramètres qui n'a pas été confrontée à l'observation.

¹¹⁶ Au niveau d'un arrêt, les temps de montée et de descente peuvent varier avec le nombre d'usagers. On peut dans ce cas plus facilement que dans le cas de la congestion en ligne effectuer des mesures sur le terrain pour étalonner une loi de chargement et de déchargement d'un bus.

mais prend en compte les différentes composantes du temps de parcours selon une procédure d'équilibre.

(iv) Autres types de répartition

Comme on l'a vu précédemment, la procédure d'affectation en stratégie optimale classique ne répartit les usagers selon les différentes branches de l'hyper-chemin que sur la base des fréquences des lignes TC ; ce mode de répartition n'est pas complètement satisfaisant pour des modes où le temps de transport de porte à porte est l'un des paramètres clé du choix des usagers. Si on dispose de différents itinéraires TC intéressants élaborés sur la base d'une procédure de stratégie optimale ou d'une autre procédure¹¹⁷, on peut envisager de répartir la demande entre ces itinéraires sur la base d'une fonction de l'impédance (affectation multi-chemins) : il peut s'agir d'une répartition au prorata de l'inverse des coûts généralisés ou encore d'une formulation logit faisant intervenir les coûts généralisés ou leurs différences. Il s'agit ici de procédures analogues à celles mises en œuvre pour l'étude du choix modal et qui nécessitent le même type d'ajustements.

Exemple de répartition entre lignes : départs non coordonnés et usagers connaissant bien le réseau TC

Lorsque l'on fait l'hypothèse que les départs de chaque ligne ne sont pas coordonnés et que les usagers disposent d'une bonne information sur le réseau de TC (en particulier, le temps de trajet restant par chaque ligne pour gagner la destination est connu), il est possible d'utiliser une procédure de répartition analogue à celle permise par le logiciel VIPS II.

Quand plusieurs lignes sont attractives, la part de marché de la ligne i est fournie par la formule suivante :

$$P_i = \int_0^{H_i} \left(\frac{1}{H_i} \right) \prod_{j=1, j \neq i}^K \left(1 - \min \left(1, \max \left(\frac{x_i + W(r_i - r_j)}{H_j}, 0 \right) \right) \right) dx_i$$

$j = 1 \dots i \dots K$: indice de ligne,

H_i : temps entre deux dessertes pour la ligne i ,

x_i : la variable d'intégration (le temps jusqu'à l'arrivée de la ligne i ($0 \leq x_i \leq H_i$),

r_i : le temps restant jusqu'à la destination après être monté dans un véhicule de la ligne i ,

W : l'inverse de la pondération utilisée pour le temps d'attente (Cf § 2.3).

Lorsque plus de deux lignes sont en concurrence, on utilise une approximation de l'intégrale précédente.

¹¹⁷ Procédure manuelle dans des cas très simples ne nécessitant pas forcément la mise en œuvre d'un outil de planification

On peut encore citer la procédure consistant, à partir du réseau et des centroïdes, à créer un graphe de « connectivité » (voir §1.2).

On trouvera ci-dessous un tableau récapitulatif avantages-limites des principales procédures d'affectation : les bons logiciels de planification proposent généralement au moins deux ou trois types de procédures : il appartient alors au modélisateur de choisir celle qui est la plus adaptée à son problème.

Procédure	Principe comportemental	Avantages	Limites
Tout ou rien	Pour chaque OD, les usagers choisissent un chemin unique.	-simplicité	-peu réaliste sur des réseaux maillés, sauf si le zonage est très fin, et sur des tronçons empruntés par plusieurs lignes, sauf si on effectue sur ces tronçons la codification de lignes fictives
Stratégie optimale classique	Pour chaque OD, les usagers se répartissent sur un ensemble de chemins et chacun définit son itinéraire au fur et à mesure de son trajet.	-assez généralement disponible dans les logiciels, -adaptée pour des réseaux maillés. -permet d'identifier et de suivre les chemins.	-répartition selon la fréquence insuffisante si les temps de parcours sont très différenciés -très sensible à la codification et aux modifications d'offre
Stratégie optimale «améliorée»	Contrairement à la stratégie optimale classique, le choix entre les lignes attractives fait intervenir d'autres paramètres que la fréquence.	-répartition qui prend également en compte les temps de parcours, -adaptée pour des réseaux maillés. -permet d'identifier et de suivre les chemins.	-nécessite une bonne compréhension de la loi de répartition entre les chemins. -très sensible à la codification et aux modifications d'offre
Procédures d'équilibre	Pour chaque OD, les usagers incluent une préférence pour le confort et les lignes moins chargées dans leur choix d'itinéraire.	-intéressant pour des réseaux où la problématique de la congestion est importante.	-difficulté à calibrer les lois utilisées par la procédure d'équilibre.
Procédure déterministe à horaires	L'utilisateur connaît les horaires précis des différentes lignes, et calcule l'itinéraire le plus rapide en fonction de son heure de départ.	-adapté à des réseaux interurbains où les fréquences sont faibles ou irrégulières -plus utilisé pour de l'information multimodale que pour la planification TC.	-très lourd à mettre en œuvre pour des gros réseaux urbains, -horaire futur difficile à élaborer,

Tableau 37 Récapitulation des différentes méthodes d'affectation TC

1.4 Interactions avec les modèles VP

Elles sont de deux ordres : aide à la codification du réseau de TC et échange d'informations pour le calcul des impédances.

(i) Aide à la codification

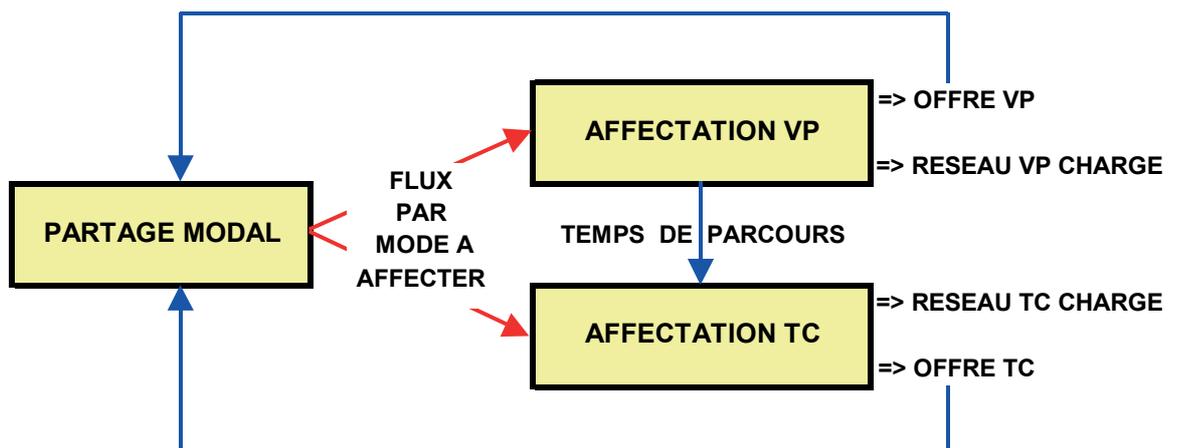
Lorsque l'on codifie un réseau TC, il est nécessaire de raccorder les centroïdes de zones aux différents arrêts du réseau TC. Si le réseau de voirie VP a été codifié précédemment sur la base d'un SIG suffisamment détaillé, le logiciel peut bâtir automatiquement les cheminements piétonniers ou les rabattements en véhicule individuel vers les différents arrêts en suivant la voirie, ce qui évite la codification de connecteurs spécifiques au réseau TC.

(ii) Échanges d'informations pour le calcul des impédances

Les données de vitesses sur la voirie issues d'une affectation des flux VP peuvent être utilisées dans le calcul de l'impédance des différentes lignes TC ; le temps de trajet des bus en section est déduit de celui de l'ensemble du trafic et permet de tenir compte de l'impact de la congestion de la voirie pour les modes de surface.

Dans la pratique, les vitesses des TC sont déduites des vitesses VP par l'application d'un pourcentage¹¹⁸ qui doit tenir compte de la nature des tronçons de voirie (existence ou non de site propre) et des arrêts non codifiés dans le réseau : les vitesses commerciales des TC souvent disponibles auprès des exploitants tiennent en effet compte des temps d'arrêts qui ne sont pas modifiés par la vitesse de circulation sur les tronçons.

De manière générale, ces procédures ne sont pas automatiques et s'il est assez facile d'importer les données de vitesses VP dans le réseau TC, il est ensuite nécessaire d'élaborer manuellement les calculs permettant d'en déduire les temps de trajet des bus en section.



On notera que cette procédure est itérative : en effet, une fois les deux affectations VP et TC réalisées, on dispose, en plus des flux sur les réseaux

¹¹⁸ Pour la situation future, on peut également appliquer un coefficient traduisant l'évolution des vitesses VP entre l'année de référence et l'horizon de prévision : cette méthode est plus simple mais sous-entend que les conditions de circulation des TC sur la voirie sont identiques entre les deux horizons ce qui est rarement le cas lorsque l'on cherche à améliorer un réseau (création de site propre, priorité TC aux feux...)

chargés, de l'ensemble des paramètres d'offre qui interviennent dans la procédure de choix modal. Ces nouveaux paramètres permettent une nouvelle répartition VP/TC de la demande globale de déplacements qui est suivie par de nouvelles affectations. Le critère de convergence de la procédure est alors une fonction des écarts de trafic entre deux itérations en différents points clés des réseaux.

1.5 Contraintes techniques et financières

Les contraintes techniques et financières de la problématique TC concernent d'une part la demande et d'autre part la codification de l'offre.

- (i) La connaissance de la demande de déplacements utilisant les TC a été abordée par ailleurs mais il est important de rappeler que contrairement à la problématique VP où, compte tenu de l'isotropie de la demande, les modèles classiques de génération-distribution peuvent permettre d'estimer la demande de manière relativement satisfaisante, le cas de la demande TC nécessite de disposer à la base de données plus précises. L'offre TC qui est souvent très différenciée par relation a un impact direct sur la demande, mais des paramètres tels que les conditions de rabattement ou le confort sont également déterminants sans toujours être faciles à qualifier. Il est donc important de disposer de données d'enquêtes ménage ou d'enquêtes OD sur le réseau TC, ce qui n'est pas toujours facile lorsque les budgets sont limités ou les délais d'études très courts.
- (ii) La codification de l'offre est ensuite un point déterminant de la modélisation TC. La première question à se poser concerne la façon d'aborder l'offre : est-il important de travailler sur la base d'horaires ou l'utilisation de fréquences et de temps de parcours est-elle suffisante ?
- (iii) L'utilisation d'horaire est très lourde sur des réseaux importants et plutôt recommandée en interurbain ou lorsque les dessertes sont irrégulières. Elle peut cependant être facilitée par le fait qu'il est parfois possible de trouver auprès des exploitants l'horaire sous forme informatique que l'on peut alors importer plus ou moins facilement dans l'outil de planification. Il ne faut cependant pas oublier que les tests de nouveau scénario de desserte TC nécessitent par la suite de redéfinir un horaire complet ce qui constitue une tâche très lourde et une étude en soi.
- (iv) Il est donc en général plus facile de travailler sur la base de fréquences par lignes et de vitesses commerciales par tronçon. Mais même dans ce cas, le recueil de données pour constituer le réseau est très important et variera selon le degré de détail de l'étude et la finesse géographique souhaitée.

Si on souhaite principalement disposer de charges par tronçon dans une problématique assez globale de la desserte TC, il peut être suffisant de se limiter aux arrêts et aux lignes principales : des paramètres tels que les rabattements entre les centroïdes et les arrêts ou les temps de changement peuvent alors être estimés de manière forfaitaire. Par contre, si on doit mettre en œuvre un modèle traitant l'accessibilité TC à un niveau fin avec une estimation détaillée des montées/descentes par arrêt, il est nécessaire d'apporter un plus grand soin à tous les aspects de l'offre TC. Des mesures sur le terrain de temps d'accès ou de temps de correspondance sont parfois nécessaires, de même qu'une vérification

in situ des vitesses commerciales. De plus, la tarification peut dans le cas de chaînes multimodales¹¹⁹ devenir très compliquée à intégrer.

Dans le cas des TC, il est donc avant tout nécessaire de très bien identifier dès le départ les objectifs de l'étude et le niveau de détail des résultats attendus : cette phase est encore plus fondamentale que dans le cas de la VP car les paramètres des réseaux TC sont bien plus nombreux et bien plus complexes à déterminer que ceux des réseaux de voirie. Une mauvaise estimation de la charge de travail à allouer à la codification serait préjudiciable au bon déroulement de l'étude.

2. Le paramétrage des modèles

2.1 Temps de parcours

voir chapitre 2 "Zonage et réseaux", partie B, § 1.2.

2.2 Tarification

Lorsque l'on effectue des études TC, la tarification n'est pas toujours l'un des éléments clés de l'analyse. En effet, parfois le prix d'un trajet sur l'ensemble de l'agglomération est identique quel que soit les lignes utilisées et n'est plus un élément de choix d'itinéraire alors que le temps de parcours reste toujours une préoccupation majeure de l'utilisateur.

La tarification est donc véritablement utile lorsque des problématiques d'évolution de la demande ou de choix modal entrent en ligne de compte : il peut s'agir de choix entre la VP et les TC mais également de choix entre modes TC (tramway, bus, métro...) lorsque leurs tarifications sont différentes.

(i) Tarification de base

Les types de tarifications des systèmes de TC sont multiples et souvent complexes. L'outil utilisé pour les affectations doit donc être le plus souple possible de manière à reproduire au mieux le mode de tarification effectif.

On recense au moins 5 types de tarification envisageables :

- Tarif unique : c'est le cas de beaucoup de réseaux de province où un ticket permet de se déplacer sur l'ensemble du réseau. La tarification peut être unique au niveau d'une ligne, d'un mode (cas du métro parisien) ou encore de manière générale.
- Tarification zonale complète : le prix à payer est lié au couple origine/destination, quel que soit le nombre de lignes et de modes utilisés : c'est ce qu'on retrouve en Île-de-France avec la carte orange et ses zones concentriques.
- Tarification zonale par mode : comme précédemment, le prix est lié au couple origine/destination mais dépend du mode ou de la ligne employée. C'est le cas lorsque plusieurs réseaux cohabitent sans intégration des systèmes tarifaires.

¹¹⁹ Selon les modes et le type de tarif utilisé, la correspondance peut être ou non payante : par exemple à Marseille, les usagers disposant d'abonnement de travail SNCF n'ont pas à payer le trajet bus en correspondance à la descente du train.

- Tarification temporelle : il s'agit d'un tarif unique mais limité dans le temps; la période d'utilisation peut être modulée selon les heures de la journée (une heure en période de pointe, deux heures en période creuse).
- Tarification mixte : c'est ce qu'on observe souvent dès que le système de TC est étendu et complexe : certaines portions du réseau utilisent la tarification unique, d'autres la tarification zonale. Par souplesse, il est donc très souhaitable que le logiciel de planification utilisé soit capable de mettre en œuvre des tarifications mixtes.

(ii) Tarification des correspondances

La tarification des correspondances est un élément important du système de tarification global. Il conviendra d'analyser dans chaque cas quelles sont, dans la pratique, les modalités de prise en compte des correspondances et comment les intégrer au mieux au modèle, tout en gardant bien à l'esprit le type de résultats attendus. Certaines situations peuvent être très compliquées à reproduire, et il faut alors se demander s'il est vital pour l'étude de tenir compte de ce cas spécifique.

Parmi les modes de tarification des correspondances, on peut citer :

- Correspondances payantes : changer de ligne ou de mode impose de payer à chaque fois que l'on entre dans un nouveau véhicule.
- Correspondances gratuites¹²⁰ : on peut effectuer un certain nombre de correspondances sans payer à nouveau lorsque l'on change de ligne ou de mode.
- Correspondance à prix réduit : lorsque l'on change, on a droit à une réduction sur le tarif du nouveau mode ou de la nouvelle ligne.

On remarquera que la politique de tarification des correspondances et les différents modes de tarification générale peuvent interférer de manière non triviale : il est donc absolument nécessaire de bien comprendre les règles de préséance des différentes options de tarification de l'outil de planification lorsque l'on entreprend la codification de la tarification du système.

Complexité de la tarification sur le corridor Marseille-Aubagne-La Ciotat

A Marseille, le réseau de transport urbain (RTM) dispose d'une tarification unique avec correspondances gratuites. Aubagne dispose pour son réseau de bus d'une tarification unique avec correspondance payante. Il en est de même avec La Ciotat qui dispose de sa propre tarification unique. Les lignes TER sur le corridor disposent de la tarification kilométrique SNCF, c'est-à-dire d'une tarification zonale limitée au mode train. De plus entre Marseille et Aubagne, il existe une desserte par bus rapide avec son propre tarif.

Il n'existe pas aujourd'hui de tarification multimodale intégrée sur l'ensemble de l'agglomération mais plusieurs offres limitées et expérimentations sont en cours.

¹²⁰ Au niveau du logiciel de planification, on renseigne le nombre de correspondances gratuites possibles pour un trajet ; il en est de même pour les correspondances à prix réduit avec en plus le taux de réduction.

Une tarification combinée réseau urbain + abonnement de travail ou étudiant SNCF est proposée sur La Ciotat (utilisation avec le même titre de transport du réseau TER et du réseau urbain de La Ciotat avec réduction pour le parcours urbain). D'autre part, sur Marseille-Aubagne, l'expérimentation Stradivarius est en cours : elle consiste à fournir un titre unique pour l'utilisation combinée du réseau urbain Aubagnais, du réseau urbain de la RTM et du TER ou de la navette entre les deux réseaux.

Hors tarification combinée, le système de tarification globale peut être reproduit assez simplement avec les différentes options de base de codification fournies par les outils de planification (tarification unique avec et sans correspondance gratuite, tarification zonale par mode). Si l'on veut intégrer les tarifications combinées, il n'est pas évident de pouvoir transcrire automatiquement la complexité de la tarification avec l'outil de planification. Il sera alors nécessaire de construire une matrice de tarifs prenant en compte les spécificités de chaque couple – origine destination avec l'enchaînement des modes utilisés.

(iii) Abonnements et tarifs particuliers

L'ensemble des remarques faites jusqu'à présent sur la tarification se complique encore avec la prise en compte des abonnements et des tarifs spécifiques (tarifs pour les jeunes, pour les personnes âgées...). En effet, le niveau et le type de tarification de base ainsi que la tarification des correspondances sont souvent distingués par segment de clientèle.

Si l'on dispose de matrices de demande par segment de clientèle, on peut effectuer les affectations de manière distincte pour chaque segment en utilisant le tarif le plus approprié. Dans la pratique, une distinction selon trois grands segments - Domicile-travail, domicile-étude et autres déplacements – permet d'affiner la question de la prise en compte des tarifs de manière relativement simple.

Si la demande ne peut être distinguée par segment de clientèle, il faudra dans la mesure du possible établir des tarifs unitaires moyens et des types de tarifications simplifiés qui seront utilisés pour la modélisation : ce travail peut être fait en utilisant les données de vente de billets par titre de transport fournies par l'exploitant, ainsi que la part des voyages gratuits qui peut représenter une part substantielle des déplacements en TC - jusqu'à la moitié sur certains réseaux.

2.3 Élaboration de la fonction d'impédance

Comme on l'a indiqué en tête de chapitre, la fonction d'impédance est l'indicateur d'offre TC utilisé lors de la recherche des itinéraires et de l'affectation ; il s'agit d'un coût ou d'un temps généralisé dont la construction repose sur les différents attributs d'offre – temps et tarif –, sur la valeur du temps et sur différentes pondérations fixés par l'utilisateur. On peut dans certains cas utiliser des paramètres supplémentaires

comme des bonus/malus pour prendre en compte un paramètre d'offre non traduit par les variables codifiées dans le modèle¹²¹.

(i) Valeurs du temps
Voir chap. 6 § 2.2

(ii) Pondérations et bonus/malus
Une fois que la valeur du temps a permis de transformer les différents éléments monétaires en temps équivalents (on se place ici dans l'hypothèse d'une impédance en temps généralisé), les différentes composantes de l'offre doivent être combinées.

Il s'agit classiquement d'une combinaison linéaire dont les pondérations sont fixées par l'utilisateur. Ces pondérations traduisent le fait que les durées des différentes parties du déplacement (accès au réseau, temps d'attente, temps de correspondance, temps à bord, trajet jusqu'à la destination) ne sont pas forcément ressenties de la même manière par l'usager.

Il est ainsi habituel de pénaliser les temps d'attente en leur attribuant une pondération de 2 par rapport au temps à bord d'un véhicule ; en période de congestion importante, le temps à bord peut également voir sa pondération passer de 1 à 1,5. Les temps d'accès à pied ou en voiture peuvent également être pénalisés par rapport au temps à bord par un coefficient de l'ordre de 1,5 ou 2.

L'une des techniques classiques pour estimer ces pondérations consiste à effectuer une enquête de préférences déclarées¹²² de manière à établir des équivalents-temps ou équivalents-coûts qui seront analysés et intégrés à la fonction d'impédance.

L'exemple qui suit correspond à l'élaboration de bonus tramway par rapport aux anciens bus du réseau : l'analyse des résultats de l'enquête préférences déclarées a permis de moduler les pondérations utilisées selon qu'il s'agit du bus ou du tramway.

Élaboration d'un bonus tramway

Il est très probable que le tramway est, à temps de parcours égal, plus attractif que le bus, et ce pour au moins trois raisons :

- *l'image: un tramway apparaît comme plus moderne et plus attrayant qu'un bus, surtout si celui-ci est ancien,*
- *le confort : le tramway possède plus de places assises qu'un bus, les accélérations et le freinage sont moins violents et donc moins désagréables pour les passagers voyageant debout,*

¹²¹ La problématique d'affectation peut rejoindre ici la problématique de partage modal ; lorsque différents modes TC sont en concurrence, on peut envisager de traiter le problème au niveau du calcul du partage modal dans le cas d'un nouveau mode TC offrant une alternative spécifique se démarquant fortement de l'offre TC existante (par exemple lors de l'introduction d'un métro ou d'un tramway dans une agglomération où ne circulent que des bus).

¹²² On peut également avoir recours à d'autres types d'enquêtes spécifiques pour infirmer ou confirmer les valeurs des pénalités en comparant par exemple des lignes concurrentes aux caractéristiques différentes.

- *la régularité : un tramway en site propre devrait pouvoir respecter la fréquence théorique, et donc l'écart type du temps d'attente d'un tramway sera beaucoup plus faible que celui d'un bus noyé dans la circulation automobile.*

La difficulté pour le modélisateur est de quantifier ce bonus; il existe peu de travaux de recherche sur le sujet.

Toutefois, la RATP a procédé en 1999 à une étude sur l'irrégularité des bus à fréquence (intervalle inférieur à 10/12 min) et la perception qu'en ont les voyageurs. Cette étude, réalisée sur la base d'une enquête de préférences déclarées, fournit des informations qualitatives et quantitatives intéressantes :

Informations qualitatives :

- *l'irrégularité perçue est liée à l'aléa de passage des bus, mais aussi, dans une moindre mesure, à l'aléa d'arrivée des voyageurs;*
- *la perception de l'irrégularité échappe à la segmentation selon le type de déplacement;*
- *le "poids" de l'irrégularité équivaut à la moitié de celui de l'attente;*
- *les "poids" relatifs de l'attente et du temps de parcours varient en fonction du confort; l'aléa de temps de parcours à bord du bus n'est que faiblement perçu;*
- *intervalle, irrégularité, charge, vitesse sont indissociables dans la perception du temps de déplacement.*

Informations quantitatives :

En prenant pour base le temps de trajet assis, l'étude a permis d'obtenir le tableau d'équivalence ci-après :

Temps d'attente	Ecart-type du Temps d'attente	Temps de trajet assis	Temps de trajet debout	Temps de trajet debout serré	Ecart-type du Temps de trajet
2,0	1,0	1,0	1,3	1,9	0,2

Source: RATP

Compte tenu de l'aléa d'arrivée des voyageurs, estimé à 57% du demi-intervalle, les calculs effectués par la RATP montrent que, par rapport à une ligne parfaitement régulière, l'irrégularité majeure le temps d'attente global perçu de près de 30% sur une ligne d'irrégularité moyenne et de plus de 80% sur une ligne de très forte irrégularité.

Pour tenir compte de la plus grande régularité du tramway et également de l'amélioration des conditions d'attente (abris, Système d'Information des Voyageurs) on pourra minorer le coefficient de pénalité d'attente par rapport à celui appliqué aux bus: 1,5 pour le tramway contre 2,0 pour les bus.

Par ailleurs, pour tenir compte de l'amélioration prévisible du confort à l'intérieur des véhicules, il serait logique d'appliquer des coefficients différents au temps de parcours effectif selon que l'on est en bus ou en tramway ; par exemple un coefficient de 1,10 à 1,30 pour les bus contre 1,0 pour le tramway.

(iii) Exemple de calcul de la fonction d'impédance

Comme on l'a vu, il y a autant de fonctions d'impédance que de procédures d'affectation ; afin d'illustrer le propos, nous nous plaçons ici dans le cas d'une affectation simple sans stratégie optimale et sans procédure d'équilibre. Le coût généralisé C_k sur un chemin k est donné par la formule suivante :

$$C_k = \sum_{j \in J} [r_j + VdT \times (px \times x_j + pw \times w_j)] + \sum_{i \in I} [VdT \times (pd \times d_i + pt \times t_i)] + \sum_{n \in N} VdT \times pa \times a_n$$

avec :

J : ensemble des lignes de TC utilisées par le chemin k ,

j : indice d'une ligne TC appartenant à J ,

I : ensemble des tronçons TC utilisés par le chemin k ,

i : indice d'un tronçon TC appartenant à I ,

N : ensemble des tronçons de rabattement utilisés par le chemin k ,

n : indice d'un tronçon de rabattement appartenant à N ,

r_j : tarif pour la ligne j ,

x_j : temps de changement pour la ligne j ,

w_j : temps d'attente pour la ligne j , (Cf formule au chap. 2 § 1.3),

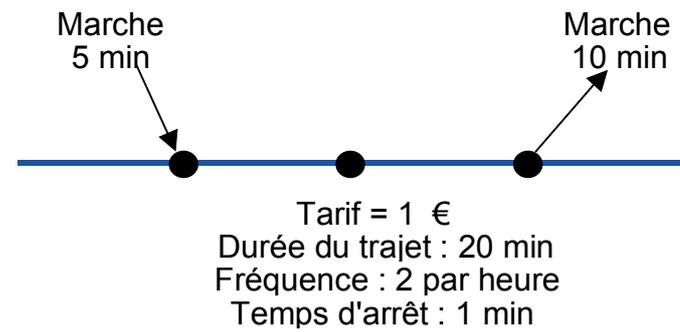
d_i : temps d'arrêt pour le tronçon i ,

t_i : temps à bord pour le tronçon i ,

a_n : temps de rabattement pour le tronçon n ,

VdT : valeur du temps.

px , pw , pd , pt et pa : pondération associées aux différentes composantes du temps

Application numérique : (valeur du temps = 9,1 €/h soit 0,152 €/min)

$$w = 0.5 \times 30 = 15 \text{ min avec } pw = 2,$$

$$d = 1 \text{ min avec } pd = 1,$$

$$t = 20 \text{ min avec } pt = 1,$$

$$a = 15 \text{ min avec } pa = 1.5$$

$$C = 1 \text{ €} + (2 \times 15 + 1 \times 1 + 1 \times 20 + 1.5 \times 15) \times 0,152 = 12,2 \text{ €}$$

3. Le calage des modèles

3.1 Les différents types de calage

La procédure de calage consiste à vérifier que le modèle reproduit bien le fonctionnement du système de TC. Si ce n'est pas le cas, il faudra affiner la codification du réseau et/ou modifier la procédure d'affectation : on peut ainsi envisager d'ajuster les pondérations des différentes composantes du temps de parcours ou bien encore plus radicalement changer de procédure s'il s'avère que celle-ci n'est pas capable de reproduire correctement le comportement du réseau étudié. La procédure de calage procède de l'interprétation des différentes données de calage.

(i) Calages en débit par tronçon de réseau

Il s'agit du calage le plus répandu : on vérifie que l'on reproduit bien les flux observés dans les TC sur différents tronçons clé du réseau : cette procédure nécessite de disposer de données de fréquentations issues de comptages ou d'enquête OD.

Si on désire s'ajuster sur de nombreux tronçons clé (de 10 à 20 par exemple), on peut imposer que l'ensemble des déplacements qui empruntent ces tronçons ne s'écarte pas de plus de 5 à 10% des déplacements observés. On peut de plus imposer que sur un tronçon isolé dont le trafic est important, l'écart observé/calculé ne dépasse pas 10 à 20%.

- (ii) Calages en débit au niveau des arrêts : montées/descentes
Si le niveau d'analyse est plus fin et que l'on s'intéresse également aux montées/descentes, on peut vérifier les montées/descentes à certains arrêts du réseau. Les critères de validation sont alors analogues à ceux des flux sur les tronçons.
- (iii) Calages en temps de parcours
Alors que les temps élémentaires (temps d'arrêt, temps de trajet dans les véhicules, temps d'arrêt aux stations) sont des données d'entrée du modèle, la reconstitution du temps de parcours porte à porte par le modèle constitue une donnée de calage.

Ce type de calage nécessite de disposer de données observées de temps de parcours sur certaines relations clés, ce qui sous-entend un recueil de données sur le terrain (par exemple par des bus équipés). Les exploitants disposent généralement des vitesses commerciales de chaque ligne.
- (iv) Calages en taux de correspondance
Via des enquêtes, les exploitants disposent généralement à la fois du nombre de montées et du nombre de déplacements, le rapport entre les deux donne le taux de correspondance global. De plus, lorsqu'une enquête OD TC a été effectuée, on dispose généralement pour les arrêts importants de taux de correspondance ; ces taux de correspondance observés doivent s'ils existent être confrontés à ceux simulés par le modèle car il sont l'un des éléments de fonctionnement du réseau TC.

Taille de l'agglomération (habitants)	taux de correspondance 2000	taux de correspondance 1995
min (+ 300 000)	1,05	1,05
médiane (+300 000)	1,32	1,30
max (+300 000)	1,65	1,55
min (+100 000)	1,02	1,1
médiane (+100 000)	1,12	1,15
max (+100 000)	1,33	1,34
min (-100 000)	1,0	1,0
médiane (-100 000)	1,07	1,08
max (-100 000)	1,33	1,40

Le tableau se lit, sur l'ensemble de la base de données TCU, le minimum des taux de correspondance en 2000 était de 1,02 pour les PTU compris entre 100 000 et 300 000 habitants.

*Tableau 38 Valeurs représentatives des taux de correspondance
(Source : base de donnée TCU, 2000, Certu. Voir annexes pour plus de détails)*

Lorsque le modèle est mis au point sur plusieurs périodes de la journée, il en est de même pour le calage : si les paramètres obtenus à l'issue du calage des différentes périodes sont significativement différents, il faudra s'interroger sur la nature de ces différences : on peut ainsi autoriser des valeurs du temps différentes si les catégories d'utilisateurs ou les motifs changent au cours de la

journée mais à l'inverse les pondérations de la formule d'impédance devront être identiques d'une période à l'autre.

Notons qu'il peut également être nécessaire de modifier la matrice de demande si celle-ci est issue d'une procédure dont on n'est pas totalement certain. Cette opération peut être menée manuellement ou plus automatiquement selon les procédures disponibles au sein de l'outil de planification utilisé. (cf. chapitre 3).

3.2 Extension de la modélisation à d'autres périodes

Lorsque l'on a ajusté un modèle d'affectation TC pour une période particulière de la journée, il est extrêmement délicat d'extrapoler les résultats sur l'ensemble de la journée.

En effet, l'offre TC peut être complètement différente selon les périodes de la journée et le type de jour (semaine, samedi, dimanche) et engendrer des utilisations très différenciées des services.

Si l'on veut pouvoir disposer de flux TC sur l'ensemble de la journée, il semble donc nécessaire de modéliser au moins trois périodes caractéristiques de la journée (heure de pointe du matin, heure de pointe du soir, heure moyenne...) dont les résultats seront ensuite étendus à la période de fonctionnement du réseau TC. Les périodes retenues seront choisies en fonction de la structure de la desserte tout au long de la journée.

4. Les prévisions

(i) Élaboration des données d'offre

L'élaboration des données d'offre future nécessaires pour les prévisions de trafic doit être fait en collaboration étroite avec le Maître d'Ouvrage : la plupart du temps, on modélise le réseau TC pour tester un scénario d'organisation dont on connaît les paramètres principaux¹²³ : organisation des missions, fréquences....

Si on ne dispose pas de données d'offre précises et qu'il est nécessaire d'élaborer une offre future sur la base de l'offre actuelle, on risque d'obtenir des résultats qui seront, aux écarts de modélisation près, valables en eux-mêmes mais qui pourront être très éloignés des trafics effectivement observés par la suite (cf. alinéa ci-après).

(ii) Écart de prévisions

Comme pour tout processus de prévision, les écarts entre les prévisions et les trafics effectivement observés après la mise en service peuvent être importants : ces écarts sont imputables au processus de prévision¹²⁴ lui-même mais aussi aux différences entre les hypothèses retenues lors des études (hypothèses d'offre ou de contexte socio-économique) et ce qui est réellement survenu au moment de la mise en service.

¹²³ Le problème des vitesses commerciales a été évoqué au § 1.4.

¹²⁴ Arrivant à la fin du processus de prévision, l'affectation cristallise les différentes erreurs des procédures précédentes (élaboration de la demande actuelle et future, partage modal) ; lorsque l'on dispose de ressources suffisantes, il est bon d'identifier les raisons des différents écarts de manière à mieux comprendre le fonctionnement de la chaîne de modélisation.

Le tableau ci-dessous montre l'erreur de prévision de 12 % faite avec le modèle Terese à l'heure de pointe (réseau de Lyon). Les études étaient basées sur le recensement précédent (1982) et sur une restructuration de bus qui ne s'est finalement pas entièrement réalisé. Les différences induites par toutes ces modifications expliquent en partie les erreurs de prévisions.

Clientèle	Période de Pointe du Soir		Journée	
Observée en 1994	41 799		164 961	
Prévision faite en 89	46 891	+12%	195 000	+18%
Avec les données socio-économiques réalisées en 94	42 540	+2%		
Avec en plus la restructuration réelle du réseau	36 788	-12%		
Avec en plus la prise en compte de l'utilisation réelle des parcs relais	39 687	-5%		

Tableau 39 Comparaison prévision/observation sur la ligne D à Lyon
(Source : Semaly, 1996)

Le tableau ci-dessous présente les écarts prévision/réalisation pour différents TCSP. On rappelle que les erreurs sont imputables en partie à des décalages entre le projet envisagé et celui effectivement réalisé. Mais les ordres de grandeurs sont significatifs.

Projet	Écart journée (prévision/observé)	Écart heure de pointe	Écart sur le tronçon le plus chargé
Tram La Défense - Issy	- 15 %	- 3 %	0 % (mauvais tronçon prédit)
Métro Ligne D Lyon	+ 18 %	+ 12 %	+ 23 % (mauvais tronçon prédit)
Val Toulouse, ligne 1	+ 18 %	+ 2 %	+ 19 % (bon tronçon prédit)
Tram Grenoble ligne A	+ 5 %	+ 5 %	-
Tram Grenoble ligne B	- 7 %	- 8 %	-
Tram Strasbourg ligne A	- 28 %	- 35 %	-

Tableau 40 Comparaison prévision/observation de différents transports en commun en site propre
(Source : Gesmad 1999)

Conclusion

L'objectif de cet ouvrage est de faire le point sur les pratiques courantes de la modélisation des déplacements urbains de voyageurs en France, facilement applicables avec les logiciels du commerce. L'exercice entrepris par les auteurs n'est pas forcément facile et se place bien sûr dans une série de contraintes de temps et de budget ; il est également le reflet des expériences acquises par les rédacteurs et, dans une moindre mesure, par les différents experts français en modélisation. Nous pensons que cet ouvrage est un indéniable progrès par rapport au déficit de document sur le sujet en France.

Cependant, il est bien évident que cet ouvrage présente certaines faiblesses, sans compter les éléments que l'on peut trouver en complément dans d'autres ouvrages parus ou à paraître prochainement. Le manque de temps, mais aussi le manque d'expériences répandues en France sur tel ou tel domaine en est une des raisons. Ainsi les différentes remarques des personnes citées en remerciement nous ont confortés dans l'idée que l'ouvrage avait sa place et son intérêt mais que beaucoup reste à faire.

Parmi les pistes de travail qui pourrait utilement enrichir le document dans des versions ultérieures, nous pouvons citer :

- plus d'ouverture sur les pratiques étrangères ;
- plus de prospective sur les méthodes à venir et les outils en développement ;
- plus d'ouverture et de pistes sur la modélisation poids lourds ;
- le lien entre les différentes méthodes et les évaluations socio-économiques ;
- la précision des données, les précautions à prendre et leur lien avec la précision des modèles ;
- la prise en compte du trafic externe ;
- la question des emboîtements de modèle ;
- la modélisation des impacts environnementaux et les contraintes propres à ce type d'analyse ;
- le lien avec la modélisation dynamique ;
- la modélisation de niveau stratégique ;
- ...

Nous formons le souhait que la communauté des modélisateurs pourra profiter de cet ouvrage dans sa forme actuelle et que des travaux futurs permettront de le compléter.

Annexes

Annexe 1. Données source : présentation simplifiée de quelques types d'enquêtes

Enquêtes ménages déplacements : elles consistent à recueillir sur un périmètre défini par l'autorité des transports, découpé selon un zonage de 50 à 100 zones environ, le plus grand nombre d'informations possible sur les déplacements effectués par les membres d'un certain nombre de ménages, sélectionnés de façon aléatoire de manière à reconstituer au mieux les caractéristiques socio-économiques des zones. Le périmètre est en général supérieur au périmètre des transports urbains.

Les enquêteurs se présentent au domicile des ménages enquêtés et interrogent toutes les personnes de plus de 5 ans sur les déplacements qu'elles ont effectués la veille. A noter qu'une méthodologie précise a été établie par le CERTU, qui résulte d'améliorations constantes depuis plus de vingt ans.

Il peut être tentant pour certaines collectivités ou certaines autorités organisatrices, compte tenu du coût de ces enquêtes (compter environ 150 Euros par ménage en moyenne, subventionné à 50 % du coût total hors taxes par l'État si la méthodologie est "standard Certu"), de procéder à des enquêtes réduites, s'inspirant plus ou moins de la méthodologie de référence. Il faut dans ce cas être très vigilant sur la qualité des résultats. Il reste cependant très difficile de valoriser l'investissement en dehors de la modélisation qui l'a motivé. On peut citer en particulier les enquêtes par téléphone qui permettent d'atteindre rapidement, à un coût raisonnable un grand nombre de personnes. Leur qualité statistique dépend du taux d'équipement des ménages, mais également des listes rouges et orange (numéros qu'il est en principe interdit de générer automatiquement en France, *a fortiori* pour les collectivités publiques), et du nombre de foyers équipés uniquement de portable¹²⁵.

En revanche, une enquête ménages standard Certu peut servir de base de travail pour des sujets très variés plusieurs années après son achèvement.

Par ailleurs, la comparaison de plusieurs enquêtes ménages successives sur un même secteur, puisqu'elles sont élaborées selon les mêmes principes, peut seule mettre en évidence les évolutions ; dans le même esprit, la comparaison des résultats obtenus sur plusieurs agglomérations similaires peut permettre une orientation des politiques publiques.

Enfin, les enquêtes ménages ne concernent pas seulement les transports et les déplacements mais offrent aussi une base de données sociologiques riche.

Enquête embarquée (transports collectifs) : chaque voyageur qui accepte l'enquête est interrogé sur le déplacement qu'il est en train d'effectuer : son origine effective, sa destination finale, les arrêts de montée et de descente, les correspondances éventuelles, le mode d'accès depuis l'origine, le mode d'accès à la destination, son motif, la fréquence à laquelle il se produit ainsi que sur un certain nombre d'appréciations diverses, généralement plus qualitatives, sur la tarification, le confort, la sécurité, ses attentes diverses.

Il apparaît à cet énoncé que le "calibre" du questionnaire peut varier de façon importante. La difficulté consiste à mettre au point un questionnaire approprié aux objectifs visés et garantissant un échantillon suffisant pour une qualité statistique convenable des résultats.

A la différence des enquêtes ménages qui ont vocation à servir longtemps (périodicité comprise généralement entre 5 et 10 ans) de base de données et qui se réfèrent à une méthodologie

¹²⁵ Une des faiblesses souvent reconnues aux enquêtes par téléphone est leur faible mesure des petits déplacements, ce qui n'est pas forcément rédhibitoire en matière de modélisation.

systematique, il est donc très souhaitable que le bureau d'études chargé de la modélisation soit étroitement associé à la mise au point des enquêtes embarquées (questionnaire, période, échantillon visé) puis à leur exploitation.

Par ailleurs, la collaboration de l'exploitant est également indispensable, en particulier pour fournir les comptages utiles aux redressements des enquêtes.

Enquêtes routières : elles sont menées selon un mode comparable, mais dépendent encore plus de la disponibilité des personnes enquêtées, généralement peu disposées à se prêter dans leur véhicule à des questionnaires longs, imposant une réflexion.

Des contraintes météorologiques peuvent influencer sur leur déroulement et sur leur qualité. Par ailleurs les enquêtes sont soumises à une réglementation stricte (déclaration préalable, présence de forces de l'ordre¹²⁶).

Le processus de redressement doit être prévu au préalable à partir de comptages manuels in situ, de comptages automatiques permanents (boucles magnétiques aux feux tricolores) dont il faut prévoir l'enregistrement pour la période d'enquête (une quinzaine de jours) ou de comptages automatiques temporaires (ibid.). Dans les deux cas, l'étalonnage de ces postes doit être soigneusement vérifié.

Enfin, il est impératif, ce qui peut être plus délicat en milieu urbain, de s'assurer que la disposition des postes d'enquête (autant que possible tous le même jour) permet d'intercepter la totalité des flux échangés entre un certain nombre de zones spécialement concernées par la problématique. On parle alors d'enquête cordon (autour d'un centre-ville par exemple) ou sur coupure¹²⁷ (à la traversée d'un fleuve).

Enquêtes par magnétophone (quelquefois appelées abusivement enquêtes cordon) qui consistent, pendant une période précise, à relever sur magnétophone de façon exhaustive les plaques d'immatriculation des véhicules passant sur un ensemble d'axes.

Selon la vitesse moyenne des véhicules aux postes d'enregistrement, il est possible de saisir une plus ou moins grande partie des plaques mais le mode d'exploitation des données saisies impose de procéder partout de la même manière en se "calant" sur les conditions les plus défavorables. De même, le risque de double compte, c'est-à-dire que deux véhicules aient la même immatriculation (cas où ne sont saisis que les quatre premiers chiffres) limite la taille des espaces soumis à ce type d'enquête.

Il est quelquefois procédé à des relevés vidéos qui améliorent la fiabilité des saisies mais engendrent des surcoûts et peuvent compliquer certaines exploitations (sur les temps de parcours par exemple).

Enquêtes par voie postale : elles consistent à remettre aux usagers (automobilistes passant à des postes donnés, utilisateurs des TC interceptés à des gares ou pôles d'échanges...) des questionnaires à remplir sur le déplacement en cours puis à renvoyer à l'aide d'une enveloppe pré-affranchie.

Outre les incertitudes sur le taux de retour de ce type d'enquête, qui impose quelquefois de prévoir des relances téléphoniques laborieuses (lorsque le mode opératoire prévoit la collecte des numéros de téléphone des enquêtés), le principal problème posé par cette méthode est la représentativité de l'échantillon ainsi capté : il est en effet probable que la propension à répondre dépend de paramètres nombreux tels que le motif du déplacement concerné, sa fréquence, la catégorie socioprofessionnelle du conducteur voire, lorsqu'il s'agit de véhicules individuels, du nombre de passagers.

¹²⁶ Depuis peu un grand nombre de forces de gendarmerie refusent de participer aux enquêtes routières dans leurs secteurs de compétence, dont certains sont dans des zones périurbaines. Cela peut poser des problèmes importants d'organisation des enquêtes, sinon les empêcher. Il est très difficile pour les modélisateurs de se passer de ces enquêtes.

¹²⁷ On parle aussi fréquemment de ligne-écran

Annexe 2. Données sur l'emploi

Les données sur l'emploi sont multiples : fichiers SIRENE, UNEDIC, fichier de paie de la fonction publique, migrations alternantes des RGP, etc.. Mais ils sont pour la plupart incomplets (privé / public, salariés / non salariés) et pas toujours disponibles ou fiables sur la localisation fine des données. En effet, ces fichiers n'ont pas pour finalité initiale la connaissance de l'emploi. Les chambres de commerce et d'industrie possèdent souvent des fichiers détaillés au niveau de l'établissement (adresse, code SIRET permettant un croisement avec le fichier SIRENE) avec les effectifs répertoriés. Parfois ces fichiers sont géocodés. Notons qu'ils concernent l'emploi privé.

Le fichier de l'UNEDIC

C'est un fichier de gestion de cotisations qui sont calculées en référence aux effectifs salariés dans les entreprises ayant au moins un salarié. Les employeurs sont autorisés à cotiser pour l'ensemble de leurs salariés, même s'ils sont répartis sur plusieurs sites, à condition que ces établissements dépendent de la même ASSEDIC. Il est demandé aux employeurs de « dégroupier » les effectifs de leurs établissements, mais cette opération n'est pas toujours réalisée et la localisation de l'emploi salarié est alors faussée, en particulier dans certains secteurs comme le commerce, les banques ou bien lorsqu'une grosse entreprise a plusieurs établissements dans la zone. Selon l'INSEE ce défaut est de mieux en mieux corrigé. Les données sont disponibles à la commune.

Le fichier SIRENE

Sont immatriculées au répertoire SIRENE les personnes physiques ou morales inscrites au registre du commerce et des sociétés, au répertoire des métiers, employant des salariés, soumises à des obligations fiscales et/ou bénéficiaires de transferts financiers publics. C'est un fichier des entreprises et de leurs établissements, qui contient, entre autres variables, la localisation. Chaque année, le fichier est actualisé, complété par d'autres sources. Sont notamment intégrées des éléments de zonages géographiques et des données économiques externes au répertoire SIRENE comme la tranche d'effectif salarié. Le fichier étant accessible de manière nominative, des données sur un zonage plus fin que la commune, à partir de l'adresse, peuvent être disponibles (la localisation à l'îlot est possible sur demande auprès de l'INSEE avec une tarification spéciale, mais il ne faut pas oublier que l'effectif salarié n'est codé qu'en tranches). Pour les établissements du secteur public, en général les effectifs sont soit non précisés (écoles, collèges, lycées¹²⁸) soit ils indiquent l'effectif global de l'entreprise (exemple: les centres hospitaliers, EDF).

Les DADS

La déclaration annuelle de données sociales est une formalité administrative que doit accomplir toute entreprise employant des salariés, y compris les entreprises nationales, les administrations publiques et les collectivités locales. L'effectif salarié est l'une des variables utiles pour la modélisation, l'adresse de chaque salarié en est une autre. La catégorie sociale est également codée. Mais aujourd'hui, ces données ne sont disponibles qu'à un niveau géographique agrégé en raison d'une exploitation par sondage au 1/25^{ème}. L'objectif de l'INSEE est de réaliser des exploitations à un niveau géographique plus fin (commune) en codant la totalité des informations. En 2003, cette source devrait remplacer, en particulier, les données sur les

¹²⁸ Ces données peuvent par contre être récupérées auprès du rectorat et de l'inspection académique.

migrations alternantes issues du recensement traditionnel et l'enquête structure des emplois pour les données par catégorie sociale.

Le fichier de paie de la fonction publique

Il répertorie les agents à leur lieu de versement de leur salaire, qui peut être différent, pour certaines catégories, de leur lieu de travail. Néanmoins, les données sont d'une fiabilité correcte par commune de lieu de travail et par zone d'emploi. Il ne prend pas en compte La Poste, France Télécom ni la plus grande partie de la Défense Nationale.

Le fichier des migrations alternantes

Les recensements généraux de la population permettent, entre autres, de quantifier, de façon exhaustive, les migrations alternantes (qu'on peut considérer, abusivement, comme représentatives des déplacements domicile-travail – cf. ci-dessous). Elles sont déduites des déclarations faites par les personnes enquêtées à leur domicile sur la localisation de leur lieu habituel de travail. A l'exception des grandes communes pour lesquelles le traitement peut être fait à l'échelle des arrondissements, les migrations alternantes se présentent généralement à l'échelle communale. On peut donc constituer des matrices intercommunales des migrations alternantes dont on déduit, par différence entre ce qui entre dans chaque commune avec ce qui en sort, les nombres totaux d'emplois par commune, sans distinction de leur nature. Le recensement de 1999 propose un traitement plus détaillé que les précédents, en ventilant les migrations selon le sexe, l'âge et le mode de transport utilisé, s'il y a lieu. Notons que leur confrontation avec les flux mesurés lors d'enquêtes cordon montre généralement des migrations alternantes « surestimées », à l'échelle d'une journée ouvrée moyenne. Sans doute faut-il y voir une illustration de ce qu'une partie importante des actifs travaille en week-end ou de façon irrégulière. De même, la prise en compte d'un certain nombre de catégories professionnelles est éminemment délicate (représentants de commerce). Enfin, on identifie couramment dans les fichiers des migrations sur de longues distances (Toulouse-Paris, par exemple, ou des destinations étrangères non frontalières) qui ne correspondent évidemment pas à des déplacements quotidiens.

Annexe 3. données des enquêtes ménages déplacements

Mobilités par motif

Agglomération / Date enquête ménages déplacements	population	DT	Dprof	DE	Dachats	Dautres	Secondaires	Total
aix 1989	227 000	0,61	0,03	0,49	0,39	1,01	0,39	2,92
aix 1997	290 000	0,57	0,04	0,45	0,50	1,31	0,96	3,83
amiens 1979	158 000	0,64	0,05	0,55	0,55	1,03	0,59	3,41
amiens 1991	153 000	0,65	0,03	0,57	0,28	0,97	0,55	3,05
angers 1989	199 000	0,73	0,02	0,54	0,44	0,99	0,50	3,22
avignon 1980	131 000	0,71	0,13	0,50	0,65	1,01	0,35	3,35
bayonne 1999	223 000	0,59	0,07	0,35	0,56	1,27	0,56	3,38
belfort 1983	106 000	0,77	0,09	0,46	0,59	1,05	0,62	3,57
belfort 1992	127 000	0,68	0,05	0,51	0,45	1,13	0,58	3,39
bordeaux 1978	604 000	0,69	0,13	0,40	0,45	0,73	0,44	2,83
bordeaux 1990	762 000	0,70	0,04	0,40	0,46	0,96	0,55	3,11
bordeaux 1998	801 000	0,57	0,10	0,45	0,51	1,23	0,72	3,58
cherbourg 1994	87 000	0,67	0,02	0,48	0,56	1,32	0,71	3,76
clermont 1992	323 000	0,71	0,04	0,48	0,43	1,11	0,62	3,39
dijon 1988	221 000	0,73	0,02	0,51	0,64	1,18	0,89	3,98
douai 1996	174 000	0,47	0,03	0,51	0,48	1,33	0,70	3,51
dunkerque 1991	202 000	0,57	0,03	0,59	0,50	1,28	0,64	3,60
elbeuf 1997	53 000	0,57	0,03	0,43	0,58	1,18	0,69	3,48
etang de berre 1990	326 000	0,62	0,04	0,55	0,47	1,16	0,46	3,30
etang de berre 1997	329 000	0,57	0,02	0,46	0,56	1,29	0,70	3,60
fort de france 2000	170 000	0,43	0,05	0,44	0,28	1,12	0,78	3,10
grenoble 1978	371 000	0,67	0,12	0,61	0,71	1,13	0,80	4,04
grenoble 1985	380 000	0,72	0,03	0,52	0,55	1,18	0,75	3,74
grenoble 1992	349 000	0,66	0,02	0,55	0,42	1,23	0,70	3,58
le havre 1992	238 000	0,59	0,03	0,51	0,58	1,17	0,63	3,52
lille 1976	889 000	0,68	0,09	0,49	0,39	0,69	0,35	2,68
lille 1987	1 093 000	0,60	0,03	0,48	0,43	1,24	0,68	3,46
lille 1998	1 176 000	0,51	0,11	0,50	0,45	1,48	0,92	3,98
lorient 1982	171 000	0,58	0,02	0,47	0,33	0,61	0,24	2,24
lyon 1976	1 029 000	0,72	0,11	0,60	0,57	0,89	0,56	3,45
lyon 1985	1 088 000	0,71	0,04	0,48	0,50	0,97	0,57	3,26
lyon 1995	1 220 000	0,61	0,06	0,50	0,49	1,21	0,77	3,63
marseille 1976	930 000	0,54	0,13	0,42	0,64	1,07	0,64	3,43
marseille 1988	1 137 000	0,57	0,03	0,36	0,50	1,00	0,45	2,91
marseille 1997	1 068 000	0,54	0,05	0,44	0,50	1,09	0,64	3,25

Agglomération / Date enquête ménages déplacements	population	DT	Dprof	DE	Dachats	Dautres	Secondaires	Total
metz 1992	177 000	0,68	0,05	0,53	0,40	1,04	0,62	3,32
mulhouse 1990	214 000	0,73	0,05	0,50	0,49	1,02	0,57	3,36
nancy 1976	230 000	0,71	0,13	0,60	0,49	0,71	0,49	3,13
nancy 1991	295 000	0,62	0,08	0,51	0,47	1,20	0,84	3,70
nantes 1980	466 000	0,71	0,04	0,56	0,40	0,69	0,39	2,78
nantes 1990	518 000	0,66	0,05	0,48	0,47	1,02	0,61	3,28
nice 1998	1 030 000	0,54	0,05	1,28	0,34	0,59	0,94	3,75
orleans 1976	201 000	0,70	0,12	0,48	0,63	0,90	0,64	3,46
perpignan 1984	117 000	0,70	0,13	0,42	0,54	0,98	0,49	3,25
reims 1987	200 000	0,77	0,03	0,57	0,60	1,28	0,88	4,14
reims 1996	221 000	0,66	0,06	0,56	0,54	1,21	0,73	3,76
rennes 1991	309 000	0,70	0,04	0,55	0,48	1,04	0,64	3,44
rennes 2000	352 000	0,57	0,11	0,53	0,52	1,16	0,71	3,59
rouen 1996	382 000	0,57	0,04	0,44	0,49	1,12	0,73	3,40
saint etienne 1991	435 000	0,69	0,03	0,51	0,53	1,06	0,60	3,42
saint etienne 2001	510 000	0,56	0,12	0,53	0,52	1,21	0,64	3,58
saint nazaire 1996	187 000	0,59	0,04	0,43	0,49	1,32	0,71	3,58
strasbourg 1988	386 000	0,69	0,07	0,42	0,52	1,12	0,98	3,80
strasbourg 1997	508 000	0,67	0,06	0,52	0,55	1,33	1,06	4,19
toulon 1985	289 000	0,62	0,05	0,41	0,47	0,89	0,35	2,79
toulon 1998	357 000	0,48	0,04	0,36	0,63	1,23	0,78	3,52
toulouse 1978	542 000	0,68	0,14	0,54	0,45	0,71	0,49	3,00
toulouse 1990	681 000	0,66	0,05	0,39	0,38	0,94	0,49	2,91
toulouse 1996	723 000	0,63	0,09	0,47	0,51	1,11	0,72	3,52
troyes 1998	120 000	0,67	0,08	0,45	1,23	0,57	0,78	3,78
valence 1981	130 000	0,76	0,15	0,50	0,63	1,07	0,62	3,72
valence 1991	228 000	0,72	0,04	0,44	0,50	1,24	0,78	3,72
valenciennes 1985	329 000	0,48	0,02	0,66	0,56	1,07	0,59	3,37
valenciennes 1997	334 000	0,42	0,08	0,52	0,47	1,33	0,73	3,55

DT : domicile travail
Dprof : domicile-professionnel
DE : domicile-études
Dachats : domicile-achat
Dautres : domicile-autres

*Tableau 41 mobilités par motif dans les agglomérations françaises
(Source : enquêtes ménages déplacements)*

Répartition des passages PPM/PM/PPS

	Travail			Prof			Etudes			Achats			Autres			Secondaire		
	7h-9h	9h-17h	17h-19h	7h-9h	9h-17h	17h-19h	7h-9h	9h-17h	17h-19h	7h-9h	9h-17h	17h-19h	7h-9h	9h-17h	17h-19h	7h-9h	9h-17h	17h-19h
aix 1989	26,8	38,6	17,7	18,2	42,4	23,4	35,0	47,7	15,2	6,1	67,3	18,2	11,7	50,6	20,1	12,3	60,9	19,3
aix 1997	28,5	34,6	18,6	19,0	45,2	23,5	36,5	44,3	16,6	6,0	66,2	20,4	12,1	45,8	21,4	10,3	66,7	17,0
amiens 1979	23,8	44,1	16,6	21,9	45,9	20,5	31,0	51,7	16,5	4,7	62,8	25,3	10,2	49,5	19,1	10,8	59,8	22,6
amiens 1991	23,9	43,0	17,8	15,2	48,5	22,9	32,4	51,7	14,3	2,0	60,7	27,9	11,7	48,0	21,7	12,0	60,4	21,7
angers 1989	25,4	44,3	16,3	26,4	41,6	21,2	33,4	50,8	14,3	2,0	66,3	23,5	10,6	48,1	21,7	11,3	59,2	21,3
avignon 1980	24,1	45,6	16,3	17,5	45,0	21,2	29,8	57,7	12,2	5,4	70,2	17,8	8,6	50,8	21,6	11,1	61,4	18,4
bayonne 1999	24,2	44,0	15,0	20,6	47,9	15,7	40,5	43,9	14,4	4,0	73,5	17,7	10,9	51,7	20,1	10,9	63,1	20,5
belfort 1983	16,7	50,3	11,2	15,5	53,7	19,0	28,6	60,3	9,9	6,8	65,3	21,4	8,3	49,3	21,2	11,3	62,4	18,9
belfort 1992	21,6	46,9	13,4	16,3	45,4	22,0	31,6	55,5	11,5	4,4	65,9	24,4	9,6	50,6	21,2	11,8	63,6	19,1
bordeaux 1978	27,6	38,7	18,4	19,8	42,8	19,8	32,4	46,2	19,8	4,2	66,9	21,9	9,0	46,5	22,5	11,0	60,5	20,1
bordeaux 1990	26,1	37,7	17,6	23,7	40,7	15,0	35,8	47,8	14,7	3,7	64,3	22,7	11,6	43,0	22,2	12,1	60,4	19,3
bordeaux 1998	28,5	35,0	17,8	22,8	42,6	17,6	36,3	46,3	15,2	3,7	62,0	24,2	10,9	45,0	21,6	10,6	61,5	19,6
cherbourg 1994	25,6	44,8	15,9	21,5	41,3	18,2	31,3	57,0	11,1	4,8	63,0	23,0	11,5	50,4	20,3	10,6	62,0	20,1
clermont 1992	24,5	41,7	15,1	22,0	39,6	16,9	35,8	52,0	10,7	7,5	61,3	23,9	11,9	47,1	21,5	14,0	61,0	19,1
dijon 1988	23,9	43,6	14,8	18,0	31,5	17,7	31,5	52,8	14,7	7,8	58,9	24,9	10,0	45,6	22,9	12,1	59,8	21,2
douai 1996	23,3	40,7	15,0	18,2	43,8	19,2	33,4	51,8	12,6	2,9	64,2	25,7	12,0	54,1	18,5	12,0	64,9	18,6
dunkerque 1991	23,4	46,1	14,6	19,6	44,7	21,8	30,3	55,2	13,5	3,9	61,5	26,8	10,4	52,9	21,1	9,4	63,7	21,0
elbeuf 1997	24,2	40,9	14,4	22,1	41,4	18,1	37,1	52,1	9,9	4,2	62,6	25,9	10,2	51,2	21,2	9,6	65,7	19,5
etang de berre 1990	24,4	41,7	16,4	20,4	43,0	18,9	32,7	55,9	10,5	8,0	61,5	21,0	11,5	50,5	22,4	14,5	62,0	18,3
etang de berre 1997	25,5	39,1	18,0	18,9	47,0	14,5	36,2	50,7	11,8	7,7	66,7	19,8	10,6	52,9	20,3	12,0	65,7	17,0
fort de france 2000	20,7	39,6	14,0	15,6	44,2	13,1	22,7	45,0	10,9	10,7	60,5	17,2	15,9	41,7	17,6	16,0	62,9	11,4
grenoble 1978	23,1	46,2	15,1	16,6	46,0	20,8	31,2	50,2	17,6	8,4	60,4	21,8	7,3	48,2	22,8	9,4	63,2	20,1
grenoble 1985	22,8	45,2	14,6	21,8	41,2	15,1	31,8	53,6	13,6	6,7	61,8	23,1	8,4	46,3	21,9	10,0	62,1	20,0
grenoble 1992	26,1	40,1	17,9	26,6	31,8	15,9	31,9	54,1	11,8	6,9	63,5	21,2	9,9	47,0	21,4	11,0	63,2	18,9
le havre 1992	25,3	44,5	14,5	23,3	42,1	18,5	32,2	60,7	5,9	4,4	63,6	24,6	9,9	52,0	22,0	9,2	63,4	20,0
lille 1976	23,5	40,7	18,5	17,5	48,7	18,2	31,5	55,2	12,5	3,4	63,6	24,0	11,1	47,3	21,5	14,1	56,0	21,8
lille 1987	25,4	42,4	15,4	20,4	43,6	17,1	33,8	54,0	11,4	4,1	61,3	26,8	11,5	46,9	22,7	5,5	61,9	28,7
lille 1998	25,8	39,4	16,4	21,3	48,2	16,2	34,4	50,8	12,9	3,4	61,8	24,3	11,8	45,4	21,0	11,4	63,0	18,3
lorient 1982	27,5	41,3	18,1	11,2	50,5	22,3	33,8	47,3	17,5	2,7	74,7	17,5	7,3	55,0	22,8	8,7	58,4	26,6
lyon 1976	21,1	41,2	16,3	16,4	42,9	17,8	28,4	52,7	17,4	7,8	61,9	23,0	10,5	46,0	22,4	12,0	58,1	22,1
lyon 1985	24,7	40,9	15,8	16,9	44,8	16,9	32,3	52,2	13,6	7,8	63,1	21,7	10,2	46,7	20,8	11,4	63,6	17,7
lyon 1995	26,8	35,2	16,2	20,3	40,9	18,2	34,5	50,7	11,7	6,2	64,9	20,3	11,1	47,2	19,7	10,7	65,4	16,1
marseille 1976	22,4	40,2	15,3	18,2	43,5	16,1	31,6	44,5	22,6	8,2	62,7	19,2	8,4	46,0	21,5	11,3	59,1	21,0
marseille 1988	24,2	39,3	16,6	20,6	43,6	20,7	32,2	50,3	16,2	7,3	67,3	19,3	10,5	51,7	20,9	13,2	64,1	16,1
marseille 1997	27,7	36,1	17,1	24,9	44,4	16,2	37,7	45,5	15,5	6,7	67,1	18,2	12,7	52,1	18,9	11,7	68,0	15,1
metz 1992	25,9	38,8	17,4	22,4	45,8	14,8	31,6	58,6	8,8	6,0	60,2	24,3	11,0	48,1	21,1	10,5	64,8	17,7
mulhouse 1990	19,8	40,7	15,8	15,6	47,7	16,4	29,4	59,8	9,8	6,2	67,1	21,3	10,6	51,2	19,9	12,4	65,1	16,0
nancy 1976	24,4	41,2	17,2	21,3	44,1	20,4	30,9	56,4	11,1	6,3	66,7	20,6	8,0	50,1	20,6	8,0	66,8	18,9
nancy 1991	25,3	39,6	16,9	18,5	44,7	17,8	32,1	54,5	10,7	5,5	63,8	22,5	10,6	47,4	20,1	10,0	63,9	16,9
nantes 1980	25,8	41,3	17,9	11,3	45,7	19,2	31,6	48,4	18,3	2,3	67,4	22,4	9,2	50,4	21,5	10,3	60,7	21,0
nantes 1990	26,5	40,9	16,0	23,8	43,1	18,8	34,8	49,4	14,3	3,4	64,5	23,1	10,0	46,0	22,3	10,1	63,4	20,1
nice 1998	26,5	37,3	16,7	17,8	47,0	15,7	39,6	46,0	12,5	6,4	67,8	18,7	12,7	52,2	18,5	11,3	66,0	16,6
orleans 1976	25,9	40,3	16,4	19,2	45,8	20,4	34,7	55,4	9,5	5,9	60,0	25,3	9,7	47,8	20,9	9,2	60,5	23,5
perpignan 1984	23,1	47,9	16,5	17,1	49,5	22,4	29,6	49,4	20,0	6,4	75,3	14,7	6,3	51,6	23,7	8,5	61,1	21,4
reims 1987	21,6	44,9	15,6	10,6	45,9	19,5	31,0	54,4	12,9	6,0	65,6	21,5	10,7	48,6	19,5	12,4	60,0	19,4
reims 1996	24,0	41,4	15,8	17,8	50,4	14,1	31,4	52,4	13,9	4,7	66,1	22,3	12,0	47,6	20,6	10,7	61,9	18,1

	Travail			Prof			Etudes			Achats			Autres			Secondaire		
	7h-9h	9h-17h	17h-19h	7h-9h	9h-17h	17h-19h	7h-9h	9h-17h	17h-19h	7h-9h	9h-17h	17h-19h	7h-9h	9h-17h	17h-19h	7h-9h	9h-17h	17h-19h
rennes 1991	27,1	40,7	17,1	24,5	35,3	22,6	34,7	48,6	15,4	2,2	64,4	24,8	11,0	45,7	22,5	12,1	59,0	20,8
rennes 2000	29,6	35,6	18,2	22,7	43,2	18,6	33,9	48,8	15,0	2,2	63,2	24,3	10,7	44,7	21,8	9,5	63,9	18,9
rouen 1996	26,7	38,8	15,7	21,4	44,5	20,2	37,3	52,1	9,2	4,4	64,6	23,0	11,9	48,2	19,3	10,1	65,1	17,4
saint etienne 1991	21,8	43,3	14,6	21,4	41,2	19,0	31,3	53,0	14,0	7,5	67,3	19,8	10,3	50,6	21,6	10,3	64,1	19,6
saint etienne 2001	22,9	40,6	15,1	21,2	44,4	15,3	31,6	52,3	14,8	7,7	69,9	17,7	10,6	49,9	20,8	10,5	65,4	17,2
saint nazaire 1996	23,3	42,8	15,3	16,7	52,8	17,8	36,1	47,9	14,2	5,7	69,2	19,5	9,2	52,2	22,4	10,5	64,6	19,2
strasbourg 1988	23,0	42,3	15,7	15,8	47,2	18,1	28,0	61,8	8,5	9,7	62,6	20,9	10,5	43,1	18,2	8,7	57,6	19,5
strasbourg 1997	24,5	38,6	15,4	17,7	43,0	17,3	30,8	55,5	12,0	9,7	60,8	21,4	9,5	45,6	18,8	10,7	64,8	16,3
toulon 1985	23,6	43,5	16,0	17,2	44,0	20,1	34,9	52,6	11,4	7,7	73,6	13,9	9,8	56,4	20,0	11,7	64,6	17,5
toulon 1998	26,1	40,6	15,6	27,7	44,7	17,6	37,7	49,8	10,7	7,2	69,9	17,0	12,3	54,2	18,4	12,4	67,7	15,0
toulouse 1978	26,3	40,5	17,7	18,6	47,6	20,3	32,5	43,1	22,5	3,8	66,6	22,1	9,1	45,8	22,5	9,9	61,7	20,6
toulouse 1990	27,7	38,6	17,9	20,7	40,2	22,0	36,0	42,7	19,5	3,1	68,3	20,5	10,3	45,4	22,6	11,9	60,9	20,3
toulouse 1996	27,9	37,3	17,9	21,4	43,8	18,0	36,8	41,9	18,6	3,1	64,5	23,0	11,2	42,3	21,5	10,9	62,1	18,4
troyes 1998	21,5	44,9	13,4	15,8	46,9	21,7	33,6	47,1	17,7	4,8	65,4	20,6	10,3	47,0	21,8	10,8	56,3	24,5
valence 1981	20,5	49,1	14,9	15,5	50,5	16,0	30,3	56,7	12,7	7,9	66,5	18,6	10,0	46,9	24,3	12,2	60,3	22,5
valence 1991	23,4	44,6	16,0	13,3	48,6	19,4	35,0	54,8	9,0	9,2	62,9	19,3	10,5	48,8	22,2	11,4	62,6	20,0
valenciennes 1985	23,6	43,8	14,9	23,5	41,3	16,3	25,4	64,1	9,5	3,5	64,0	24,0	11,0	45,6	22,0	11,2	60,0	20,9
valenciennes 1997	23,7	38,2	16,5	19,5	47,5	17,3	33,9	52,7	11,4	3,3	67,8	21,8	12,5	51,4	19,5	11,2	65,2	17,2

PPM (période de pointe du matin) : 7h00- 9h00

PM (période moyenne) : 9h00-17h00

PPS (période de pointe du soir) : 17h00-19h00

Tableau 42 répartition des passages PPM/PM/PPS par motif dans les agglomérations françaises
(Source : enquêtes ménages déplacements)

Répartition par mode de transport

	MAP	Vélo	TCU	Autre TC	2R motorisé	VP conduit	VP passager	Autre mode	Total motorisé	Total	% VP	% TC	% doux	% autre	Non mobiles
aix 1989	0,72	0,03	0,10	0,13	0,05	1,40	0,47	0,03	2,18	2,92	64,0%	7,8%	25,5%	2,7%	15%
aix 1997	1,05	0,02	0,11	0,13	0,06	1,86	0,58	0,03	2,77	3,83	63,7%	6,1%	27,7%	2,5%	11%
amiens 1979	1,38	0,11	0,24	0,04	0,16	1,03	0,42	0,04	1,92	3,41	42,3%	8,1%	43,8%	5,8%	16%
amiens 1991	0,94	0,03	0,24	0,06	0,04	1,27	0,43	0,04	2,08	3,05	55,7%	9,8%	31,8%	2,7%	18%
angers 1989	0,84	0,12	0,37	0,02	0,07	1,39	0,41	0,02	2,27	3,22	55,6%	12,1%	29,7%	2,6%	12%
avignon 1980	1,19	0,35	0,11	0,02	0,24	1,07	0,35	0,03	1,82	3,36	42,3%	3,9%	45,7%	8,1%	13%
bayonne 1999	0,42	0,04	0,08	0,06	0,09	2,10	0,58	0,01	2,92	3,38	79,3%	4,1%	13,6%	3,0%	14%
belfort 1983	1,16	0,16	0,16	0,15	0,11	1,33	0,49	0,03	2,26	3,57	50,8%	8,6%	36,8%	3,7%	12%
belfort 1992	0,75	0,09	0,15	0,21	0,04	1,56	0,56	0,04	2,56	3,39	62,4%	10,5%	24,6%	2,4%	15%
bordeaux 1978	0,79	0,17	0,26	0,03	0,15	1,09	0,32	0,02	1,87	2,83	50,0%	10,0%	33,9%	6,0%	17%
bordeaux 1990	0,62	0,11	0,23	0,07	0,07	1,52	0,46	0,04	2,38	3,11	63,5%	9,6%	23,5%	3,4%	14%
bordeaux 1998	0,70	0,10	0,23	0,05	0,05	1,88	0,53	0,03	2,77	3,57	67,5%	7,8%	22,4%	2,2%	11%
cherbourg 1994	1,08	0,11	0,16	0,06	0,09	1,62	0,61	0,03	2,57	3,76	59,4%	5,8%	31,6%	3,2%	13%
clermont 1992	0,81	0,06	0,21	0,09	0,05	1,63	0,51	0,03	2,52	3,39	63,1%	8,6%	25,7%	2,5%	12%
dijon 1988	1,17	0,03	0,15	0,08	0,14	1,62	0,53	0,04	2,56	3,75	57,2%	6,1%	31,8%	4,8%	11%
douai 1996	1,36	0,08	0,49	0,05	0,05	1,48	0,45	0,03	2,55	3,98	48,6%	13,5%	36,0%	1,9%	10%
dunkerque 1991	0,98	0,14	0,13	0,10	0,04	1,44	0,66	0,03	2,39	3,51	59,8%	6,5%	31,8%	1,8%	16%
elbeuf 1997	1,05	0,14	0,20	0,08	0,05	1,45	0,58	0,04	2,41	3,60	56,4%	7,9%	33,2%	2,5%	14%
etang de berre 1990	0,99	0,06	0,16	0,05	0,03	1,56	0,61	0,03	2,43	3,48	62,3%	5,9%	30,2%	1,6%	14%
etang de berre 1997	0,79	0,05	0,05	0,15	0,05	1,60	0,58	0,03	2,46	3,30	66,1%	6,2%	25,4%	2,3%	14%
fort de france 2000	0,91	0,03	0,06	0,12	0,03	1,83	0,60	0,02	2,66	3,60	67,3%	5,1%	26,2%	1,4%	12%
grenoble 1978	0,53	0,01	0,18	0,24	0,04	1,49	0,59	0,03	2,56	3,10	67,1%	13,5%	17,3%	2,2%	NC
grenoble 1985	1,66	0,25	0,31	0,06	0,19	1,15	0,40	0,03	2,13	4,04	38,4%	9,2%	47,1%	5,4%	10%
grenoble 1992	1,34	0,12	0,33	0,06	0,05	1,36	0,45	0,04	2,28	3,74	48,4%	10,2%	39,0%	2,4%	12%
le havre 1992	0,98	0,13	0,45	0,04	0,02	1,48	0,45	0,03	2,47	3,58	54,0%	13,6%	31,1%	1,4%	11%
lille 1976	1,10	0,04	0,27	0,05	0,07	1,43	0,55	0,02	2,39	3,52	56,3%	9,1%	32,2%	2,4%	13%
lille 1987	1,02	0,16	0,16	0,03	0,16	0,82	0,31	0,02	1,50	2,68	42,0%	6,9%	44,2%	6,9%	20%
lille 1998	1,12	0,12	0,18	0,06	0,04	1,36	0,55	0,03	2,22	3,46	55,2%	7,0%	35,8%	2,0%	15%
lorient 1982	1,14	0,08	0,21	0,06	0,03	1,78	0,66	0,04	2,77	3,99	61,1%	6,7%	30,5%	1,6%	11%
lyon 1976	0,66	0,10	0,16	0,12	0,07	0,84	0,29	0,02	1,51	2,27	50,0%	12,5%	33,6%	3,9%	24%
lyon 1985	1,57	0,09	0,34	0,04	0,11	0,98	0,31	0,01	1,79	3,45	37,6%	11,0%	48,1%	3,3%	11%
lyon 1995	1,12	0,03	0,42	0,05	0,03	1,21	0,37	0,03	2,10	3,26	48,4%	14,3%	35,5%	1,7%	14%
marseille 1976	1,14	0,03	0,45	0,04	0,02	1,50	0,43	0,03	2,47	3,63	53,1%	13,6%	32,1%	1,2%	10%
marseille 1988	1,79	0,02	0,26	0,04	0,16	0,79	0,34	0,03	1,62	3,43	32,9%	8,8%	52,8%	5,5%	15%
marseille 1997	1,02	0,01	0,29	0,04	0,06	1,08	0,37	0,04	1,88	2,91	49,8%	11,2%	35,4%	3,5%	18%

	MAP	Vélo	TCU	Autre TC	2R motorisé	VP conduct	VP passager	Autre mode	Total motorisé	Total	% VP	% TC	% doux	% autre	Non mobiles
metz 1992	1,05	0,01	0,30	0,04	0,05	1,35	0,42	0,02	2,19	3,25	54,6%	10,5%	32,6%	2,2%	13%
mulhouse 1990	1,00	0,04	0,26	0,05	0,05	1,43	0,46	0,04	2,29	3,32	56,8%	9,4%	31,3%	2,5%	15%
nancy 1976	0,86	0,14	0,30	0,08	0,04	1,46	0,45	0,04	2,36	3,36	56,7%	11,2%	29,7%	2,3%	14%
nancy 1991	1,43	0,05	0,27	0,05	0,17	0,84	0,29	0,03	1,65	3,13	36,2%	10,1%	47,2%	6,4%	14%
nantes 1980	1,09	0,04	0,30	0,06	0,05	1,61	0,52	0,04	2,57	3,70	57,5%	9,6%	30,5%	2,3%	12%
nantes 1990	0,78	0,17	0,33	0,06	0,17	0,95	0,31	0,02	1,83	2,78	45,1%	14,0%	34,1%	6,8%	17%
nice 1998	0,72	0,07	0,41	0,03	0,08	1,50	0,45	0,02	2,49	3,28	59,4%	13,4%	24,0%	3,2%	12%
orleans 1976	1,22	0,25	0,12	0,08	0,27	1,09	0,40	0,04	2,00	3,46	43,1%	5,7%	42,3%	9,0%	NC
orleans	0,73	0,11	0,02	0,04	0,04	1,17	0,26	0,25	1,78	2,62	54,3%	2,3%	32,1%	11,3%	18%
paris	1,30	0,06	0,57	0,05	0,11	0,77	0,24	0,04	1,77	3,13	32,3%	19,6%	43,6%	4,5%	NC
paris	1,20	0,04	0,59	0,04	0,05	0,90	0,29	0,03	1,89	3,13	37,9%	19,9%	39,6%	2,6%	NC
paris	1,07	0,03	0,60	0,03	0,03	1,05	0,32	0,03	2,07	3,17	43,4%	20,1%	34,7%	1,9%	NC
paris	1,15	0,04	0,60	0,04	0,03	1,17	0,38	0,02	2,23	3,42	45,2%	18,7%	34,8%	1,4%	NC
perpignan 1984	1,21	0,07	0,32	0,03	0,08	1,12	0,40	0,03	1,98	3,25	46,7%	10,7%	39,2%	3,4%	16%
reims 1987	1,50	0,05	0,36	0,04	0,05	1,56	0,52	0,07	2,59	4,14	50,1%	9,5%	37,5%	2,8%	11%
reims 1996	1,02	0,04	0,37	0,04	0,03	1,71	0,54	0,02	2,70	3,76	59,8%	10,8%	28,1%	1,3%	NC
rennes 1991	0,96	0,12	0,36	0,05	0,04	1,45	0,45	0,02	2,37	3,44	55,2%	11,8%	31,3%	1,8%	10%
rennes 2000	1,00	0,12	0,31	0,04	0,04	1,62	0,45	0,02	2,48	3,59	57,6%	9,9%	31,0%	1,5%	8,5%
rouen 1996	1,01	0,03	0,29	0,03	0,04	1,50	0,49	0,02	2,37	3,40	58,6%	9,4%	30,3%	1,8%	13%
saint etienne 1991	1,06	0,02	0,39	0,06	0,03	1,38	0,46	0,03	2,35	3,42	53,8%	13,3%	31,4%	1,5%	15%
saint etienne 2001	1,05	0,02	0,26	0,10	0,03	1,58	0,51	0,04	2,51	3,58	58,3%	10,1%	29,8%	1,7%	NC
saint nazaire 1996	0,60	0,15	0,07	0,14	0,07	1,86	0,66	0,04	2,83	3,58	70,3%	5,6%	20,9%	3,2%	NC
strasbourg 1988	1,23	0,30	0,23	0,05	0,08	1,39	0,47	0,04	2,26	3,80	49,1%	7,3%	40,4%	3,2%	13%
strasbourg 1997	1,25	0,26	0,28	0,07	0,03	1,74	0,51	0,04	2,68	4,19	53,8%	8,4%	36,1%	1,7%	10%
toulon 1985	0,84	0,03	0,32	0,04	0,12	1,05	0,35	0,03	1,92	2,79	50,3%	13,0%	31,3%	5,4%	16%
toulon 1998	1,02	0,03	0,23	0,03	0,08	1,55	0,55	0,02	2,46	3,52	59,6%	7,5%	30,0%	2,9%	14%
toulouse 1978	0,95	0,13	0,28	0,02	0,18	1,08	0,35	0,02	1,92	3,00	47,7%	10,0%	35,9%	6,4%	16%
toulouse 1990	0,59	0,09	0,24	0,05	0,07	1,42	0,42	0,03	2,23	2,91	63,2%	10,1%	23,3%	3,3%	18%
toulouse 1996	0,77	0,10	0,28	0,06	0,04	1,74	0,49	0,04	2,65	3,52	63,3%	9,8%	24,6%	2,3%	12%
troyes 1998	0,87	0,13	0,19	0,03	0,08	1,85	0,62	0,02	2,79	3,78	65,4%	5,8%	26,2%	2,6%	13%
valence 1981	1,30	0,20	0,19	0,12	0,17	1,27	0,41	0,05	2,21	3,72	45,3%	8,3%	40,5%	5,9%	13%
valence 1991	0,76	0,20	0,10	0,09	0,08	1,83	0,61	0,06	2,76	3,72	65,5%	5,1%	25,8%	3,7%	13%
valenciennes 1985	1,11	0,22	0,19	0,07	0,07	1,09	0,54	0,07	2,04	3,37	48,4%	7,9%	39,4%	4,2%	18%
valenciennes 1997	0,96	0,14	0,19	0,04	0,04	1,48	0,64	0,06	2,44	3,55	59,6%	6,4%	31,2%	2,9%	18%

MAP : marche

2R : deux-roues

NC : non connu

Tableau 43 mobilités par mode dans les agglomérations françaises
(Source : enquêtes ménages déplacements)

Motorisation

	Population	Pop. 18 ans et +	Taux de motorisation des ménages	Taux de motorisation pop.	Taux de motorisation pop. 18 ans et +	Taux d'occupation VP
Aix 1989	227 000	174 000	1,28	0,48	0,63	1,34
Aix 1997	290 000	222 000	1,27	0,53	0,69	1,31
Amiens 1979	158 000	109 000	0,82	0,29	0,42	1,40
Amiens 1991	153 000	111 000	0,95	0,38	0,52	1,34
Angers 1989	199 000	150 000	1,01	0,43	0,57	1,29
Avignon 1980	131 000	101 000	0,94	0,36	0,46	1,32
Bayonne 1999	223 000	181 000	1,39	0,59	0,72	1,28
Belfort 1983	106 000	77 000	0,89	0,36	0,50	1,37
Belfort 1992	127 000	95 000	1,14	0,45	0,60	1,36
Bordeaux 1978	604 000	454 000	0,97	0,37	0,49	1,30
Bordeaux 1990	762 000	583 000	1,20	0,48	0,62	1,30
Bordeaux 1998	801 000	635 000	1,22	0,52	0,66	1,28
Cherbourg 1994	87 000	63 000	1,04	0,42	0,58	1,38
Clermont 1992	323 000	246 000	1,22	0,50	0,65	1,31
Côte d'azur 1998	1 030 000	824 000	1,04	0,48	0,60	1,33
Dijon 1988	221 000	166 000	0,94	0,39	0,52	1,30
Douai 1996	174 000	125 000	0,98	0,36	0,49	1,46
Dunkerque 1991	202 000	141 000	0,99	0,35	0,50	1,40
Elbeuf 1997	53 000	39 000	1,07	0,42	0,58	1,39
Etang De Berre 1990	326 000	234 000	1,27	0,44	0,62	1,36
Etang De Berre 1997	329 000	243 000	1,29	0,49	0,66	1,33
Fort De France 2000	170 000	124 500	0,90	0,34	0,47	1,40
Grenoble 1978	371 000	262 000	0,92	0,33	0,47	1,35
Grenoble 1985	380 000	281 000	1,07	0,41	0,55	1,33
Grenoble 1992	349 000	273 000	1,05	0,44	0,57	1,30
Le Havre 1992	238 000	175 000	0,96	0,37	0,51	1,39
Lille 1976	889 000	614 000	0,74	0,25	0,36	1,37
Lille 1987	1 093 000	776 000	0,94	0,34	0,48	1,41
Lille 1998	1 177 000	855 000	1,06	0,41	0,56	1,37
Lorient 1982	171 000	118 000	0,99	0,34	0,50	1,35
Lyon 1976	1 029 000	730 000	0,84	0,30	0,43	1,32
Lyon 1985	1 088 000	830 000	1,01	0,40	0,52	1,31
Lyon 1995	1 220 000	932 000	1,07	0,45	0,59	1,29
Marseille 1976	930 000	669 000	0,70	0,25	0,35	1,43
Marseille 1988	1 137 000	881 000	0,98	0,37	0,48	1,34
Marseille 1997	1 068 000	83 600	1,01	0,44	0,56	1,31
Metz 1992	177 000	136 000	1,01	0,42	0,55	1,32

	Population	Pop. 18 ans et +	Taux de motorisation des ménages	Taux de motorisation pop.	Taux de motorisation pop. 18 ans et +	Taux d'occupation VP
Mulhouse 1992	214 000	161 000	1,06	0,42	0,56	1,31
Nancy 1976	230 000	185 000	0,79	0,29	0,39	1,34
Nancy 1991	295 000	229 000	0,96	0,41	0,52	1,32
Nantes 1980	466 000	327 000	0,87	0,32	0,46	1,33
Nantes 1990	518 000	390 000	1,09	0,43	0,58	1,30
Orléans 1976	201 000	138 000	0,97	0,33	0,49	1,37
Orléans 1986	230 000	169 000	1,08	0,42	0,58	1,22
Paris 1976	9 691 000	NC	0,75	0,29	NC	1,31
Paris 1983	9 939 000	NC	0,87	0,35	NC	1,32
Paris 1991	10 464 000	NC	0,96	0,39	NC	1,31
Paris 1998	10 751 000	NC	0,96	0,40	NC	1,32
Perpignan 1984	117 000	92 000	0,80	0,34	0,43	1,36
Reims 1987	200 000	146 000	0,96	0,38	0,52	1,33
Reims 1996	221 000	170 000	1,03	0,43	0,56	1,32
Rennes 1991	309 000	235 000	1,20	0,47	0,62	1,31
Rennes 2000	352 000	268 000	1,11	0,50	0,65	1,28
Rouen 1996	382 000	289 000	1,02	0,43	0,56	1,33
Saint Etienne 1991	435 000	331 000	1,08	0,42	0,56	1,33
Saint Etienne 2001	510 000	402 000	1,10	0,45	0,57	1,32
Saint Nazaire 1996	187 000	141 000	1,21	0,51	0,68	1,35
Strasbourg 1988	386 000	295 000	0,95	0,38	0,50	1,34
Strasbourg 1997	508 000	388 000	1,07	0,45	0,58	1,29
Toulon 1985	289 000	223 000	0,92	0,36	0,47	1,33
Toulon 1998	357 000	282 000	1,09	0,48	0,60	1,35
Toulouse 1978	542 000	406 000	0,99	0,37	0,50	1,33
Toulouse 1990	681 000	548 000	1,21	0,49	0,61	1,30
Toulouse 1996	723 000	570 000	1,17	0,52	0,66	1,28
Troyes 1998	120 000	90 000	1,11	0,46	0,62	1,34
Valence 1981	130 000	95 000	1,01	0,38	0,52	1,33
Valence 1991	228 000	167 000	1,24	0,47	0,65	1,33
Valenciennes 1985	329 000	233 000	0,85	0,29	0,41	1,50
Valenciennes 1997	334 000	243 000	0,98	0,36	0,50	1,43

NC : non connu

Tableau 44 *motorisation dans les agglomérations françaises*
(Source : enquêtes ménages déplacements)

Annexe 4. Mise en place d'un nouveau TCSP, clientèle et usage.

Lille

		Déplacements en TCSP							
		non réguliers	réguliers						avant pas de déplacement
			avant en TC	avant VP conducteur	avant VP passager	avant train ou car	avant 2-R ou à pied		
		10,4 %	21,7 %	8,9 %	1,7 %	1,4 %	2,3 %	53,6 %	
Si pas de TCSP, déplacement aurait été fait en ...	TC	49,5 %	6,4 %	16,5 %	1,5 %	0,2 %	0,3 %	0,5 %	24 %
	pas de déplacement	13,9 %	1,5 %	1,5 %	-	-	-	-	10,9 %
	autre mode	36,6 %	2,5 %	3,7 %	7,4 %	1,5 %	1,1 %	1,8 %	18,7 %

Tableau 45 Ligne 1 du métro de Lille. Enquête avant/après -
Ouverture : mai 1983 - Enquête : Octobre 1984
(Source : Communauté Urbaine de Lille – Total fréquentation : 94 000 déplacements
- jour moyen ouvrable)

		Déplacements en TCSP						
		non réguliers	réguliers					avant pas de déplacement
			avant en TC	avant VP conducteur	avant VP passager	avant 2-R ou à pied		
		13,8 %	34,4 %	4,6 %	1,9 %	3,9 %	41,4 %	
Si pas de TCSP, déplacement aurait été fait en ...	TC	50,4 %	4,5 %	26,8 %	0,4 %	0,2 %	0,2 %	18,4 %
	Pas de déplacement	11,1 %	3,9 %	1,3 %	-	-	-	5,9 %
	Autre mode	38,4 %	5,4 %	6,3 %	4,3 %	1,7 %	3,7 %	17,1 %

Tableau 46 Ligne 2 du métro de Lille - Enquête avant/après
Ouverture : avril 1989 – Enquête : Janvier 1990
(Source : Certu - Évaluation des transports en commun en site propre. Indicateurs pour l'analyse et le suivi des opérations. – Total fréquentation 53 800 déplacements
- jour moyen ouvrable)

Île-de-France

Tramway St-Denis Bobigny (ouverture : décembre 1992)

RER E (ouverture juillet 1999)

A prendre sous toute réserve, enquêtes non standardisées entre RATP et SNCF

			Mode utilisé avant pour le déplacement						Non affecté
			Train	Marche	Bus	Autre TC	VP	Autres	
St-Denis Bobigny	13,5 %	Changement de domicile, de travail ou d'école 7,5 %	-	5,7 %	44,6 %	23,6 %	3,3 %	0,8 %	1,0 %
RER E	22,2 %	25 %	41,7 %	10 %			1,1 %	-	-

Tableau 47 Lignes Île-de-France – clientèle avant/après

Source : RATP, Tramway St-Denis Bobigny, effet sur le trafic et les déplacements. Résultat de l'enquête après mise en service. Enquête en mars 1993. Total fréquentation : 51 000 voyageurs (jour de l'enquête).

Transparents SNCF. Enquête fin 2000 . Total déplacements 143 548 (jour de l'enquête)

Annexe 5. Valeur du temps

Source : projet TRACE www.hcg.nl/projects/trace/trace1.htm

Le rapport Boiteux de 2001 [Commissariat Général du Plan 2001] référence dans ses annexes un nombre important de résultats, en particulier la liste établie en 1990 lors du projet européen EURET.

Le projet européen TRACE (4^{ème} PCRD) a recensé les valeurs du temps disponibles dans la littérature. Nous en reproduisons le tableau de synthèse.

Données en € 1998/h. Les valeurs sont sous-entendues en temps total de trajet, sauf les valeurs en italiques (temps dans le véhicule seulement) :

Pays	Mode	Motif professionnel	Domicile-travail	Autre
Autriche	tous modes	15,6/17,2		4,6
Autriche	usager VP		2,6	
Biélorussie	usager train		1,0	
Belgique	usager VP ou TC		4,0 à 4,7	
Belgique	voiture	21,4		
Danemark	voiture	18,6/19,4		
Finlande	tous modes		15,3	
Finlande	voiture	23,6/18,9		
Finlande	tous modes	21,3	3,6	2,1
Finlande	usager bus urbain		1,7 à 3,4	
	conducteur voiture		4,3 à 8,6	
Finlande	usager VP		9,6	
France	voiture	9,2/24,6		
France	usager train		8,9 à 22,6	
Allemagne	voiture	18,9		3,6
Allemagne	voiture	15,0/24,6		
Allemagne	voiture	53,0	26,5	10,6
Allemagne	voiture		2,8/5,6	
	bus		63,1	
Grèce	voiture	5,3/6,4		
Irlande	voiture	10,4/17,4		
Irlande	voiture		4,2 à 5,1	
	usager TC		1,6 à 5,1	
	modes lents		3,3 à 10,2	
Italie	voiture	21,0		
Italie	usager VP		17,0	

Pays	Mode	Motif professionnel	Domicile-travail	Autre
Luxembourg	voiture	19,9		
Moldavie	usager train	0,3 à 2,4		
Pays-Bas	voiture	19,3/20,6		
Pays-Bas	conducteur VP	20,9	6,3	5,1
	passager VP	16,7	5,0	4,0
	usager train	18,4	6,5	4,4
	usager bus/tram	18,3	5,3	3,1
	total	20,9	6,3	4,8
Norvège	voiture, interurbain	22,6	10,8	
	ferry interurbain	16,3	9,4	
	rail interurbain	14,5	6,8	
	bus interurbain	9,4	6,0	
	air, interurbain	33,4	20,4	
	voiture, urbain	17,1	4,9	
	rail, urbain	13,3	6,0	
	bus/tram, urbain	13,3	3,6	
Portugal	voiture	6,4/10,9		
Russie	usager train	1,0 à 1,5		
Espagne	voiture	6,4/12,9		
Suède	voiture	23,7/21,3		
Suède	usager TC	1,0 à 1,3		
	usager VP	5,8 à 6,6		
Suède	conducteur VP < 50 km	19,5	4,0	3,2
	conducteur VP > 50 km	19,5	9,5	
	air > 50 km	16,5	10,3	
	train IC > 50 km	15,1	8,7	
	train X2000 > 50 km	15,7	11,9	
	train régional		6,3	5,0

Pays	Mode	Motif professionnel	Domicile-travail	Autre
	<50km			
	train régional >50km			8,2
	bus longue distance <50km		5,5	3,3
	bus longue distance >50km			7,6
	bus régional <50km		5,0	3,3
	bus régional >50km			5,9
Suède	usager VP			21,0
Ukraine	usager train			0,7
Grande Bretagne	conducteur VP	5,8 to 11,5 ¹	5,3 à 7,7	5,4 à 6,6
Grande Bretagne	conducteur VP		4,2 à 7,3	3,3 à 4,2
Grande Bretagne	conducteur VP	18,5		5,4
	passager VP	15,4		5,4
	automobile	21,6		7,3
	usager bus	15,4		
	bus (véhicule)			81,6
Grande Bretagne	automobile	16,2/16,4		
Grande Bretagne	automobile	3,0 à 4,8	5,3 à 10,1	3,0 à 6,1
Grande Bretagne	conducteur VP	20,8 (6,5 ¹)	5,2	4,4
	passager VP	20,8 (6,5 ¹)	5,8	3,0
	car			48,5 à 58,0
	car « charter »			22,5 à 32,0
	bus			16,5
	bus « charter »			0 à 24,0
Grande Bretagne	usager VP			6,1
Grande Bretagne	usager VP			4,0
Grande Bretagne	tous modes	20,8		5,8
	usager VP		4,9	5,2

Annexe 6. Anciennes courbes débit-vitesse DAVIS

Ancienne classification proposée pour la formulation DAVIS	
Type de voie	Coefficient de courbure
Voie rapide	0,66
Voie primaire	0,5
Voie secondaire	0,3
Voie tertiaire	0

Annexe 7. Taux de correspondances (enquête TCU) – année 2000

Précaution: le taux de correspondance est estimé en divisant le nombre annuel de voyages effectués sur services ordinaires par le nombre de déplacements sur ces mêmes services. Les enquêtes effectuées par les réseaux pour obtenir cette information donnent le plus souvent directement un taux de correspondance à partir duquel on calcule le nombre de déplacements.

Nom des réseaux	Population du PTU	tx de corresp.
Lille	1 083 204	1,369
Marseille	807 726	1,651
Bordeaux	633 823	1,28
Toulouse	631 579	1,333
Nantes	510 511	1,352
Strasbourg	433 101	1,35
Rouen	392 243	1,236
Grenoble	378 261	1,309
Nice	345 674	1,295
Valenciennes	336 056	1,205
Rennes	329 473	1,2
Saint-Etienne	316 262	1,4
Toulon	303 449	1,05
Montpellier	285 409	1,25
Tours	274 140	1,174
Joue Les Tours	268 500	1,23
Nancy	263 280	1,204
Lens	253 166	1,14
Orleans	249 077	1,277
Angers	246 903	1,046
Havre (Le)	244 523	1,102
Clermont-Ferrand	241 618	1,14
Dijon	230 475	1,187
Lorient	225 273	1,11
Brest	213 838	1,292
Mulhouse	212 080	1,246
Reims	212 036	1,317
Dunkerque	210 396	1,083

Nom des réseaux	Population du PTU	tx de corresp.
Caen	195 894	1,19
Mans (Le)	185 506	1,274
Metz	174 645	1,1
Limoges	173 460	1,328
Bethune	147 326	1,176
Pau	130 446	1,082
Henin Carvin	129 595	1,022
Montbéliard	124 581	1,18
Bayonne	124 409	1,12
Saint-Denis De La Reunion	122 875	1,164
Rochelle (La)	122 685	1,07
Troyes	122 587	1,18
Anancy	120 417	1,11
Besancon	119 194	1,164
Belfort	118 892	1,124
Chambery	108 244	1,13
Saint-Brieuc	106 641	1,09
Angouleme	106 605	1,225
Creusot (Le) - Montceau-Les-Mines	101 103	1,1
Bourges	100 407	1,1
Cherbourg	97 720	1,12
Chalon-Sur-Saone	96 164	1,073
Chartres	85 962	1,1
Colmar	82 197	1
Vannes	80 825	1,14
Saint-Quentin	77 403	1,11
Calais	75 836	1,028
Roanne	71 584	1,12
Chateauroux	71 500	1,147
Creil	70 385	1,253
Perigueux	65 311	1,076
Chalons-En-Champagne	64 748	1
Evreux	63 972	1,15
Nevers	62 956	1,05
Forbach	62 758	1

Nom des réseaux	Population du PTU	tx de corresp.	Nom des réseaux	Population du PTU	tx de corresp.
Quimper	62 541	1,183	Givors	31 461	1,05
Martigues	61 783	1,14	Laon	30 800	1,28
Niort	61 330	1,031	Ciotat (La)	30 748	1,05
Longwy	58 503	1,032	Menton	29 474	1,04
Bourg-En-Bresse	57 491	1,09	Chaumont	28 900	1,045
Montargis	56 262	1,05	Saintes	28 893	1,12
Vichy	56 205	1,1	Bergerac	27 700	1,037
Annemasse	55 758	1,07	Fougeres	27 285	1
Nancy-Suburbain	53 804	1	Sarreguemines	25 000	1
Montauban	53 278	1,05	Auch	24 728	1,095
Arles	52 593	1,152	Saint-Die	23 670	1
Dreux	51 740	1,15	Concarneau	23 257	1,05
Epinal	51 637	1,091	Bourgoin-Jallieu	22 749	1,05
Tarbes	50 228	1,1	Cahors	22 677	1,02
Albi	49 644	1,12	Morlaix	22 616	1,17
Villefranche-Sur-Saone	49 484	1,1	Libourne	21 931	1,05
Saint-Malo	49 274	1,22	Fecamp	21 143	1,33
Roche-Sur-Yon (La)	48 518	1,162	Bar-Le-Duc	21 042	1
Soissons	47 693	1,01	Lons-Le-Saunier	20 140	1,082
Narbonne	47 086	1,05	Lannion	16 971	1,002
Alencon	46 848	1,14	Metz - Ligne 17 St Julien	16 053	1,1
Castres	46 292	1,075	Les Metz		
Saint-Chamond	43 548	1,04	Thiers	15 407	1,1
Mont-De-Marsan	39 090	1,187	Metz - Ligne 16 Marly	13 549	1,1
Chatellerault	38 840	1,08	Langres	11 026	
Macon	38 508	1,04	Gros-Morne	10 141	1
Rodez	36 993	1,003	Sainte-Marie-Aux-Mines	5 958	1
Saint-Louis	36 905	1	Sainte-Menehould	5 178	1
Thonon-Les-Bains	35 982	1,2	Vitre	14 486	1,037
Saint-Dizier	35 558	1			
Louviers	34 448	1,12			
Grand-Besancon	34 000	1,21			
Vierzon	32 900	1,2			
Dax	31 898	1,119			

Annexe 8. Liste des organismes contactés pour commenter la version provisoire de l'ouvrage

ADEME
CETE de l'Est
CETE de l'Ouest
CETE Lyon
CETE Méditerranée
CETE Nord-Picardie
CETE Normandie-Centre
CETE Sud-Ouest
COFIROUTE
DDE Lille
DREIF
IMTRANS
INRETS
INRO
ISIS
LET
Communauté Urbaine de Lille
METL/DAEI/SES
METL/DTT
MVA
RATP
RFF
SEMALY
SETRA
SNCF
STIF
STRATEC
SYSTRA
THALES Engineering et Consulting

Annexe 9. Glossaire

Mot-clé	Définition
Affectation	Répartition de la demande sur le réseau modélisé.
Aire d'étude	Territoire cohérent dont on étudie le système de transport
Arc	Segment homogène entre deux nœuds du réseau caractérisé par sa longueur, le sens de circulation et ses modalités d'exploitation (capacité des voies ou des véhicules, vitesse, fréquence, horaires ...).
Calage	Reconstitution au mieux par le modèle des phénomènes réels tels qu'ils peuvent être mesurés (débit, temps de parcours, flux origine-destination, taux de correspondance pour un modèle TC, répartition modale pour un modèle multimodal)
Calage	Phase de la modélisation qui a pour objet de reconstituer une situation connue par des comptages, des mesures de temps de parcours, des enquêtes OD.
Centroïde	Point d'émission/attraction du trafic d'une zone donnée vers le réseau, correspondant généralement au barycentre de la zone
Connecteur (ou arc fictif)	Arc entre un centroïde et un nœud ordinaire du réseau, représentant les différents chemins possibles à l'intérieur d'une zone pour rejoindre le réseau modélisé. Plusieurs connecteurs sont souvent nécessaires pour relier une zone donnée au réseau.
Courbe débit-vitesse	Pour un réseau routier, relation fondamentale entre la vitesse (V) et le trafic (Q) sur un arc donné ; dans les modèles, la fonction f telle que $V = f(Q)$ est toujours biunivoque, contrairement à ce qui se passe dans la réalité (à un faible débit peut correspondre une vitesse élevée en écoulement normal, ou une vitesse faible en cas de congestion).
Coût généralisé, temps généralisé	Fonction qui s'apparente sur le plan économique à une désutilité de se déplacer. Il s'agit en général d'une somme pondérée de temps caractéristiques du déplacement et de son coût. Selon que l'on multiplie le temps par la valeur du temps ou que l'on divise le coût par cette même valeur on parle de coût ou de temps généralisé.
Demande de déplacement	Flux de déplacements, avérés ou potentiels, dans l'aire d'étude, généralement sous la forme de matrices origine-destination. Le terme « demande » peut aussi faire référence aux auteurs des déplacements.
Distribution	Processus de modélisation de la répartition des flux générés et attirés par une zone donnée entre les autres zones de l'agglomération (détermination des flux correspondant aux différentes origines-destinations possibles) en fonction des attributs des systèmes de transport
Enquête ménages déplacements	Enquête auprès d'un échantillon des ménages résidents d'une agglomération permettant de caractériser leurs déplacements
Facteur de croissance	Méthode consistant à construire une matrice par déformation d'une matrice existante, faisant généralement appel à un algorithme dit de FRATAR
Flux interne, d'échange et de transit	Un flux de déplacements est interne à une aire d'étude lorsque son origine et sa destination sont à l'intérieur de l'aire considérée. Il est d'échange lorsque seule l'origine ou la destination est à l'intérieur de l'aire d'étude. Il est de transit lorsque ni l'une ni l'autre ne sont à l'intérieur de l'aire considérée : le flux ne fait alors que traverser l'aire
Focalisation	Processus qui consiste à transformer les matrices correspondant au zonage de base, en matrices correspondant à un macro-zonage
Fonction d'utilité	Fonction descriptive du comportement des individus, issue d'observations (enquêtes-ménages, enquêtes de préférences révélées ou déclarées), qui est souvent, mais pas nécessairement, une combinaison linéaire de variables descriptives de l'offre de transport, des individus et éventuellement de la destination du déplacement.
Génération	Processus de modélisation des flux émis et attirés par les zones modélisées, pour la période considérée, faisant intervenir les caractéristiques socio-économiques des zones et les caractéristiques de mobilité
Histogramme des distances	Histogramme représentant les nombres de déplacements d'une matrice répartis en classes de distance (par exemple : 0-1 km, 1-2 km ...)

Mot-clé	Définition
Impédance	Fonction caractérisant l'offre de transport et servant à la recherche des itinéraires et à l'affectation ; il peut s'agir d'un coût ou d'un temps généralisé dont la construction repose sur les différents attributs d'offre et sur des pondérations fixées par l'utilisateur.
Ligne	ensemble des véhicules assurant la desserte d'un itinéraire précis, caractérisée par un horaire de passage ou bien une fréquence de desserte et une vitesse commerciale
Logiciel	Outil informatique permettant de mettre en œuvre des modèles de déplacement, de représenter le système d'offre de transport et d'affecter la demande sur le (ou les réseaux) de transport selon des algorithmes variés et de visualiser les résultats.
Macro-zonage	Assemblage des zones du zonage de base en macro-zones relativement homogènes du point de vue de la problématique relative à une question particulière
Mission	Liste d'arrêts desservis sur une ligne par un même véhicule : on aura par exemple sur une ligne des missions directes entre terminus et des missions omnibus desservant tous les arrêts.
Modèle de choix discret	Modèle permettant de déterminer la probabilité de réalisation des différentes alternatives envisageables (choix d'un mode, choix d'un mode et d'une destination), supposées en nombre fini, à partir de la description des caractéristiques des individus et des alternatives.
Modèle de déplacement	Représentation schématique et mathématique des processus de déplacement, intégrant un ensemble d'hypothèses, de bases de données et d'outils mathématiques.
Modèle désagrégé	Modèle décrivant le comportement des individus pris séparément, par opposition à un modèle agrégé où l'on décrit le comportement d'individus moyens représentatifs de zones géographiques.
Modèle économétrique	Modèle visant à établir des corrélations entre les évolutions d'un paramètre global (circulation...) et celles du contexte économique d'une aire d'étude, caractérisé par des variables économiques (population totale, coût des carburants, revenu moyen par personne...)
Modèle gravitaire	Modèle de distribution fondé sur le principe « gravitaire » selon lequel les flux entre deux zones sont d'autant plus grands qu'elles sont « proches » et que leur « poids » est important
Motif d'un déplacement	Le motif d'un déplacement est codifié par rapport aux fonctions ou activités des lieux de départ et d'arrivée vis-à-vis de la personne considérée (ex. : Domicile [à l'origine] ⇒ Achats [à la destination])
Nœud	Point d'intersection ou point de séparation entre deux segments homogènes du réseau, identifié par un numéro et caractérisé par ses coordonnées dans le plan
Offre de transport	Ensemble des moyens de transports existants ou projetés représentés dans un modèle par leurs caractéristiques physiques, tarifaires et/ou fonctionnelles (géométrie, capacité, vitesse, fréquence, effet d'image, etc.)
Réseau	Représentation des voies de communication ou des lignes de transport public utilisables pour les déplacements modélisés dans l'aire d'étude et représentant l'offre de transport ; un réseau modélisé apparaît généralement sous la forme d'un ensemble de points (nœuds) reliés entre eux par des segments homogènes (arcs)
Rupture de charge	correspondance entre deux TC
TC	Transports en commun par opposition au transport en véhicule individuel (voiture ou moto personnelle) ; les taxis n'appartiennent pas aux transports en commun sauf dans des cas spécifiques où des taxis collectifs assurent une offre de transport public
Temps de parcours (porte à porte)	c'est le temps passé entre le moment où on quitte son lieu d'origine et où on arrive à sa destination finale ; ce temps inclut le temps passé pour se rendre à l'arrêt de TC le plus proche ou le mieux adapté, le temps d'attente, le temps de trajet (dans le véhicule TC), le temps de correspondance éventuel puis le temps pour se rendre du dernier arrêt de TC à sa destination finale.
Temps de trajet (ou temps à bord)	temps à l'intérieur du véhicule
UVP	Unité de véhicule particulier, permettant d'assimiler un bus ou un PL à plusieurs VP, du fait de l'espace qu'ils occupent sur la voirie (par exemple 1 PL = 2 UVP).

Mot-clé	Définition
Validation	Vérification de certains résultats du modèle dès sa constitution (ou peu de temps après) de manière à juger s'il est réaliste et cohérent
VP	Véhicule Particulier, servant au déplacement des voyageurs par opposition aux transports en commun (TC) et aux véhicules utilitaires légers (VUL) ou lourds (PL), destinés non au déplacement de personnes mais au transport de marchandises .
Zonage	Découpage de l'espace modélisé en territoires homogènes (zones) du point de vue des déplacements, qui servira de base à l'élaboration de la demande modélisée (les matrices de demande donneront les déplacements entre les zones)
Zone externe	Partie de l'espace extérieur à l'aire d'étude, délimitée grossièrement, faiblement impliquée dans le système de transport étudié, modélisée seulement par un "poste cordon", émetteur-récepteur de trafic influant sur l'espace modélisé
Zone interne	Sous-ensemble cohérent de lieux dans l'aire d'étude

Annexe 10. Abréviations

CNT	Conseil National des Transports
CSP	Catégorie socioprofessionnelle
EGT	Enquête générale transport
EMD	Enquête ménages déplacements
FNTR	Fédération Nationale des Transports Routiers
HPS	Heure de pointe du soir
OD	Origine – destination
PIB	Produit intérieur brut
PK	Point kilométrique
PL	Poids lourd
PTC	Poids total en charge
PM	Période moyenne
PPM	Période de pointe du matin
PPS	Période de pointe du soir
RGP	Recensement général de la population
SIG	Système d'information géographique
TC	Transport collectif
TCSP	Transport en commun en site propre
UVP	Unité de véhicule particulier
VL	Véhicule léger
VP	Véhicule particulier
VRU	Voie routière urbaine

Annexe 11. Bibliographie détaillée

Chapitre 1 : Ouvrages généraux

Titre	Année	Auteur	Éditeur Demandeur	Commentaires
Les études de prévision de trafic en milieu urbain - Guide technique	Juil-90	CETUR	Ministère de l'Équipement	Document de synthèse, faisant le point sur le savoir-faire français en matière de modélisation du trafic en milieu urbain, au début des années 90.
Modelling transport	1990, 3ème édition : 2001	J. de Dios Ortuzar L. G. Willumsen	John Wiley & Sons	Cet ouvrage très complet, auquel le présent manuel se réfère fréquemment (en particulier pour les chapitres consacrés à l'estimation de la demande et au choix modal), est un cours d'université ; il contient donc de nombreux développements mathématiques théoriques.
Modelling of urban transport	1996	CSST - Heusch/ Boesefeldt - MVA - Napier University	European Communities (Transport Research / APAS / Urban Transport)	Cet ouvrage, commandé par l'union européenne, traite non seulement des modèles de planification des transports, mais également des systèmes de contrôle du trafic et des interactions entre ces deux concepts complémentaires. Il dresse un panorama assez exhaustif de l'existant.
Handbook of transport modelling	2000	David A. Hensher Kenneth J. Button	Pergamon	L'objectif de cet ouvrage exhaustif est de fournir à ses lecteurs, intéressés par la modélisation des transports à des titres divers, les éléments permettant de comprendre les techniques les plus variées pouvant être utilisées pour la modélisation. Il s'agit d'un manuel abondant de façon détaillée les problèmes parmi les plus complexes de la modélisation des déplacements.
Travel forecasting guidelines	nov-92	JHK & Associates	California Department of Transportation	Ce guide pratique américain établit une liste de recommandations pratiques pour constituer un modèle urbain en Californie. Rigoureux et de niveau international, le guide contient notamment un chapitre consacré aux émissions de polluants.
Quick response urban travel estimation techniques and transferable parameters. User's guide	1978	National Cooperative Highway Research Program	Transportation Research Board	Ce guide pratique, évidemment ancien, traite de l'ensemble des aspects de la modélisation. Comme nombre d'ouvrages américains, il contient de multiples abaques, tableaux et courbes expérimentaux.

Modèles de déplacements en milieu urbain : l'expérience américaine Rapport final	oct-00	MVA Consultants	DRAST	Cette étude est consacrée à ce que MVA appelle une troisième génération de modèles (après les modèles monomodaux et ceux axés sur le choix modal). En général, ces modèles sont fondés sur les chaînes d'activité, reposent souvent sur des enquêtes de préférences déclarées, sont liés à un SIG, traitent des modes doux et incorporent l'impact sur l'air.
Re-estimation du modèle stratégique de déplacements sur l'agglomération bordelaise - Présentation du modèle stratégique "MOSTRA"	oct-98	SEMALY (V. Lichère)	Communauté Urbaine de Bordeaux	A travers l'exemple développé à Bordeaux, ce document décrit le modèle stratégique MOSTRA mis au point par la SEMALY et le LET, testé également à Lyon et Grenoble. L'objectif de ce modèle est d'évaluer, en ordre de grandeur, les effets des tendances structurelles et des choix de politique urbaine sur les conditions de déplacement.
Guide des études de trafic interurbain Guide méthodologique	mai-92	SETRA	SETRA	Ce guide est essentiellement consacré aux études de trafic routier en milieu interurbain (une formule donnant la part du trafic ferroviaire figure cependant en fin de volume).
La modélisation des déplacements intermodaux Rapport final	sept-99	SEMALY (V. Lichère)	Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement (PREDIT)	Ce rapport de recherche (PREDIT) fait le point sur les connaissances expérimentales et théoriques en matière d'intermodalité et propose des pistes pour améliorer la modélisation dans ce domaine, encore mal maîtrisé. Des résultats d'enquêtes sont donnés.
La modélisation des contraintes de stationnement Rapport final	juin-00	SEMALY / LET	Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement (PREDIT)	Ce rapport de recherche (PREDIT) est composé de trois grandes parties : une analyse bibliographique sur la modélisation du stationnement, une maquette de modèle et un point sur les données existantes et manquantes.
Circulation automobile et péri-urbanisation	2001	M. Girault d'après une étude de A. Berri et JL. Madre	Note du SES Mai-Juin 2001	Cette note résume les principaux enseignements d'une projection de la circulation automobile menée par l'INRETS en prenant en compte plusieurs scénarios de péri-urbanisation. L'étude montre que cette dernière a en fait un impact limité, la circulation augmentant avec la croissance démographique et celle du revenu national, quel que soit le lieu de résidence de la population.
UrbanSim : Modeling Urban Development for Land Use, Transportation and Environmental Planning	2001	P. Waddell	University of Washington	Description du modèle urbanisme-transport UrbanSim.

Chapitre 2 : Zonage et réseau

Titre	Année	Auteur	Éditeur Demandeur	Commentaires
Ingénierie du trafic routier - Éléments de théorie du trafic et applications	1990	Simon Cohen	ENPC	Ce cours de l'ENPC fournit les fondements des méthodes de recueil et d'exploitation des données de trafic. Il dépasse le seul problème de la modélisation macroscopique statique, puisqu'une partie importante de l'ouvrage est consacrée aux carrefours à feux et à la régulation.
Caractéristiques des flots de trafic - Cours d'ingénierie du trafic	1987	Simon Cohen	INRETS	Cours de l'ENPC, étudiant la théorie des courbes débit/vitesse et concentration/débit.
Exemples de courbes "débit - vitesse" sur des infrastructures routières rapides	sept-91	S. Cohen (INRETS)	Direction de la Prévision Ministère du Budget	Cette note présente les traitements statistiques (courbes débit/vitesse, concentration/débit et concentration/vitesse) effectués sur des données de trafic recueillies automatiquement sur trois types de routes : voies rapides urbaines de type boulevard périphérique, autoroutes urbaines ou de dégagement, autoroutes de liaison. L'effet des poids lourds est également modélisé.
Écoulement du trafic sur artères, voies rapides et autoroutes péri-urbaines - Traitements statistiques de données récentes	août-93	S. Cohen (INRETS)	SOGELERG Ingénierie	Document analogue au précédent avec des données parisiennes (périphérique, maréchaux), franciliennes (A6 et A13) et lilloises (avenue de la République).
Les relations " temps de parcours-débit " sur le réseau routier d'Île-de-France. Un outil pour la planification,	févr-01	S. Cohen (INRETS), MY. Zhang (SRILOG), P. Ginier (DREIF)	RGRA n°792	Cet article présente les éléments essentiels d'un travail (voir les deux références citées ci-après) visant à actualiser les courbes temps de parcours-débit utilisées pour les questions de planification des transports routiers en Île-de-France. L'objectif de la recherche consiste d'abord à élaborer une méthodologie de calibrage fondée sur les données habituellement fournies par les systèmes d'exploitation. Par la suite, la méthode est appliquée à diverses catégories d'aménagements : autoroutes et voies rapides, routes nationales (RN sans feux) et artères urbaines signalisées (RN avec feux).

Calibrage des courbes "temps de parcours-débit" en Île-de-France - Rapport de synthèse	avr-00	SRILOG	DREIF	Méthodologie de l'étude comparant les mesures effectuées en Île-de-France à plusieurs modélisations des courbes débit-vitesse (BPR, Davis, Leurent simplifié et Leurent complet). Résultats de l'étude citée ci-dessus : calibrage de courbes débit-vitesse sur A6a, A86, A15, N118, N7, N10 et N6.
Étude des courbes vitesse-débit	juil-99	F. Barbier Saint Hilaire	INRETS	Traitement complémentaire des mesures SRILOG, regroupant notamment les mesures par classe horaire ; l'étude de la courbe-enveloppe permet une estimation de la capacité du tronçon indépendamment des conditions de congestion amont et aval. L'auteur dégage également des lois génériques pour les autoroutes et voies rapides.
Lois de poursuite et circulation en file - Cours d'ingénierie du trafic	1987	Simon Cohen	INRETS	Cours de l'ENPC, étudiant les mécanismes régissant les interactions entre les véhicules circulant en file ; cette théorie trouve notamment des applications pour l'élaboration des modèles microscopiques de simulation du trafic routier.

Chapitre 3 : Demande actuelle

Titre	Anne	Auteur	Éditeur Demandeur	Commentaires
Résultats de base des enquêtes ménages - Angers - Dijon - Lille - Lyon - Marseille - Orléans - Reims - Strasbourg - Toulon	janv-90	CETUR	Ministère de l'Équipement	Résultats d'enquêtes-ménages réalisées dans 9 villes de province, fournissant des indications intéressantes sur le nombre et la structure des déplacements à la fin des années 80.
Résultats de base des enquêtes ménages - Aix-en-Provence - Bordeaux - Etang-de-Berre - Mulhouse - Nantes - Toulouse	févr-92	CETUR	Ministère de l'Équipement	Idem précédent dans 6 agglomérations supplémentaires.
Générateurs de trafic - Centres commerciaux et zones industrielles	sept-87	CETE Méditerranée	CETUR	Recueil de données expérimentales (comptages VL et PL) ramenées aux caractéristiques (surfaces, emplois) de centres commerciaux et de zones industrielles.
Zones et établissements générateurs de trafic - Recueil de données de comptage - Administrations, aéroports, gares SNCF, hôpitaux, surfaces commerciales, zones d'activité, etc.	avr-99	Département Mobilité, Transport et Service Urbain	CERTU	Étude analogue à la précédente, mais plus récente et portant sur un nombre plus important de types de générateurs particuliers. Même si les enseignements sont difficiles à généraliser (chaque cas est particulier), ces enquêtes permettent toutefois de déterminer des ordres de grandeur intéressants.
Déplacements interurbains des ménages	avr-89	JP. Augagneur	SETRA (note d'information n°16)	Cette note diffuse certains résultats généraux relatifs à la mobilité interurbaine des ménages : qui se déplace ? pour quel motif ? quand ? à quelle distance ?
Estimation des matrices origine-destination par les comptages et la théorie de l'information	sept-90	DART	INRETS	Théorie de l'estimation de matrices origine-destination à partir de données de comptages (approche par entropie). Application : modèle CEcipe.

Chapitre 4 : Demande future

Titre	Année	Auteur	Éditeur Demandeur	Commentaires
Prévisions à long terme du trafic automobile	mai-89	CREDOC JL. Madre / T. Lambert	SETRA	L'objectif de cette étude était d'expliquer l'évolution de la circulation automobile sur une longue période et de la projeter à long terme, au niveau national ; deux approches ont été menées en parallèle : une approche démographique prenant en compte le vieillissement de la population et une approche économétrique, dans laquelle les principaux facteurs explicatifs identifiés sont la croissance du réseau autoroutier, le parc automobile, le revenu réel des ménages, le prix des carburants.
Régionalisation des projections à long terme de la circulation automobile - Rapport de convention avec le SETRA	avr-92	INRETS	INRETS	Modèle économétrique ayant pour objectif d'expliquer au niveau régional l'évolution de la circulation automobile sur une longue période ; les principaux facteurs explicatifs identifiés sont la croissance du réseau autoroutier, le parc automobile, le revenu réel des ménages, le prix des carburants. Les régions ont été classées en trois grands groupes.
Prévision multimodale des déplacements par un modèle d'activités Application au PDU de l'agglomération grenobloise	déc-99	W. Scherr (PTV) F. Duoux (AURG) P. Morel (AURG)	TEC (n°156)	Description d'un modèle conjoint de choix modal-distribution, sur la base des résultats de l'enquête-ménages, avec prise en compte des boucles de déplacements ; modèle de choix discret de type logit, utilisation des logiciels Visem et Davisum.
Évolution du trafic journalier moyen annuel toutes catégories de jours, deux sens cumulés 1955 - 1983	1988	DREIF	DREIF	Données de comptages sur l'évolution du trafic des autoroutes franciliennes après leur mise en service.
Analyse comportementale de l'effet "Build-up" ou montée en régime à l'ouverture d'une infrastructure	1996	Erika Csordas	ENPC	Étude de cas sur des infrastructures routières ayant pour but d'évaluer les phénomènes de montée en charge (en anglais build-up ou ramp-up), notamment pour les ouvrages à péage.

Chapitre 5 : Choix modal

Titre	Anne	Auteur	Éditeur Demandeur	Commentaires
Discrete Choice Analysis : Theory and Application to Travel Demand	1985	M. Ben- Akiva S. Lerman	The MIT Press	Ouvrage fondamental sur les méthodes de choix discret. La théorie et tous les développements mathématiques de ces méthodes y sont exposés en détail.
Self-Instructing Course in Disaggregate Mode Choice Modelling (http://www.bts.gov/NTL/DOCS/381SIC.html)	déc-86	J. L. Horowitz, F. S. Koppelman & S. R. Lerman	Federal Transit Administration, FTA	Ce cours disponible sur Internet fournit les bases de la pratique de la modélisation désagrégée en associant théorie et exercices.
Comportements de déplacement en milieu urbain : les modèles de choix discrets. Vers une approche désagrégée et multimodale	juin-98	CERTU / MVA	CERTU	Ce dossier a pour objectif de présenter en français les modèles de choix discret et d'impulser un mouvement pour la diffusion de la modélisation désagrégée et multimodale des déplacements en France. Il comprend deux grandes parties : approche théorique et méthodologique, puis approche pratique (exemples concrets).
Mobilité quotidienne et dynamiques urbaines La question du report modal	2000	V. Kaufmann	Presses polytechniques et universitaires romandes	Écrit par un sociologue, cet ouvrage analyse - à travers l'expérience de trois villes suisses et de Grenoble - les logiques d'action sous-jacentes aux pratiques de mobilité quotidienne, à partir de la constatation que l'amélioration des transports publics attire peu d'automobilistes.
Les citoyens face à l'automobilité - Étude comparée des agglomérations de Besançon, Grenoble, Toulouse, Berne, Genève et Lausanne	juin-98	V. Kaufmann (EPFL) JM. Guidez (CERTU)	CERTU / ADEME / UTP	Étude comparée des agglomérations de Besançon, Grenoble, Toulouse, Berne, Genève et Lausanne, ce dossier tente de déterminer les facteurs explicatifs des différences de comportement entre les villes françaises et suisses, germanophones et francophones. L'explication paraît résider essentiellement dans les offres de stationnement et dans l'articulation entre les réseaux de transports et l'urbanisation ; en outre, des raisons historiques et culturelles peuvent entraîner des comportements radicalement différents (cas de Berne)
Modèles désagrégés de choix modal - Réflexions méthodologiques autour d'une prévision de trafic	août-88	DEST	INRETS	Ce rapport présente la méthode utilisée (modèle désagrégé, logit) utilisée par l'INRETS pour prédire le trafic d'Orlyval. (Il faut noter que le trafic réel a été très inférieur aux prévisions.)

La modélisation multimodale des déplacements régionaux des personnes Guide méthodologique	sept-98	MVA Consultants	MELTT DAEI SES	Ce guide méthodologique a un objectif analogue à celui du présent manuel, mais à l'échelle régionale et non urbaine. Son apport essentiel réside dans la description des différents modèles de choix modal. Des paragraphes spécifiques sont consacrés aux déplacements inter-cités, aux déplacements péri-urbains et à ceux effectués dans le "rural profond".
Stated Choice Methods : Analysis and Application	2000	J. J. Louvière D. A. Hensher J. D. Swait	Cambridge University Press	Ouvrage de référence sur les méthodes de préférences déclarées destinées à étudier et à prévoir les choix et les comportements du consommateur. Un chapitre spécifique donne des études de cas pour le secteur des transports.
Manuels de l'utilisateur des logiciels ALOGIT, HIELOW, TRIO				

Chapitre 6 : Affectation VP

Titre	Année	Auteur	Éditeur Demandeur	Commentaires
Affectation du trafic - Présentation économique des modèles et quelques aspects pratiques - Cours d'ingénierie du trafic		Simon Cohen	INRETS	Cours de l'ENPC présentant de façon synthétique les différents modèles d'affectation du trafic.
Constitution d'une boîte à outils pour opérer diverses affectations statiques du trafic routier	févr-95	Fabien Leurent	INRETS	Ce document a pour objectif de rendre accessibles au praticien de l'affectation les principaux mécanismes explicatifs et procédés de calcul. Il contient notamment l'"inventaire d'un arsenal mathématique" et présente MARS, un logiciel pour l'affectation statique du trafic sur un réseau routier.
Network knowledge and route choice	sept-01	Michael Scott Ramming	Massachusetts Institute of Technology	Cette thèse part de la constatation que, contrairement au postulat de la plupart des modèles d'affectation, la majorité des conducteurs ne minimise pas le temps ou la distance de son trajet. L'auteur tente ensuite d'expliquer le comportement réel des conducteurs par différentes modélisations.
Théorie et pratique de l'estimation des paramètres comportementaux dans un modèle d'affectation du trafic	sept-95	F. Leurent	INRETS-DEST	Cet article propose des estimateurs du maximum de vraisemblance, à employer avec des observations individuelles issues d'enquêtes aux itinéraires classiques, afin d'estimer les paramètres comportementaux de trois différents principes de répartition : logit linéaire, logit logarithmique type Ariane, prix-temps.
Transport : choix des investissements et coûts des nuisances (Rapport Boiteux)	juin-01	Collectif sous la présidence de M. Boiteux, rapporteur général : L. Baumstark	Commissariat Général du Plan	Prolongement du rapport de 1994 intitulé " Transports : pour un meilleur choix des investissements ", ce document approfondit des domaines précédemment jugés peu accessibles à l'analyse économique, comme la congestion urbaine, la pollution ou l'occupation de l'espace. Il s'intéresse particulièrement à la valeur du temps (chapitre 2 du document).

Comportement des automobilistes face au péage urbain. L'expérience du tunnel PRADO-CARENAGE	févr-99	C. Maresca (CETE d'Aix) F. Leurent (INRETS) J. Delons (Cofiroute) C. Segonne (LET) L. Clément (CERTU)	CERTU	Cette étude avait pour objectif d'évaluer la valeur du temps en milieu urbain à partir de l'expérience du tunnel du Prado-Carénage à Marseille, premier ouvrage urbain à péage en France. Menée sur quatre ans, utilisant des enquêtes de préférences déclarées et révélées, cette étude a permis d'analyser le comportement des automobilistes et d'estimer la valeur du temps (environ 60 FF/h, écart-type élevé, croissance avec la distance).
Estimation de la valeur marginale du temps de transport	sept-96	F. Gunn - YS Chen Y. Van de Vyvere (HCG)	RTS n°52	Cet article résume une étude sur la valeur du temps aux Pays-Bas commandée par le gouvernement néerlandais. Les préférences déclarées et révélées ont été utilisées conjointement. La valeur du temps a été déterminée pour trois motifs (DT, Affaires, Autres) et pour les différents modes de transport. Les valeurs moyennes par motif obtenues (en FF/h 1988) sont respectivement de l'ordre de 39 FF/h, 60 FF/h, 24 FF/h. De plus, l'étude conclut que la valeur du temps n'est pas directement proportionnelle au revenu.
Commentaires sur la diversité des valeurs du temps en transport de marchandises	févr-01	JC. Métayer (SES)	Note du SES Jan-Fév 2001	Constatant que les valeurs du temps publiées pour le transport de marchandises varient très fortement, l'auteur présente les raisons principales de ces écarts et conclut à une relative cohérence des diverses études et en déduit une approche pragmatique pour le calcul économique et l'enrichissement progressif des connaissances utilisables dans la modélisation du choix modal.
La valeur du temps de transport de fret en France - Estimation à partir d'une enquête sur les préférences déclarées	sept-94	L. Marmorstein - Winter (INRETS)	RTS n°44	Cet article expose l'estimation de la valeur du temps de transport de marchandises routier interurbain en France, obtenue à partir d'enquêtes de préférences déclarées ; elle met notamment en évidence le phénomène d'augmentation de la valeur du temps avec la distance du trajet. Les valeurs proposées apparaissent élevées (médiane : 462 FF/h pour un trajet de 300 km).

Méthodes interactives de simulation - Aspects méthodologiques de la construction du jeu de simulation dans les enquêtes interactives - Comparaison de deux partis méthodologiques	déc-95	B. Faivre d'Arcier	INRETS	Cette étude s'intéresse à une famille d'enquêtes : les méthodes Interactives de Réponses Déclarées (IRD), qui correspondent à un dispositif d'enquête où les contraintes sont imposées, mais où les réponses comportementales sont libres. Le but de cette technique est d'identifier comment des attributs (et leurs niveaux) décrivant l'évolution des conditions environnantes vont ou non provoquer des changements, lesquels et pourquoi.
Manuels de l'utilisateur des logiciels TRIPS, EMMÉ/2, DAVISUM, TRANSCAD, MINUTP, POLYDROM				

Chapitre 7 : affectation TC

Titre	Anne	Auteur	Éditeur Demandeur	Commentaires
La sensibilité de la demande à la tarification dans les transports collectifs urbains	janv-01	S. Dubos	ENPC	Tentative d'estimation de l'influence de la tarification sur la fréquentation des TC urbains, cette étude fournit notamment des élasticités au tarif, qui apparaissent variables (croissantes) avec le temps.
Irrégularité des lignes d'autobus à fréquence et perception des voyageurs	juin-00	Département Bus	RATP	Cette note résume une étude menée par MVA sur la base d'une enquête de préférences déclarées, qui a permis d'identifier les variables influant sur la perception par le voyageur de son temps de déplacement (attente, temps de parcours, variabilité de ces paramètres, confort). On peut en déduire des coefficients de pénibilité et des bonus.
Manuels de l'utilisateur des logiciels TRIPS, EMME/2, DAVISUM, TRANSCAD, MINUTP				

Pour mémoire : quelques documents hors champ direct du manuel

Titre	Anne	Auteur	Éditeur Demandeur	Commentaires
Représentation cartographique. Guide méthodologique	2001		CERTU	Pour les aspects importants de présentation et communication des résultats
Évaluation de l'impact sur la qualité de l'air de scénarios de déplacements urbains (Peu, DVA, mesures d'urgences) : Étude pilote de St Etienne	2002		ADEME - CERTU	Trafic et pollution de l'air
Simulation dynamique du trafic routier	2000		CERTU	Manuel présentant les différents modèles dynamiques existants

Table des matières

Sommaire	3
Introduction	5
Chapitre 1. La modélisation : pour quoi et comment faire ?	7
1. L'utilité et l'usage de la modélisation des déplacements	8
1.1 Pourquoi des analyses de déplacements ?	8
1.2 Pourquoi des modèles ?	8
1.3 Des précautions à prendre	9
1.4 La distinction entre modèle et logiciel	9
1.5 Un outil d'aide à la décision	10
2. Principes généraux des modèles	10
2.1 Les phases d'une étude de déplacements	10
2.1.1 Résumé de la démarche	10
2.1.2 Phase de reconstitution des matrices en situation de référence	10
2.1.3 Calage et validation	11
2.1.4 Phase de prévision	12
2.2 Architecture générale	15
2.2.1 Remarque préliminaire	15
2.2.2 Les quatre étapes classiques	15
2.2.3 Boucles de rétroaction	15
2.3 Précisions sur les domaines d'application : quelques points particuliers	16
2.3.1 Les déplacements externes	16
2.3.2 Les modes que l'on peut prendre en compte	16
2.3.3 Le péri-urbain	17
2.3.4 Modélisation et évaluation socio-économique	17
2.3.5 Modélisation des impacts environnementaux	17

3.	Les familles d'outils actuels	19
3.1	De la difficulté de classer les modèles	19
3.2	Les modèles statiques	19
3.2.1	Définition	19
3.2.2	Modèles « classiques »	19
3.2.3	Modèles « de niveau stratégique »	20
3.2.4	Les modèles urbanisme/transport	20
3.2.5	Les modèles désagrégés de choix discret	20
3.2.6	Tableau de synthèse	21
3.3	Les modèles dynamiques	21
3.4	Autres modèles	22
3.4.1	Les modèles démographiques	22
3.4.2	La modélisation des marchandises	23
4.	Comment estimer la précision des résultats : l'analyse de risque et l'analyse d'incertitude	24
4.1	Définitions	24
4.2	Les différentes approches possibles	24
4.2.1	Tests de sensibilité	24
4.2.2	Élaboration de scénarios a priori	26
4.2.3	Analyse de risque probabiliste	26
4.2.4	Récapitulation des différentes méthodes	28
5.	Pour en savoir plus	28
 Chapitre 2. Zonage et réseaux		29
Partie A. Modélisation de l'aire d'étude : le zonage		31
1.	Délimiter le territoire à étudier	31
1.1	Bien identifier la problématique et s'adapter aux problèmes posés	31
1.2	Prendre en compte, dès le départ, les différentes contraintes	32
1.3	En déduire le zonage " externe "	32

2.	Les bases de données existantes	33
2.1	Les sources possibles	33
2.2	Les modèles existants	33
2.3	Les SIG	33
2.4	Enquêtes déplacement	33
3.	L'élaboration du zonage	34
3.1	La mise en oeuvre	34
3.2	La démarche à suivre	34
3.3	L'évolutivité du zonage	35
	Partie B. Modélisation des réseaux	36
1.	Détermination des réseaux à modéliser	36
1.1	Modes et réseaux	36
1.2	Être cohérent avec la problématique et le zonage	36
1.3	Bien identifier les différentes contraintes	36
2.	Les bases de données existantes	37
2.1	Les modèles existants	37
2.2	L'utilisation d'un SIG	37
3.	Saisie et codification des réseaux routiers	38
3.1	La géométrie	38
3.2	Habillage et cartographie	39
3.3	Principes de numérotation	39
3.4	La classification des arcs	39
3.5	Les courbes débit-vitesse (principes)	40
3.6	Les connecteurs (ou arcs fictifs)	44
3.7	Carrefour et échangeurs, mouvements tournants, pénalités	44

3.8	Péage, bonus-malus	45
3.9	Collecte des données	46
3.9.1	Reconnaissance du réseau	46
3.9.2	Comptages	47
3.9.3	Mesures de temps de parcours	48
3.9.4	Obtention des courbes débit-vitesse	48
3.10	Contrôle du réseau	50
4.	Saisie et codification des réseaux TC	51
4.1	Remarque préliminaire	51
4.2	Description générale d'une ligne	51
4.3	Temps de parcours	52
4.4	Collecte des données	55
5.	Pour en savoir plus	56
 Chapitre 3. Estimation de la demande en situation de référence		57
1.	Les bases de données	58
1.1	Données socio-économiques	58
1.2	Modèles existants	59
1.3	Les enquêtes	59
2.	Partitions de la demande	64
2.1	Quels modes ?	64
2.2	Quelle(s) période(s) ?	64
2.2.1	Les critères de choix	65
2.2.2	Période modélisée et exploitation des bases de données.	67
2.3	Quels motifs ?	67
2.4	Quelle sensibilité à l'offre de transport ?	69

2.5	Le cas des poids lourds	70
2.6	Autres segmentations	71
3.	Génération (émission/attraction)	72
3.1	Principes généraux de calcul des émissions et attractions	74
3.2	Précautions préalables à la mise en œuvre des méthodes	74
3.3	Typologie des déplacements et mise en œuvre pratique de la méthode	75
3.4	Le modèle par régression	76
3.5	Le modèle normatif	78
3.6	Le modèle catégoriel	81
3.7	Les autres modèles	83
3.8	Les générateurs particuliers	84
3.9	Les déplacements internes des non-résidents	85
3.10	Le calcul de la demande externe	85
3.11	Cohérence d'ensemble	86
4.	Distribution	87
4.1	Modèles gravitaires	87
4.1.1	Principes	87
4.1.2	Procédures de balancement	89
4.1.3	Remarques diverses	89
4.1.4	Les déplacements intrazonaux	92
4.1.5	Les matrices à trous ou technique de matrices lissées	92
4.1.6	Les agglomérations multipolaires	93
4.2	Le cas particulier des trafics d'échange et de transit	93
4.3	Distribution des flux liés aux générateurs spécifiques	94
4.4	Autre modèle : le modèle d'opportunité	95

5. Méthodes combinées génération/distribution	96
5.1 Génération /distribution conjointes	96
5.2 Une méthode simplifiée variante	97
6. Le choix horaire	98
7. Contrôles et validation	99
8. Pour en savoir plus	101
Chapitre 4. Estimation de la demande future	103
1. Les bases de données	103
2. Les paramètres importants	104
3. Les différentes méthodes	105
3.1 Génération/distribution en projection	105
3.2 Méthode par facteur de croissance	106
3.2.1 Application d'un facteur de croissance uniforme	107
3.2.2 Application de facteurs de croissance pour les émissions et les attractions	108
3.2.3 Application de facteurs de croissance directement sur les cases de la matrice	109
3.2.4 Les limites de la méthode par facteur de croissance	109
3.3 Méthode mixte	110
3.4 Stabilité des coefficients dans le temps	111
3.4.1 Quelques points particuliers	112
4. La prise en compte de l'induction	113
5. Les reports horaires	115
6. Récapitulation	115
7. Contrôles et validations	116
8. Pour en savoir plus	117

Chapitre 5. Choix modal	119
1. Les bases de données	119
1.1 Détermination des parts de marché	119
1.2 Définition des caractéristiques de l'offre et de la tarification	122
1.3 Données socio-économiques	123
2. Partitions de la demande	124
2.1 Les différentes segmentations	124
2.2 Définition des modes pris en compte	124
3. Les familles de modèles existantes	125
3.1 Modèles agrégés / modèles désagrégés	125
3.2 Modèles logit	126
3.2.1 Principes	126
3.2.2 Forme générale	127
3.2.3 Expression des fonctions d'utilité	128
3.2.4 Mise en œuvre pratique	129
3.3 Courbes de partage modal	131
3.4 Grilles de partage modal	132
3.5 Modèles prix - temps	135
3.5.1 Principes	135
3.5.2 Mise en œuvre pratique, calage	136
3.6 Autres modèles	137
3.6.1 Modèle de choix discret à coefficient variable (ou d'utilité aléatoire à coefficient distribué)	137
3.6.2 Modèle PROBIT multinomial	137
3.6.3 Modèle DOGIT	137
3.6.4 Modèle conjoint distribution / choix modal	138
3.7 Contraintes techniques et financières / critères de choix	138
3.8 Récapitulation des différents modèles	139
3.9 L'utilisation des modèles en projection	140

4.	Traitement des problèmes particuliers	141
4.1	L'introduction d'un mode radicalement nouveau	141
4.2	Les captifs	142
4.2.1	Les captifs TC	142
4.2.2	Les captifs VP	142
4.3	Le stationnement	143
4.4	Les déplacements intermodaux et les pôles d'échanges	143
4.5	Les chaînes de déplacement	144
4.6	Les modes doux (vélo, marche, roller)	145
4.7	Le covoiturage	145
4.8	Les trajets terminaux VP/TC	146
5.	Contrôles et validation	146
5.1	Contrôles	146
5.2	Validation	146
6.	Pour en savoir plus	147
Chapitre 6.	Affectations VP	149
1.	Les familles de modèles existantes	149
1.1	Les modèles sans contrainte de capacité (ou « à temps fixé »)	149
1.1.1	L'affectation selon le plus court chemin	149
1.1.2	L'affectation stochastique simple	150
1.2	Les modèles à contrainte de capacité (prenant en compte la congestion)	151
1.2.1	L'affectation par tranches	151
1.2.2	L'affectation à l'équilibre	151
1.2.3	L'affectation stochastique	152
1.3	Prise en compte de problèmes spécifiques	153
1.3.1	Le passage à l'UVP	153

1.3.2	Le traitement des péages	153
1.3.3	Les modèles de choix horaire	154
1.3.4	Affectation sur les connecteurs	154
1.4	Contraintes techniques et financières	154
1.5	Récapitulatif des différentes méthodes d'affectation statique pour les VP	155
2.	Le paramétrage des modèles	156
2.1	Les différents éléments du coût généralisé et leur mode de détermination	156
2.2	La valeur du temps	157
2.2.1	Le couple valeur du temps, bonus	157
2.2.2	L'analyse du rapport Boiteux	157
2.2.3	L'expérience récente des ouvrages urbains à péage	159
2.2.4	La valeur du temps des poids lourds	160
3.	Le calage	160
3.1	Les différents types de calage	160
3.2	Le calage en temps de parcours	160
3.3	Le calage en débit	161
3.4	Le calage en flux origine-destination	163
4.	Le traitement des problèmes particuliers	163
4.1	La congestion	163
4.2	Le traitement des poids lourds	163
4.3	Le préchargement du trafic local	164
4.4	Les interactions VP/TC	164
4.5	L'analyse de carrefours	164
4.6	L'utilisation des modèles de simulation dynamique (ou de gestion de trafic)	165
5.	Pour en savoir plus	165

Chapitre 7. Affectations TC	168
1. Les familles de modèles existantes	168
1.1 Affectation et recherche des meilleurs itinéraires	168
1.2 Procédures de recherche des meilleurs itinéraires	169
1.3 Procédures d'affectation	173
1.4 Interactions avec les modèles VP	176
1.5 Contraintes techniques et financières	177
2. Le paramétrage des modèles	178
2.1 Temps de parcours	178
2.2 Tarification	178
2.3 Élaboration de la fonction d'impédance	180
3. Le calage des modèles	184
3.1 Les différents types de calage	184
3.2 Extension de la modélisation à d'autres périodes	186
4. Les prévisions	186
Conclusion	188
Annexes	189
Annexe 1. Données source : présentation simplifiée de quelques types d'enquêtes	189
Annexe 2. Données sur l'emploi	191
Annexe 3. données des enquêtes ménages déplacements	193
Annexe 4. Mise en place d'un nouveau TCSP, clientèle et usage	201
Annexe 5. Valeur du temps	203

Annexe 6. Anciennes courbes débit-vitesse DAVIS	206
Annexe 7. Taux de correspondances (enquête TCU) – année 2000	207
Annexe 8. Liste des organismes contactés pour commenter la version provisoire de l'ouvrage	209
Annexe 9. Glossaire	210
Annexe 10. Abréviations	213
Annexe 11. Bibliographie détaillée	214
Table des matières	229
Table des figures	240
Récapitulatif des tableaux	241

Table des figures

Figure 1.	Courbe de distribution des recettes.	27
Figure 2.	Données débit-vitesse sur une VRU à Nantes	40
Figure 3.	Évolution de la courbe débit-vitesse en fonction du type de saturation ..	42
Figure 4.	Données et courbes débit-vitesse en Île-de-France.	43
Figure 5.	horaire de passage d'une ligne de bus à Marseille.....	53
Figure 6.	Détermination du temps d'attente en fonction des fréquences de desserte (en min.)	54
Figure 7.	Évolution de la mobilité totale par personne dans les agglomérations de plus de 300 000 hab.....	62
Figure 8.	Évolution de la mobilité motorisée par personne dans les agglomérations de plus de 300 000 hab.....	62
Figure 9.	Rétroaction entre la distribution et l'affectation.	90
Figure 10.	Exemple d'indicateur de croissance pour la Réunion (séries sur la période 1981-1995)	108
Figure 11.	Part de marché VP (% des déplacements), agglomérations de plus de 300 000 habitants	120
Figure 12.	Part de marché TC (% des déplacements), agglomérations de plus de 300 000 habitants	120
Figure 13.	Part de marché des modes doux (vélo+marche) en % des déplacements, agglomérations de plus de 300 000 habitants	121
Figure 14.	Part de marché autres modes (dont 2R motorisés), en % des déplacements, agglomération de plus de 300 000 habitants	121
Figure 15.	Exemple de courbes de partage modal (Source : DREIF).....	131
Figure 16.	Limite de l'approche logit simple pour des affectation sur itinéraire proches.	150

Récapitulatif des tableaux

Tableau 1	Récapitulation des différentes méthodes de reconstitution des matrices en projection.....	14
Tableau 2	Familles de modèles.....	21
Tableau 3	Études de sensibilité sur l'étude de la ligne bleue de Bangkok.....	25
Tableau 4	Exemple d'analyse probabiliste du risque.....	27
Tableau 5	Récapitulation des différentes méthodes d'analyse de sensibilité.....	28
Tableau 6	Différentes formules de courbes débit-vitesse.....	42
Tableau 7	Calage de courbes débit-vitesse en Île-de-France.....	43
Tableau 8	Classification des voies utilisée par défaut par SETEC pour la formulation DAVIS.....	50
Tableau 9	Vitesses commerciales caractéristiques des différents modes TC (km/h).....	53
Tableau 10	Exemple de précision sur les données issues d'enquêtes ménages pour une taille d'échantillon de 2000 ménages.....	60
Tableau 11	Taux de motorisation et mobilité par personne selon les enquêtes ménages françaises depuis 1976.....	61
Tableau 12	Répartition des boucles simples et multiples par motif à Lyon et Grenoble.....	69
Tableau 13	Distance moyenne entre deux arrêts selon les couronnes.....	71
Tableau 14	Récapitulation des différentes méthodes de génération.....	73
Tableau 15	Principales variables possibles utilisables dans les modèles de génération, par motif.....	76
Tableau 16	Valeurs représentatives des mobilités par motif dans les agglomérations françaises.....	80
Tableau 17	Exemples de formules de génération utilisées dans le logiciel OPERA.....	80
Tableau 18	Exemples de données de mobilité (boucles/individu), par catégories d'individu et par motif.....	82
Tableau 19	Exemples de données de comptage autour de générateurs de trafic.....	84
Tableau 20	Exemple de calage de fonctions d'impédance par motif pour la distribution.....	89
Tableau 21	Répartition des passages PPM/PM/PPS par motif dans les agglomérations françaises en pourcentage.....	99
Tableau 22	Trafic induit lors de la mise en place du métro de Lille.....	114
Tableau 23	Trafic induit après la mise en place des trams en Île-de-France.....	114
Tableau 24	Trafic induit après la mise en place des métros à Lyon et Marseille...	115
Tableau 25	Récapitulation des différentes méthodes de reconstitution des matrices en projection.....	116
Tableau 26	Récapitulation des différentes méthodes pour prendre en compte les abonnements.....	123
Tableau 27	Exemple de variables utilisé dans les fonctions d'utilité d'un modèle logit.....	128
Tableau 28	Procédure de choix des variables explicatives dans un modèle désagrégé.....	130
Tableau 29	Valeurs représentatives des mobilités par mode dans les agglomérations françaises.....	133

Tableau 30	Valeurs représentatives des parts de marché par mode dans les agglomérations françaises.....	133
Tableau 31	Exemple de grille de partage modal.....	134
Tableau 32	Récapitulation des différents modèles de choix modal.....	140
Tableau 33	Valeurs représentatives du taux d'occupation des véhicules.....	146
Tableau 34	Récapitulatif des différentes méthodes d'affectation statique pour les VP.....	155
Tableau 35	Valeurs du temps par motif pour l'évaluation socio-économique.....	159
Tableau 36	Valeurs du temps pour VL et VP.....	164
Tableau 37	Récapitulation des différentes méthodes d'affectation TC.....	174
Tableau 38	Valeurs représentatives des taux de correspondance.....	184
Tableau 39	Comparaison prévision/observation sur la ligne D à Lyon.....	186
Tableau 40	Comparaison prévision/observation de différents transports en commun en site propre.....	186
Tableau 41	mobilités par motif dans les agglomérations françaises.....	194
Tableau 42	répartition des passages PPM/PM/PPS par motif dans les agglomérations françaises.....	196
Tableau 43	mobilités par mode dans les agglomérations françaises.....	198
Tableau 44	motorisation dans les agglomérations françaises.....	200
Tableau 45	Ligne 1 du métro de Lille. Enquête avant/après - Ouverture : mai 1983 - Enquête : Octobre 1984.....	201
Tableau 46	Ligne 2 du métro de Lille - Enquête avant/après Ouverture : avril 1989 - Enquête : Janvier 1990.....	201
Tableau 47	Lignes Île-de-France – clientèle avant/après.....	202

© CERTU – 2003

Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, du Tourisme et de la Mer
Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques

Toute reproduction intégrale ou partielle, faite sans le consentement du CERTU est illicite (loi du 11 mars 1957). Cette reproduction par quelque procédé que ce soit, constituerait une contrefaçon sanctionnée par les articles 425 et suivants du Code pénal.

Coordination : Pôle programme et produits

Reprographie : Cete de Lyon

Achévé d'imprimer : Avril 2003

Dépôt légal : 2^e trimestre 2003

ISSN : 1263-3313

ISBN : 2-11-093140-X

Cet ouvrage est en vente au CERTU

Bureau de vente:

9, rue Juliette Récamier

69456 LYON cedex 06 - France

04 72 74 59 59

www.certu.fr