

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Strassen

Département fédéral de l'environnement, des transports, de l'énergie et de la communication / Office fédéral des routes

Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni / Ufficio federale delle strade

# **Evolution et impact des systèmes de navigation dynamique multimodale en Suisse**

**Entwicklung und Auswirkung von multimodalen dynamischen Navigationssystemen in der Schweiz**

**Development and impact of multimodal dynamic navigation systems in Switzerland**

**École Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)**

**Laboratoire des voies de circulation (LAVOC)**

A.-G. Dumont, Professeur

A. Torday, ing. dipl. EPF

D. Baumann, ing. dipl. EPF

Mandat de recherche 2001/016 sur proposition de l'Office fédéral des routes (OFROU)

Octobre 2005



## Table des matières

<b>GLOSSAIRE</b> .....	<b>IV</b>
<b>RESUME</b> .....	<b>VII</b>
<b>ZUSAMMENFASSUNG</b> .....	<b>VII</b>
<b>SUMMARY</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1 PREAMBULE</b> .....	<b>1</b>
<b>2 INTRODUCTION</b> .....	<b>2</b>
2.1 Contexte .....	2
2.2 Objectifs.....	3
2.2.1 <i>Etablir un concept général de système de navigation multimodal</i> .....	3
2.2.2 <i>Développer des méthodes et modèles permettant le calcul dynamique d'itinéraire multimodal</i> .....	3
2.2.3 <i>Mettre en évidence les besoins en données (statiques ou dynamiques)</i> .....	4
2.2.4 <i>Etudier la faisabilité d'un tel système en Suisse</i> .....	4
2.2.5 <i>Réaliser une série de recommandations pour en faciliter le développement futur...</i>	4
2.2.6 <i>Evaluer les bénéfices pouvant être attendus de son utilisation</i> .....	4
2.3 Démarche .....	5
2.4 Limites de l'étude.....	6
<b>3 ETAT DE LA RECHERCHE</b> .....	<b>7</b>
3.1 Navigation dynamique pour les transports individuels .....	7
3.1.1 <i>Projets basés sur une application pratique</i> .....	7
3.1.2 <i>Les études basées sur la simulation</i> .....	9
3.2 Navigation dynamique pour les transports publics et multimodaux.....	12
3.2.1 <i>Projets en Suisse</i> .....	12
3.2.2 <i>Projets en Europe</i> .....	14
3.2.3 <i>Projets outre-mer</i> .....	16
3.2.4 <i>Littérature</i> .....	22
<b>4 LES TRANSPORTS EN SUISSE</b> .....	<b>23</b>
4.1 Transports individuels.....	23
4.1.1 <i>Généralités</i> .....	23
4.2 Transports publics .....	23
4.2.1 <i>Généralités</i> .....	23
4.2.2 <i>Entreprises</i> .....	24
4.2.3 <i>Hiérarchie</i> .....	27
4.3 Nouveaux modes.....	27
4.3.1 <i>Partage de voitures</i> .....	27
4.3.2 <i>Covoiturage</i> .....	28
4.4 Modélisation des réseaux.....	28
4.4.1 <i>Réseaux de transports individuels</i> .....	28
4.4.2 <i>Réseaux de transports publics</i> .....	28

4.4.3	<i>Réseaux multimodaux</i> .....	28
<b>5</b>	<b>SYSTEME DE NAVIGATION DYNAMIQUE MULTIMODALE</b> .....	<b>30</b>
5.1	Concept général .....	30
5.1.1	<i>Informations avant le voyage (Pre-trip)</i> .....	31
5.1.2	<i>Informations pendant le voyage (On-trip)</i> .....	31
5.1.3	<i>Feed-back après le voyage (Post-trip)</i> .....	32
5.2	Représentation du réseau .....	32
5.3	Fonction d'utilité.....	33
5.3.1	<i>Les différents choix du voyageur</i> .....	33
5.3.2	<i>Paramètres de la fonction d'utilité</i> .....	34
5.3.3	<i>Personnalisation de la fonction d'utilité</i> .....	35
5.4	Calcul d'itinéraire .....	36
5.4.1	<i>Introduction</i> .....	36
5.4.2	<i>Problèmes spécifiques du calcul d'un trajet aller-retour</i> .....	38
5.4.3	<i>Proposition d'une approche pour le calcul d'un trajet aller-retour multimodal</i> .....	39
5.5	Définition des besoins .....	42
<b>6</b>	<b>DONNEES ACTUELLEMENT DISPONIBLES EN SUISSE</b> .....	<b>44</b>
6.1	Transports individuels.....	44
6.1.1	<i>Les services d'informations aux automobilistes</i> .....	44
6.1.2	<i>Disponibilité des données</i> .....	45
6.1.3	<i>Besoins</i> .....	47
6.2	Transports publics .....	48
6.2.1	<i>Questionnaire</i> .....	48
6.2.2	<i>Disponibilité de données</i> .....	51
6.2.3	<i>Besoins</i> .....	52
<b>7</b>	<b>METHODE PROPOSEE POUR L'ACQUISITION DES DONNEES MANQUANTES</b> .....	<b>53</b>
7.1	Transports individuels.....	53
7.1.1	<i>Définition et concept du temps de parcours</i> .....	53
7.1.2	<i>Acquisition indirecte</i> .....	57
7.1.3	<i>Acquisition directe par FCD</i> .....	64
7.1.4	<i>Autres techniques d'acquisition directe</i> .....	103
7.2	Transports publics .....	104
7.2.1	<i>Positionnement des véhicules et temps de parcours</i> .....	104
7.2.2	<i>Détection du type de véhicule</i> .....	106
7.2.3	<i>Mesure du taux d'occupation</i> .....	107
7.2.4	<i>Traitement et distribution des données</i> .....	109
<b>8</b>	<b>EVALUATION DES PERFORMANCES DU SYSTEME DE NAVIGATION DYNAMIQUE MULTIMODAL ...</b>	<b>110</b>
8.1	La microsimulation comme outil d'évaluation .....	110
8.1.1	<i>Pourquoi la microsimulation ?</i> .....	110
8.1.2	<i>Pourquoi AIMSUN ?</i> .....	111
8.1.3	<i>Le modèle de Lausanne</i> .....	112
8.2	Modèle d'affectation du trafic pour les véhicules non guidés .....	114
8.2.1	<i>Remarques introductives</i> .....	114
8.2.2	<i>Etat des connaissances</i> .....	114

8.2.3	<i>Le DTA dans AIMSUN</i> .....	116
8.2.4	<i>Limitations des modèles classiques d'affectation de trafic dynamique</i> .....	117
8.2.5	<i>Approche basée sur l'utilisation d'un profil historique et des catégories d'usagers</i> .....	120
8.2.6	<i>Application dans le cas d'AIMSUN</i> .....	123
8.3	Evaluation des performances de la navigation dynamique purement routière (cas du SNA) .....	126
8.3.1	<i>Structure de la demande et paramètres du SNA</i> .....	126
8.3.2	<i>Indicateurs de performance</i> .....	128
8.3.3	<i>Scénario habituel</i> .....	130
8.3.4	<i>Scénario avec incident</i> .....	137
8.3.5	<i>Synthèse</i> .....	144
8.4	Mise en évidence de l'utilité de la navigation dynamique multimodale.....	145
8.4.1	<i>Cas 1 : EPFL – Centre-ville</i> .....	145
8.4.2	<i>Cas 2 : Lutry – Centre-ville</i> .....	148
8.4.3	<i>Cas 3 : Lausanne-Vennes – Place de la Riponne</i> .....	150
8.5	<i>Synthèse des résultats</i> .....	151
<b>9</b>	<b>CONCLUSIONS</b> .....	<b>153</b>
<b>10</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>155</b>
<b>11</b>	<b>ANNEXES</b> .....	<b>161</b>
11.1	Questionnaire transports publics .....	161
11.2	Construction et calibration des réseaux de simulation .....	168
11.2.1	<i>Le réseau "centre-ville"</i> .....	168
11.2.2	<i>Le réseau "agglomération"</i> .....	171
11.3	Modèle de prédiction des temps de parcours.....	174
11.3.1	<i>Etat des connaissances</i> .....	174
11.3.2	<i>Définition des besoins</i> .....	175
11.3.3	<i>Choix de la méthode</i> .....	175
11.3.4	<i>Brève introduction sur les réseaux de neurones</i> .....	176
11.3.5	<i>Apprentissage et validation des réseaux de neurones</i> .....	178
11.3.6	<i>Synthèse et choix</i> .....	183

## Glossaire

ACS	Automobile Club de Suisse
AILE	Average Individual Link travel time Error (= Erreur individuelle moyenne de temps de parcours d'un arc)
AIMSUN	Logiciel de simulation microscopique de flux de trafic
AIPE	Average Individual Path travel time Error (= Erreur individuelle moyenne de temps de parcours d'un itinéraire)
ALT	Average Link travel Time (= Temps de parcours moyen d'un arc)
AP	Aggregation Period (= Période d'agrégation)
API	Application Programming Interface
APT	Average Path travel Time (= Temps de parcours moyen d'un itinéraire)
ATE	Association Transport et Environnement
ATIS	Advanced Traveller Information System (= Système d'information du voyageur)
ATMS	Advanced Transportation Management System (= Système pour la gestion des transports)
AVI	Automatic Vehicle Identification (= Identification Automatique d'un véhicule)
BPT	Built Path travel Time (= Temps de parcours reconstitué d'un itinéraire)
CERTU	Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques
CF	Cost Function (= Fonction de coût)
CFF SA	Chemins de Fer Fédéraux SA
CN	
CN+H	Substitution du temps de parcours par la méthode du profil historique couplée à la méthode combinée
CN+NNH	Substitution du temps de parcours par la méthode des réseaux de neurones utilisant les valeurs historiques couplée à la méthode combinée
DATEX	Standard pour l'échange d'informations de trafic
DOT	Department Of Transport (Administration routière aux Etats-Unis)
DRG	Dynamic Route Guidance (= Navigation dynamique)
DTA	Dynamic Traffic Assignment
EBPT	Estimated Built Path travel Time (= Temps de parcours reconstitué estimé d'un itinéraire)
EHLT	Estimated Historical Link travel Time (= Profil historique estimé des temps de parcours d'un arc)
ELT	Estimated Link travel Time (= Temps de parcours estimé d'un arc)
ER	Equipment Ratio (= Taux d'équipement)
FCD	Floating Car Data (= Données de véhicules flottants)
FF	Substitution du temps de parcours par la méthode "Free Flow"
FLT	Free flow Link travel Time (= Temps de parcours statique d'un arc)
FOT	Field Operation Test
GPRS	General Packet Radio Service (Système d'échange de données à travers un réseau GSM)

GPS	Global Positioning System (= Système global de positionnement)
GSM	Global System for Mobile communications (Standard global pour la téléphonie mobile)
H	Substitution du temps de parcours par la valeur historique
HC	Historical link Costs (= Coûts historiques d'un arc)
HLT	Historical Link travel Time (= Temps de parcours historique d'un arc)
ITS	Intelligent Transportation Systems (= Systèmes de transport intelligents)
LITRA	Service d'information des transports publics
LT	Link travel Time (= Temps de parcours d'arc d'un véhicule)
MSE	Mean Square Error (= Erreur des moindres carrés)
MSLE	Mean Square Link travel time Error (= Erreur des moindres carrés de temps de parcours d'un arc)
MSPE	Mean Square Path travel time Error (= Erreur des moindres carrés de temps de parcours d'un itinéraire)
MTS	Module de Traitement et Statistiques
NN	Substitution du temps de parcours par la méthode des réseaux de neurones
NNH	Substitution du temps de parcours par la méthode des réseaux de neurones utilisant les valeurs historiques
OBU	On-Board Unit
OD	Origine – Destination
OFROU	Office Fédéral des ROUtes
OFT	Office Fédéral des Transports
PDA	Personal Digital Assistant (= Assistant personnel numérique)
PLT	Predicted Link travel Time (= Préviation de temps de parcours d'un arc)
PMV	Panneau à Message Variable
PNR	Programme National de Recherche
PT	Path travel Time (= Temps de parcours d'itinéraire d'un véhicule)
PTA	Personal Traveller Assistant
RC	Route Choice (= Choix d'itinéraire)
RDS	Radio Data System (Standard pour l'envoi de messages par onde radio)
SMS	Short Message Service (Standard pour l'envoi de messages courtes par téléphone mobile)
SNA	Système de Navigation Auto-alimenté
SNDM	Système de Navigation Dynamique Multimodale
SPA	Shortest Path Algorithm (= Algorithme de calcul de l'itinéraire le plus court)
STA	Static Traffic Assignment
TCS	Touring Club Suisse
TDSPA	Time Dependant Shortest Path Algorithm (= Algorithme de calcul de l'itinéraire le plus court en fonction du temps)
TMC	Traffic Message Channel (Codage RDS spécifique aux informations de trafic)
UTP	Union des Transports Publics

VICS      Vehicle Information and Communication Service (= Système d'information routière japonais)  
VISSIM    Logiciel de simulation microscopique de flux de trafic

## Résumé

Face à l'évolution rapide de la mobilité des solutions innovantes pour l'information du voyageur sont souhaitables pour mieux gérer les déplacements des personnes. La télématique peut apporter des réponses encourageantes à cette problématique.

Le présent travail de recherche établit le concept d'un système de navigation dynamique multimodale (SNDM) et s'efforce d'en démontrer les fonctionnalités. Il propose également des solutions pour acquérir les données nécessaires.

Après une introduction et la description de la démarche sont décrits l'état de la recherche dans les domaines concernés et les différents systèmes de transport en Suisse. Ensuite, le concept proprement dit et une liste de données nécessaires sont proposés. Un chapitre met en évidence les données qui sont actuellement disponibles en Suisse et les lacunes par rapport aux besoins décrits précédemment. Une proposition est faite de méthodes d'acquisition pour se procurer des données manquantes. Finalement les performances théoriques du SNDM sont testées sur plusieurs exemples d'itinéraires de la région lausannoise en recourant à la microsimulation.

Les recommandations portent principalement sur l'acquisition et le traitement de données routières, qui sont actuellement lacunaires. L'échange de données entre les différents acteurs laisse pour l'instant à désirer. La mise en place d'un SNDM n'est guère possible à court terme, mais nécessite le passage par plusieurs étapes pour enfin disposer d'une base de données performante.

## Zusammenfassung

Angesichts der schnellen Entwicklung der Mobilität der innovativen Lösungen für die Information des Reisenden sind wünschenswert, um die Reisen der Personen besser zu verwalten. Die Telematik kann ermutigende Antworten auf diese Problematik bringen.

Diese Forschungsarbeit stellt das Konzept eines Systems multimodaler dynamischer Navigation (SNDM) auf und bemüht sich, davon die Funktionalität zu beweisen. Er schlägt ebenfalls Lösungen vor, um die notwendigen Daten zu erwerben.

Nach einer Einführung und die Beschreibung des Vorgehens werden den Stand der Forschung in den betreffenden Bereichen und den verschiedenen Transportsystemen in der Schweiz beschrieben. Danach werden das eigentliche Konzept und eine Liste notwendiger Angaben vorgeschlagen. Ein Kapitel hebt die Daten hervor, die in der Schweiz derzeit verfügbar sind und die Lücken hinsichtlich der vorher beschriebenen Bedürfnisse. Ein Vorschlag wird von Erwerbmethoden gemacht sich, um fehlende Daten zu verschaffen. Schließlich werden die theoretischen Leistungen des SNDM auf mehreren Streckenbeispielen der lausannoise Region getestet, indem man auf das microsimulation zurückgreift.

Die Empfehlungen beziehen sich hauptsächlich auf den Erwerb und die Verarbeitung von Straßendaten, die momentan lückenhaft sind. Der Datenaustausch zwischen den verschiedenen Beteiligten lässt im Augenblick zu wünschen übrig. Die Einführung eines SNDM ist kaum möglich kurzfristig, aber erfordert den Übergang in mehrere Etappen, um schließlich über eine leistungsstarke Datenbank zu verfügen.

## Summary

According to the fast evolution of the mobility of the solutions innovating for the information of the traveller are desirable for better managing displacements of the people. Telematic can bring encouraging answers to these problems.

This research task establishes the concept of a system of multimode dynamic navigation (SNDM) and endeavours to show the functionalities of them. It also proposes solutions to gather the data necessary.

After an introduction and the description of the step are described the state of research in the fields concerned and the various systems of transport in Switzerland. Then, the concept itself and a list of data necessary are proposed. A chapter highlights the data which are currently available in Switzerland and the gaps compared to the needs described previously. A proposal is made methods of acquisition to get missing data. Finally the theoretical performances of the SNDM are tested on several examples of routes of the area of Lausanne while resorting to the microsimulation.

The recommendations relate mainly to the acquisition and the processing of road data, which are currently lacunar. The data exchange between the various actors leaves something to be desired for the moment. The installation of a SNDM is hardly possible short-term, but requires the passage by several stages for finally having a powerful data base.

# 1 Préambule

La mobilité est au cœur des activités sociales et économiques des êtres humains. Il n'est donc pas étonnant qu'elle soit un sujet de préoccupation permanent autant des autorités d'une région ou d'un pays que de ces habitants. Durant longtemps, les débats se sont portés sur la manière adéquate de **développer la mobilité**. Toutefois, depuis un peu plus d'une décennie, ce développement s'est vu notablement freiné pour des raisons d'ordre économique mais également et surtout par des considérations d'ordre territorial, la place accordée aux infrastructures de transports ne pouvant être illimitée. L'accroissement rapide de ce qu'on appellera une conscience écologique de la population a également joué un rôle important dans ce phénomène et ce en particulier dans le domaine routier.

La demande en mobilité, elle, n'a pas vu sa croissance freinée. Bien au contraire, l'évolution du cadre social et économique dans lequel nous vivons n'a fait qu'accélérer cette croissance entraînant de manière inexorable un manque toujours plus marqué d'adéquation entre l'offre en transport et les exigences de mobilité de la population. D'un point de vue technique, la notion de développement de l'infrastructure s'est alors rapidement transformée en celle de **gestion de l'infrastructure**. Il s'agit donc d'utiliser de manière rationnelle et « intelligente » les infrastructures existantes. Ce dernier adjectif a été choisi pour qualifier les nouvelles applications d'aide à la gestion : **les systèmes de transport intelligents**, plus couramment appelé ITS (Intelligent Transport Systems).

Ces nouveaux outils se basent principalement sur une utilisation appropriée des nouvelles technologies (notamment de communications et informatiques) dont le développement s'est considérablement accéléré cette dernière décennie. Fondamentalement, les systèmes de transports intelligents peuvent être grossièrement séparés en deux catégories. La première regroupe les applications ayant un impact direct et contraignant sur les systèmes de transport. La seconde se compose principalement de services cherchant à gérer indirectement la mobilité par le biais d'une **amélioration de l'information offerte aux usagers**. Cette dernière, rendue plus pertinente, personnalisée et fiable devrait permettre aux utilisateurs de moyens de transport de faire des choix (itinéraire, mode, horaire,...) engendrant des déplacements plus rationnel (temps, coûts,...). Par l'amélioration de la mobilité individuelle, un effet identique est attendu pour l'ensemble de la population en mouvement.

La présente étude s'occupe d'un type particulier de service d'information aux usagers : le système de navigation dynamique multimodal.

## 2 Introduction

### 2.1 Contexte

Aujourd'hui, un certain nombre de services d'information et d'aide à la décision sont à disposition des usagers de moyens de transport. Ils permettent généralement de planifier un déplacement avant de l'entreprendre. Les outils Internet jouent, dans ce domaine, un rôle de plus en plus prépondérant et ce, quel que soit le mode de transport que l'utilisateur désire utiliser.

Dans le domaine routier, sont récemment apparus de nombreux logiciels ou sites Internet permettant de définir l'itinéraire le plus adéquat pour un déplacement donné. Ces applications proposent différentes solutions en fonction des préférences indiquées par l'utilisateur (minimiser le temps de parcours, la distance ou le coût, éviter les cols alpins, etc.). Pour les transports publics, la plupart des compagnies proposent des outils permettant de définir les meilleures correspondances pour relier deux points de leur réseau. Toutefois, il est fréquent qu'un déplacement nécessite les services de plusieurs compagnies. Dans ce cas, il appartient à l'utilisateur de déterminer quand et où il devra réaliser le transfert entre les différents réseaux. Des progrès récents dans ce domaine ont toutefois permis de réunir les données de la plupart des compagnies de transport suisses afin d'offrir un service plus performant aux utilisateurs.

Ces services peuvent également être consultés durant le voyage à condition que l'utilisateur soit équipé d'un support mobile d'accès à Internet tel que le proposent les dernières générations de téléphones mobiles ou de PDA (Personal Digital Assistant). Le système de navigation est, quant à lui et pour l'instant, une application spécifique au transport routier. La totalité du réseau étant en mémoire (sur un support mobile tel que CD ou DVD), aucune connexion externe n'est nécessaire. De par ses capacités de localisation cet outil offre l'avantage de guider son utilisateur le long de l'itinéraire choisi et de le réorienter si ce dernier se trompe de route.

La pratique montre néanmoins que ces outils ne sont généralement utilisés que pour la planification de déplacements non routiniers et pour lesquels l'utilisateur ne dispose pas de suffisamment d'information pour définir par lui-même un itinéraire satisfaisant. Pour ses déplacements quotidiens, l'utilisateur fait appel à sa propre expérience forgée en parcourant à maintes reprises les différents itinéraires possibles reliant son point d'origine à celui de sa destination. Cette expérience, en plus de se baser sur une excellente connaissance du réseau, s'appuie également sur une perception plus ou moins précise de l'évolution des conditions de trafic au fil de la journée.

Il est encore à remarquer que la variabilité temporelle de l'offre en transport n'est pas prise en compte et ceci constitue un défaut majeur de ces systèmes d'information. A l'heure actuelle, les services d'aide à la décision sont encore peu couplés avec les informations dynamiques pour deux raisons principales : Premièrement, les données dynamiques actuellement

disponibles sont en majorité de type événementielles et non quantitatives. Le calcul d'itinéraire se faisant sur les bases de données chiffrées, l'interprétation de ces données est par trop délicate. Deuxièmement, la fiabilité et surtout la quantité de données dynamiques disponibles sont encore beaucoup trop faibles pour justifier le complexe travail de leur intégration dans les services.

Une autre particularité fait défaut aux services actuels : la prise en compte dans une même application des transports individuels et publics. Une telle caractéristique offrirait la possibilité de comparer objectivement les deux modes de transport en fonction du type de déplacement et surtout en fonction de l'heure à laquelle il est effectué. De plus, la possibilité de les combiner lors d'un même déplacement serait une avancée significative dans le domaine de l'information à l'utilisateur. Toutefois, la réalisation d'un calcul d'itinéraire multimodal exige une approche particulière et la prise en compte de nombreuses contraintes qui jusqu'à ce jour n'ont pas pu être modélisées de manière satisfaisante.

Ces systèmes d'information multimodaux seront appelés par la suite systèmes de navigation multimodaux de manière à être plus pragmatique quant à leur utilisation dans le futur. Les assistants électroniques de poche ont atteint actuellement un niveau technologique suffisant pour que l'on puisse considérer que de tels services soient délivrés sur ce genre de support mobile. Ce dernier peut, depuis peu, être couplé avec des outils de localisation tels que GPS (et/ou Galileo dans quelques années) ou GSM, afin de guider l'utilisateur tout au long de l'itinéraire calculé. Nous obtenons ainsi le principe du PTA (Personal Traveller Assistant).

## **2.2 Objectifs**

Par le biais de ce travail de recherche, les auteurs ont voulu de mettre en évidence les problématiques liées au développement d'un système de navigation multimodal, autant d'un point de vue général que pour une application propre à la Suisse.

### **2.2.1 Etablir un concept général de système de navigation multimodal**

Présenter une approche conceptuelle du système de navigation multimodal notamment pour mettre en évidence les exigences auxquelles une telle application doit répondre. Fixer les limites du système à étudier grâce à une description détaillée de ces exigences.

### **2.2.2 Développer des méthodes et modèles permettant le calcul dynamique d'itinéraire multimodal**

Résoudre les nombreux problèmes liés à la multimodalité à l'aide d'une approche méthodologique et technique. Aborder, entre autres, la définition d'un réseau et d'une pondération commune aux différents modes, la modélisation des contraintes aux interfaces entre les modes et la mise en pratique des algorithmes permettant la prise en compte de la variabilité temporelle des conditions de trafic.

### **2.2.3 Mettre en évidence les besoins en données (statiques ou dynamiques)**

Etablir les données statistiques (structure du réseau, horaire, coûts,...) et dynamiques (temps de parcours, retard, perturbation) nécessaire au bon fonctionnement du système de navigation multimodal. Déterminer un ordre d'importance afin de mettre en évidence les données minimales nécessaires pour offrir un service satisfaisant.

### **2.2.4 Etudier la faisabilité d'un tel système en Suisse**

Etablir, en fonction des données actuellement disponibles en Suisse, la faisabilité actuelle d'un système de navigation multimodal. Mise en évidence des manquements fondamentaux.

### **2.2.5 Réaliser une série de recommandations pour en faciliter le développement futur**

Faire des propositions pour améliorer la quantité et la qualité des données existantes, pour utiliser de manière plus adéquate les systèmes existants d'acquisition de données et enfin pour développer de nouveau système d'acquisition de données.

### **2.2.6 Evaluer les bénéfices pouvant être attendus de son utilisation**

Evaluer, à l'aide d'un outil de microsimulation, les bénéfices pouvant être attendus par un utilisateur du système de navigation multimodal. Déterminer l'impact de l'utilisation d'un tel système sur le reste des usagers.

## 2.3 Démarche

La démarche menée pour cette recherche est décrite à la Figure 1.

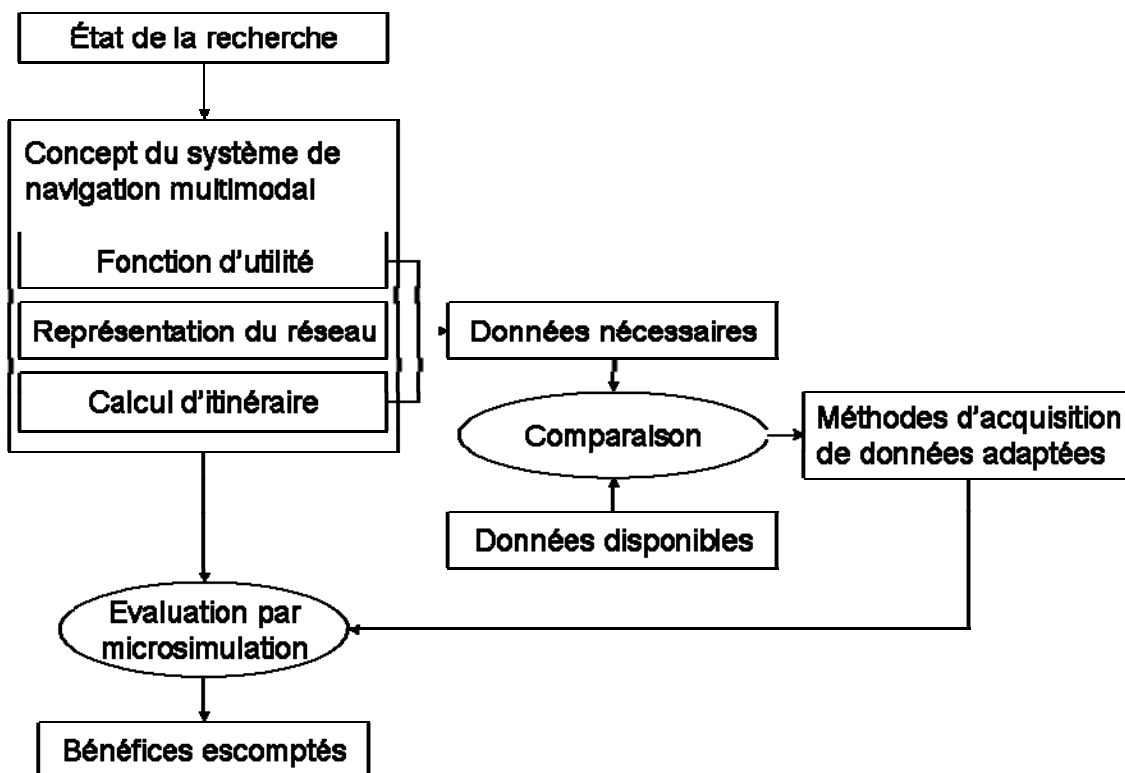


Figure 1 : Démarche générale

Premièrement, un inventaire est établi qui décrit les principales recherches internationales traitant le domaine de la navigation dynamique et multimodal. Une première série d'enseignements, notamment sur les difficultés rencontrées lors d'essais de mise en application, est établie. Sur cette base, un concept général du système de navigation multimodal est établi. Il prend notamment en compte les attentes que les usagers d'un tel système pourraient avoir.

Par la suite, les principaux problèmes liés à une application pratique du concept sont mi en évidence. L'application d'approches fondamentales au cas particulier de la navigation multimodale est réalisée. C'est particulièrement pour la prise en compte de la variabilité temporelle des conditions de trafic. Des solutions techniques et pragmatiques sont proposées pour la représentation commune des réseaux des différents modes de transport et de leurs interfaces. La problématique des parkings est principalement traitée. Enfin, une méthode originale est présentée pour permettre la modélisation des contraintes liées aux changements de mode lors de l'établissement d'un itinéraire aller et retour.

Les données nécessaires pour alimenter le système de navigation multimodal peuvent ainsi être clairement établies. Une revue des données actuellement disponibles en Suisse permet alors de mettre en évidence les manquements dans ce domaine. Une série de proposi-

tions pour améliorer les systèmes d'acquisition actuels ou pour développer de nouvelles techniques est proposée selon un ordre de priorité.

D'autre part, une étude basée sur un modèle de simulation microscopique urbain (dans ce cas le modèle de la ville de Lausanne) permet de chiffrer les gains pouvant être attendus par les utilisateurs de système de navigation multimodal. Pour ce faire le modèle de choix de route des véhicules non guidés doit être perfectionné pour que les résultats ainsi obtenus soient suffisamment pertinents. Il est à noter que, de par la nature même de l'outil utilisé pour cette partie de la recherche, l'évaluation est principalement réalisée au niveau du trafic routier. La prise en compte de l'aspect modal est toutefois réalisée grâce à l'intégration de ligne de bus dans le modèle.

Finalement, une synthèse des différents enseignements est proposée.

La commission d'accompagnement, composée de membres de l'OFROU, de la VSS et de la SVI, s'assurait de la coordination avec le travail de recherche de Ernst Basler + Partner AG sur l'influence des PTA sur le comportement des voyageurs [1] :

Martin Ruesch (Président)	RappTrans AG, Zürich
Christian Egeler	RappTrans AG, Basel
Erwin Gautschi	OFROU, Bern
Claude Marschall	Rosenthaler + Partner AG, MuttENZ
Roger Siegrist	OFROU, Bern

Les deux équipes de recherche se sont échangées régulièrement, afin de pouvoir délimiter les compétences et utiliser certains résultats intermédiaires en cours de la recherche.

## **2.4 Limites de l'étude**

Ce travail de recherche se concentre principalement sur les aspects conceptuels, méthodologiques et, dans une moindre mesure, techniques des systèmes de navigation multimodaux. Les aspects organisationnels, juridiques et économiques, bien qu'abordés partiellement, ne font pas l'objet d'une attention accrue.

Bien qu'une approche globale soit proposée dans la phase initiale, cette recherche se concentre avant tout sur les besoins spécifiques à la Suisse. La problématique de l'intégration du réseau suisse des transports dans un cadre international n'est pas abordée de manière particulière.

## 3 Etat de la recherche

### 3.1 Navigation dynamique pour les transports individuels

#### 3.1.1 Projets basés sur une application pratique

Les premiers projets d'application pratique et d'évaluation des « Advanced Traveller Information Systems » (ATIS) ont vu le jour vers la fin des années 80. La possibilité d'utiliser le système GPS pour des applications civiles et l'apparition des bases de données cartographiques digitales ont été les principaux éléments qui ont permis l'émergence de ce type de projet. De plus, plusieurs travaux avaient déjà démontré à l'époque que les potentiels utilisateurs des ATIS attendaient avant tout de ces outils qu'ils leur fournissent des informations sur les congestions, l'évolution des temps de parcours et les possibilités d'emprunter des itinéraires de déviation. Les systèmes d'acquisition de données de trafic classiques, notamment les boucles inductives, ne permettant que difficilement l'obtention de telles informations, le principe du « Floating Car Data » (FCD) apparaissait alors comme parfaitement adapté à ce type d'applications.

Parmi les nombreux projets d'applications pratiques, certains ont été particulièrement marquants par leur ampleur et la richesse de leurs enseignements :

#### **SOCRATES [2] :**

Entre 1988 et 1994, 5 travaux de recherche basés sur le FCD ont été menés dans le cadre de ce projet européen. En 1989 a eu lieu à Eindhoven le premier test pratique de faisabilité. L'acquisition des données se faisait à bord du véhicule à l'aide d'un ordinateur. Les temps de parcours étaient alors les seules données recherchées et enregistrées. L'idée principale de l'utilisation du FCD dans le projet SOCRATES était de pouvoir obtenir des informations fiables pour informer les usagers sur l'état du trafic. Ce test s'est finalement étendu à quelque 70 voitures (Göteborg, Turin, Frankfurt, London, Paris, Bruxelles, etc.). Ces recherches, qui ont avant tout démontré la faisabilité technique de l'acquisition par FCD, ont regroupé plus de 50 organismes privés et publics.

#### **ADVANCE [3] :**

Ce projet américain de très grande envergure a débuté en 1990. Son objectif était de créer une application concrète, basée principalement sur l'acquisition de données par FCD qui permettent la transmission de données actualisées aux systèmes de navigation embarqués des véhicules. Cette démonstration, qui a eu lieu à Chicago, prévoyait l'équipement de 5000 véhicules. Toutefois, les auteurs du projet ont finalement dû se limiter au nombre de 50. De nombreux travaux de recherche ont été réalisés dans le cadre de ce projet. Parmi les principaux résultats [4-6], la démonstration de la bonne fiabilité des mesures des temps de parcours par FCD a été apportée. Le gain réel perçu par les utilisateurs du système de navigation dynamique s'est avéré très discutable. Dans le cas, par exemple, de congestions récurrentes, peu d'intérêt a été trouvé à son utilisation. Le manque de prise en compte de l'expé-

rience propre de l'utilisateur sur les itinéraires a été également mise en évidence. Toutefois, des gains intéressants ont été relevés dans le cas d'événements non habituels comme, par exemple, les accidents.

#### **Ali-Scout / Autoguide / Euro-Scout:**

Le principe de base du système de navigation Ali-Scout [7] propose de transmettre des informations de guidage aux systèmes embarqués des véhicules par l'intermédiaire de bornes infrarouges placées aux points importants du réseau routier. Le centre de trafic régional fournit à chaque borne une liste d'itinéraires optimaux reliant la borne en question à toutes les "zones de destinations" du réseau. Lorsque le véhicule passe devant la borne, il charge l'itinéraire dont il a besoin en fonction de sa destination. Pour diminuer au maximum la quantité de données transmises entre la borne et les véhicules, seule la partie de l'itinéraire allant jusqu'à la prochaine borne est transmise. Le calcul des itinéraires optimaux est réalisé principalement sur la base des temps de parcours enregistrés et transmis aux bornes par les véhicules. La première application pratique de ce principe, appelée Autoguide [8], a été réalisée sur la route qui relie le centre de Londres à l'aéroport de Heathrow. Le succès de cette opération a poussé le gouvernement britannique à préparer une base légale pour le développement commercial du système Autoguide. Il était alors prévu d'équiper le centre de Londres avec plus de mille bornes. Un projet similaire a également été mené à Berlin sous le nom d'Euro-Scout [9], où près de 700 véhicules étaient équipés (250 bornes). Dans ces travaux, Bonsall [10] s'est basé sur l'expérience de Berlin pour démontrer également que l'utilité du système était perçue comme importante uniquement pour les déplacements non habituels même si 20% des usagers avouaient avoir changé leur itinéraire quotidien depuis que leur véhicule était équipé du système. Toutefois, les auteurs du projet avouaient fournir aux usagers des informations dynamiques trop pauvres pour permettre de juger réellement de l'efficacité d'un tel système à grande échelle. Les applications basées sur la transmission par bornes infrarouges ont finalement été abandonnées car elles demandaient un investissement beaucoup trop important en infrastructure et en maintenance.

#### **VERDI [11] :**

Sur la base des enseignements tirés du projet **SOCRATES**, la société Mannesman a réalisé en 1996 un test avec 850 véhicules équipés. Cette fois, le transfert de données des voitures au centre de gestion se faisait en utilisant le système des SMS, basé sur la transmission GSM. Les résultats de ce test ont montré la grande utilité de l'acquisition par FCD, en particulier pour le réseau secondaire qui est généralement peu fourni en matériel d'acquisition classique. Les données trafic n'étaient toutefois pas transmises aux usagers par l'intermédiaire d'un système de navigation mais plutôt par les moyens traditionnels (radio, téléphone, télétexte, etc.)

#### **TravTek [12] :**

Ce projet a eu lieu entre 1994 et 1996. Il était basé sur une flotte de 100 véhicules mis à la disposition des clients de sociétés de voitures de location autour de la ville d'Orlando en Floride. Ainsi, les utilisateurs des systèmes de navigation étaient principalement des visiteurs sans aucune connaissance du réseau routier. Une partie seulement des systèmes de navigation était alimentée par des informations en temps réel par le centre de gestion du trafic d'Orlando, lui-même utilisant comme source (entre autres) les temps de parcours que lui

envoyaient les véhicules équipés. En interpolant les résultats obtenus sur le terrain, en faisant un certain nombre d'hypothèses et en réalisant une étude de sensibilité par simulation (voir plus bas), les auteurs de cette étude [13] parviennent à une estimation de 11% du gain de temps que pourrait apporter un tel système à son utilisateur. D'ailleurs, ces derniers seraient prêts à investir en moyenne 1000 \$ pour être équipés en permanence du système TravTek.

Certains des projets décrits, à l'image de VERDI, ont abouti à un véritable service commercial actuellement disponible pour les usagers [11]. En effet, dans ce cas particulier, la société privée allemande Mannesmann (rachetée dernièrement par le géant des télécommunications Vodafone), à l'origine du projet, a décidé de poursuivre le développement des services associés à l'acquisition de données par FCD. Ceux-ci sont maintenant commercialisés sous le nom de "Passo" (<http://www.passo.de/>) et sont indépendants de toute influence gouvernementale [14], le millier de véhicules équipés étant en leur possession. Les informations transitent par le réseau GSM de Vodafone. Toutefois, ce système n'est pas de la navigation auto-alimentée mais un système d'informations trafic basé sur des données FCD.

En France, la société Mediamobile (appartenant au groupe France Télécom) a également développé un service similaire: **Visionaute** (<http://www.visionaute.fr/>). Les informations trafic (congestions, accidents, travaux), principalement de la région parisienne, sont envoyées aux utilisateurs par ondes radios en utilisant le système RDS (Radio Data System) [15]. Ces dernières s'affichent, par l'intermédiaire d'un fond de carte, sur les écrans équipant les véhicules. Les principales sources de données proviennent du réseau de senseurs (boucles à induction) de la ville et de l'importante flotte de 2000 véhicules des taxis parisiens. Ceux-ci n'étant pas équipés d'un système de navigation (et donc d'une carte digitale), ils ne peuvent que transmettre régulièrement leur position. Le centre de gestion doit donc se charger de transformer ces informations en temps de parcours. Dans le cas de Visionaute, la société privée n'est pas la seule propriétaire du service, car elle est tributaire des données trafic qui lui sont fournies par l'Etat. Il s'agit ici d'un exemple concret de PPP (Public Private Partnership) [14]. Mais là aussi, le service français ne transmet "que" des informations trafic et ne propose pas de routes optimales par l'intermédiaire d'un système de navigation.

### 3.1.2 Les études basées sur la simulation

La limitation technique et économique du nombre de véhicules équipés dans les FOT et le cadre trop restrictif des études analytiques, notamment dans le domaine de l'acquisition de données par FCD, ont rapidement poussé les chercheurs à utiliser les outils de simulation pour affiner les développements et évaluations d'applications ATIS. Des logiciels de micro-simulation permettant non seulement de simuler le mouvement de chaque véhicule sur le réseau et de faire des choix d'itinéraires cohérents, mais également d'intégrer et de modéliser l'impact des ATIS sur les déplacements des véhicules, ont commencé à voir le jour au début des années 90. Mahmassani et al., développeurs du simulateur DYNASMART, ont clairement démontré [16] le potentiel de ce type d'outil pour évaluer les ATIS.

Toutefois, la pratique a démontré que les résultats des études basées sur la simulation dépendaient en grande partie de la qualité des modèles internes utilisés par le logiciel et également des inputs (notamment les matrices Origine – Destination) qui lui sont fournis par

l'utilisateur. Ces thèmes ont été et sont toujours sujets à d'intenses travaux de recherche pour améliorer sans cesse la validité des résultats obtenus [17-20]. L'auteur se place ici plutôt comme utilisateur de ce type d'outil et non comme développeur. C'est pourquoi l'historique des modèles utilisés pour la micro-simulation ne sera pas décrit dans ce chapitre même s'il y fera référence à plusieurs reprises dans cet ouvrage.

Dans le domaine de l'acquisition des données par FCD, les nouvelles recherches basées sur la simulation ont confirmé en partie les conclusions apportées par les études analytiques, à l'exemple de celle réalisée par Sanwal et Walrand [21] démontrant que le taux de pénétration minimum était de 4% pour un réseau autoroutier. Toutefois, aucune étude connue de l'auteur ne propose de déterminer ce taux minimum dans le cas d'un réseau urbain de type "européen" où le nombre de segments est nettement plus grand et leur taille plus petite. Ainsi, le taux de présence par segment des véhicules équipés pourrait s'avérer nettement plus variable, demandant ainsi un taux de pénétration plus élevé pour obtenir une information de qualité.

L'utilisation des outils de simulation pour l'évaluation des ATIS a permis de confirmer certains résultats obtenus lors des FOT tout en y apportant des éléments de réponse supplémentaires, notamment au niveau du gain de temps potentiel des usagers de tels systèmes. Une description générale de certaines de ces études basées sur simulation est ici réalisée.

Khattak et al. [22] ont réalisé une étude comparative sur l'effet de différents niveaux de qualité des informations fournies aux usagers. En admettant que tous les usagers pouvant recevoir ces informations acceptent les conseils qui leur sont fournis, les auteurs observent alors que la diminution des temps de parcours globaux (de tous les véhicules) diminue avec l'augmentation du nombre de véhicules équipés et ce, pour un régime sur- ou sous-saturé. Toutefois, aucun gain supplémentaire n'est enregistré au-delà d'un taux de 50% de véhicules informés. Cette étude a également démontré que le système de navigation dynamique se révèle être la forme d'ATIS la plus efficace, car il fournit une information parfaitement personnalisée (à l'inverse des panneaux à messages variables, PMV). Une conclusion à laquelle est également parvenu Levinson [23] dans son excellente analyse de performance des différents types d'ATIS envisageables. Une constatation qui coïncide avec les attentes des usagers de ces systèmes, décrits par Lappin [24] dans sa récente synthèse "What ATIS customers want?".

Wunderlich [25] estime à 10 % la réduction globale du retard engendré par des événements ponctuels si une partie des véhicules est équipée d'un système de navigation dynamique. Dans son étude, trois scénarios ont été analysés: une averse de pluie localisée, un chantier et un accident. Les résultats montrent que, pour les véhicules équipés, une réduction de 45 % du retard pouvait être attendue dans le premier scénario, 72 % dans le second et 18 % pour le troisième. Au point de vue global (tous les véhicules), la réduction de la perte de temps a été estimée respectivement à 12, 18 et 6 %.

Sengupta et Hongola [26] ont examiné le potentiel d'un système de re-direction par l'intermédiaire de PMV sur le "I-10 Smart Corridor" californien dans le cas d'une congestion non-récurrente. Plusieurs stratégies différentes ont été évaluées et les résultats montrent que l'option qui consiste à continuer de dévier le trafic durant un certain laps de temps après la

dissipation de la congestion apporte les meilleurs résultats. La réduction globale du retard provoqué par l'incident varie entre 6 et 16 % pour un niveau d'acceptation des messages de 15 %, et entre 11 et 20 % pour un taux d'acceptation de 20 %.

Adler et al., [27] en utilisant un modèle de réseau théorique, ont analysé l'évolution des temps de parcours des véhicules équipés d'un système de navigation dynamique. Pour des conditions de circulation standards, la réduction maximale est atteinte pour un taux d'équipement avoisinant les 10 %. Comme certaines études l'avaient prévu, l'augmentation de ce taux jusqu'à 100 % montre que le gain de temps est alors presque réduit à zéro !

Jayakrishnan et al. [28, 29] ont développé une méthode de calcul de chemins optimaux dans le cadre de grands événements à l'Arrowhead Pond Arena de Anaheim aux Etats-Unis. Un modèle détaillé du réseau routier entourant ce lieu a été réalisé en utilisant le micro-simulateur DYNASMART. Une technique permettant d'inciter les conducteurs à emprunter les itinéraires optimaux en se basant sur des informations délivrées par des PMV a été développée. Une application concrète sur le terrain est en cours pour pouvoir juger concrètement de l'efficacité du système ainsi développé.

Néanmoins, à la connaissance de l'auteur, le travail de d'analyse par simulation le plus complet et pertinent est celui qui a été réalisé dans le cadre du projet TravTek (voir plus haut). Ce travail est décrit en détail par M. Van Aerde dans le rapport "TravTek - Evaluation Modeling Study" [13]. Pour ce projet, tout le réseau périphérique de la ville d'Orlando et une partie du Down Town ont été modélisés. Le simulateur microscopique INTEGRATION, développé par M. Van Aerde et al. a été adapté spécifiquement aux besoins de l'étude. L'acquisition de données par FCD et le calcul des routes optimales ont été modélisés de façon précise et très détaillée. La composante de prédiction de l'évolution du trafic a, par contre, été nettement moins développée. Si les modèles utilisés sont le résultat d'intéressants développements, l'analyse paramétrique qui devait permettre d'optimiser les gains potentiels et de valider le concept TravTek tel que déployé dans la réalité s'est avérée trop limitée. En effet, la puissance de calcul des ordinateurs utilisés à l'époque (1993) ne permettait de réaliser que très peu de "runs". Les auteurs se sont donc vus dans l'obligation de bloquer un important nombre de paramètres sur la base d'hypothèses qu'ils admettent eux-mêmes comme discutables. Une des originalités de cette analyse est la prise en compte des facteurs de pollution et de risque d'accidents dans le processus d'évaluation du système TravTek. De par son approche des problèmes, son utilisation de la simulation et ses critères d'évaluation, ce travail peut être considéré comme le plus proche de celui proposé dans cet ouvrage.

Le point commun de tous ces projets d'évaluation par simulation est qu'ils sont principalement basés sur des réseaux autoroutiers n'intégrant que peu ou pas de composante urbaine. La validité des résultats obtenus ne peut donc pas être appliquée à un réseau urbain complet, en particulier s'il est du type européen. En effet, le nombre d'itinéraires et de paramètres (notamment les feux de signalisation) à prendre en compte dans le calcul de routes optimales y est beaucoup plus complexe. Une analyse complémentaire sur un modèle principalement urbain s'avère donc nécessaire. C'est un des buts de l'étude décrite dans cet ouvrage.

## 3.2 Navigation dynamique pour les transports publics et multimodaux

A l'heure actuelle, il n'existe pas vraiment de système de navigation en tant que tel mais plutôt des services d'informations aux usagers. La présentation de ces informations étant plutôt un problème de forme que de contenu, il s'agira avant tout de répertorier ici quels sont les types de données que fournissent les différents services.

Le besoin d'introduire des informations en temps réel ne se fait pas sentir pour les services sur site propre. Les CFF SA, par exemple, disposent d'un outil informatique qui représente l'emplacement de chaque train dans le réseau et qui permet une prévision pour les minutes à suivre, mais ces informations ne sont pas accessibles au public. Aux gares, les annonces et les panneaux d'information sont entre autre utilisés pour informer les clients d'un éventuel retard.

Concernant les autobus pris dans des congestions en ville, l'intérêt est également moindre, car leur fréquence est assez élevée et ils ne passent finalement peu de temps dans les bouchons.

### 3.2.1 Projets en Suisse

#### 3.2.1.1 *Horaires porte-à-porte*

La plupart des informations sur le projet de l'horaire porte-à-porte ont été recueillies lors d'un entretien avec M. F. Saba, responsable de ce projet au sein des CFF SA.

#### **Cadre général**

Un des projets rares en Suisse qui traite de l'information multimodale est l'horaire porte-à-porte des CFF SA. Son but est de trouver l'itinéraire le plus rapide entre deux adresses en utilisant les transports publics. Le Programme National de Recherche 41 (PNR 41) est à l'origine de ce projet, l'exposition nationale (version 01) avait également favorisé l'idée.

Des horaires porte-à-porte existant déjà au niveau de quelques grandes villes, une étude de faisabilité a évalué l'intérêt et la possibilité d'élaborer un horaire des transports publics pour la Suisse entière [30]. L'écho reçu des entreprises de transport étant très favorable, les CFF SA se sont décidés à poursuivre l'idée de cet horaire. Ils disposaient déjà des informations concernant les horaires de la plus grande partie du réseau des transports publics (indicateur officiel sous forme papier ou sur CD-ROM).

L'horaire porte-à-porte était prêt en 2001, mais avec un nombre limité de villes et quelques problèmes de jeunesse. Depuis le début 2002, le programme est stable et fonctionne très bien. Pour l'instant, une dizaine de régions y participent<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> <http://www.cff.ch>

## **Initialisation**

Pour ce projet, différentes compagnies de transport ont été contactées par la commission pour le trafic d'agglomération de l'UTP, qui a également participé au niveau financier. Au début, très peu d'entreprises étaient d'accord de mettre à disposition leur données, constatant que leur bannière n'apparaissait nulle part sur le site. Ainsi, le manque d'informations se manifestait surtout au niveau des lignes régionales et communales et de la position des arrêts.

Introduire les données dans le programme en question nécessitait une forme définie qui n'était pas la même pour toutes les entreprises de transport en raison de l'utilisation de logiciels différents pour l'établissement des horaires.

Ainsi, les bases cartographiques parviennent des entreprises NavTech (pour le réseau général) et Endoxon (pour les plans de ville). Les adresses parviennent de la Poste suisse (produit : Géoposte). Les cartes de Swisstopo (Office Fédéral de la Topographie) auraient coûté trop cher. L'algorithme de routing est également fourni par une entreprise externe, HaCon (Allemagne), qui s'occupe déjà de la production de l'horaire « normal » (produit Hafas), disponible sur internet et sur CD-ROM.

## **Mise en application**

La première étape fut la « normalisation » des données, afin qu'elles soient introduites dans la base de données principale. Ce travail a été effectué par l'entreprise de transport, si nécessaire en étroite collaboration avec et dans les locaux des CFF SA.

L'étape suivante a été la recherche des nœuds et les possibilités de correspondances entre les différents modes de transport. Ceci s'est fait à la main, en général en collaboration avec un représentant de l'entreprise locale.

La mise à jour des données (modification d'horaires) prend moins de temps si aucun changement au niveau du réseau physique (nouveaux arrêts, modification des lignes, etc.) n'a été effectué, car les données des horaires peuvent alors être introduites de manière automatique dans la base de données existante.

Depuis le printemps 2004, des informations en temps réel sont disponibles à travers cette interface. Les changements de voie sont affichés, ainsi que les retards importants et les correspondances critiques qui en résultent. Une alternative est proposée dans ce dernier cas.

## **Besoins et développements futurs**

Actuellement, d'autres entreprises souhaiteraient être ajoutées dans la base de données, mais les capacités limitées des CFF SA (au niveau des ressources humaines) ralentissent la procédure.

Un service (probablement payant), qui donnerait des indications en cours du trajet n'est pas prévu pour l'instant. Par contre, un service d'alerte par SMS est établi. Ainsi, des personnes

prenant souvent le même train peuvent être informées de retards importants sur leur parcours.

Afin de pouvoir atteindre des destinations qui ne sont pas directement desservies par les transports publics, l'utilisation d'autres services de mobilité est possible, comme le covoiturage (RailLink, Mobility, CarSharing, etc.) ou les taxis, par exemple. Il serait souhaitable de donner ces informations supplémentaires sur le site de l'horaire porte-à-porte, avec la possibilité de réservation de ces services.

### **3.2.2 Projets en Europe**

#### **3.2.2.1 *INFOTEN***

Le projet INFOTEN (janvier 1996 – mars 1999) [31] a introduit des systèmes d'échange d'informations de trafic, d'informations multimodales pour les voyageurs et d'alertes dans la région des Alpes et d'Europe centrale. Ces systèmes sont multi langues et couvrent une région considérable.

Le projet a permis de développer une architecture physique, ainsi qu'un protocole de transmission de données (DATEX). Pour la partie multimodale, un concept théorique a été élaboré pour l'échange de données. Les informations en temps réel ont été définies comme un des besoins des usagers, notamment de la route.

#### **3.2.2.2 *INFOPOLIS 2***

Le projet INFOPOLIS 2 a recueilli des informations sur les systèmes d'information multimodaux existants. L'objectif principal était de trouver l'ergonomie idéale d'un tel système. Les besoins des usagers ont été déterminés de façon très détaillée.

#### **3.2.2.3 *TRIDENT***

Le projet TRIDENT (Janvier 2000 – juillet 2002) de Ertico avait pour but de développer les échanges d'informations multimodales en établissant des normes et des modules de logiciels. Deux séries de spécifications ont été produites et testées dans quatre sites en Europe, avant d'établir les spécifications finales.

Différents types d'information peuvent être échangés avec les modules développés. Ils concernent fondamentalement des informations au niveau de l'horaire (arrêts, lignes), mais aussi l'état des véhicules, des retards et les temps de parcours entre deux arrêts. Le protocole DATEX a été utilisé et adapté pour coder les informations, un standard qui, initialement, avait été conçu pour le trafic routier.

#### **3.2.2.4 *EU-SPIRIT***

Système européen pour des services multimodaux (information, réservation, ticketing) (Décembre 1999 – avril 2002)

Ce projet ne voulait pas développer de nouveaux systèmes d'information, mais mieux relier les systèmes existants. L'utilisateur peut recevoir non seulement le temps de trajet entre son origine et sa destination (porte-à-porte), mais également des informations sur des services annexes, comme la location de voiture, la réservation d'hôtels, etc.

Le système se veut multimodal, mais ne tient compte que des modes de TP.

#### **3.2.2.5 INTERCEPT**

Il s'agissait d'un programme européen pour élaborer des concepts visant à promouvoir le transport multimodal. Plusieurs mesures ont été prises dans trois agglomérations, afin d'étudier les effets sur la répartition modale. Parmi ces mesures se trouvent des instruments de planification d'un trajet et le "road pricing".

L'impact des mesures sur la répartition modale a été intéressant. La part du TI a diminué considérablement, sauf dans un des cas. Le covoiturage, les transports publics et la marche à pied en ont profité.

#### **3.2.2.6 CONCERT-ELGAR**

L'objectif du projet CONCERT-ELGAR était de favoriser l'utilisation des TP pour des raisons environnementales. Les mesures consistaient essentiellement à construire des voies réservées aux bus et à leur donner la priorité aux carrefours. Une analyse de la répartition modale avant et après installation des mesures a été faite.

#### **3.2.2.7 CONCERT-P**

Ce projet avait pour but d'analyser le changement de la répartition modale suite au "road pricing" dans les centres-ville. Les résultats sont très différents d'une ville à l'autre. Dans une des villes le trafic a diminué, tandis que dans une autre il s'est plutôt réparti dans le temps. Aucun recensement n'a été fait dans la troisième ville.

#### **3.2.2.8 Trans3**

Ce projet est très original car il comprend une zone de la région de Bâle à cheval sur trois pays, soit la Suisse, la France et l'Allemagne. Il offre un portail d'information multimodale pour un trajet porte-à-porte en tenant compte des modes marche à pied, bicyclette, bus, tram, train et voiture. Sur le site internet, l'utilisateur indique le lieu de départ et le lieu d'arrivée et plusieurs alternatives de déplacement lui sont proposées.

Les défis de Trans3 se trouvent à plusieurs niveaux. Tout d'abord, la modélisation des différents réseaux doit être coordonnée, la définition des interfaces entre les différents modes est très importante. Ensuite, la véracité des informations doit être prouvée. Les paramètres ont dû être adaptés, notamment pour les déplacements en voiture et à bicyclette.

Un des objectifs du projet était d'introduire les données en temps réel dans le calcul des déplacements. Pour des raisons techniques et institutionnelles, ceci n'a pas pu être fait jusqu'à

présent. Des informations en temps réel sont pourtant disponibles pour l'état des autoroutes et des parkings de la ville de Bâle.

Le consortium est à la recherche de financement pour continuer d'offrir et de développer davantage le système.

### **3.2.3 Projets outre-mer**

#### **3.2.3.1 TravInfo (USA)**

TravInfo était un test sous conditions réelles d'un système d'information des usagers (début 1993). Il s'agissait d'une collaboration entre le secteur privé (SPR) qui s'occupait de la technologie et des services, et le secteur public (SPU) qui fournissait la base de données du système. Le but était d'offrir des informations en temps réel aux voyageurs.

Le projet pilote a duré deux ans (96/98). Le secteur public fournissait les données pour le système, et des partenaires privés offraient les services. L'architecture du système était ouverte, il était donc toujours possible pour les parties intéressées de contribuer à fournir ou d'utiliser des informations. Le projet s'étendait à différents modes de transport (route, rail, bateau, covoiturage).

Le nœud de TravInfo est le centre d'information des voyageurs. Le service de base est offert par téléphone (appelé TATS – Traveler Advisory Telephone System) en utilisant un numéro local gratuit. L'utilisateur a le choix de se faire guider par un automate ou de parler à un opérateur pour obtenir des informations. La diffusion des données à travers un « Landline Data Server » (modem) et « Wireless Data Broadcast » sont également prévues afin que des services supplémentaires puissent être offerts par des entreprises privées (pager, natel, systèmes de navigation, internet, etc.).

L'exploitation du système se poursuit depuis la fin de la phase pilote, à savoir depuis avril 1998. Le projet est présent sur internet<sup>2</sup> et plusieurs rapports ont été publiés, principalement par le PATH. Nous décrivons ci-après plus en détail ce projet intéressant.

#### **Initialisation**

Un premier rapport a décrit l'initialisation du projet. Un des facteurs clés du projet a été la collaboration entre des agences publiques et de l'industrie privée pour le développement et l'implantation du système [32].

Ainsi, cinq types de collaborations sont imaginables (d'après le DOT) :

*Division fonctionnelle des responsabilités* Le secteur public vend les informations aux opérateurs

*Franchise* même principe

---

<sup>2</sup> <http://www.erg.sri.com/travinfo> et <http://www.travinfo.org>

*Privatisation complète* Les opérateurs privés s'occupent de tout

*Publicly owned, privately operated* financé par le secteur public, opéré par un privé qui fournit l'équipement, le public profite des informations

*Collaboration public/privé* Les deux collectent, traitent et émettent des informations

Les problèmes d'application sont de natures suivantes :

- manque de volonté du SPU pour partager la responsabilité de la gestion du trafic
- fragmentation juridique
- incertitude du marché pour une technologie ITS

### **Evaluation par questionnaire**

Un premier sondage a été effectué sur internet entre août 1998 et mars 1999. Il s'agissait en premier lieu d'interroger des automobilistes qui utilisaient les services en ligne, car les horaires ainsi que les informations en temps réel des bus n'étaient pas encore intégrés. Les principaux résultats furent [33] :

Plus de personnes utilisaient les services avant de rentrer du travail (avant d'éteindre le PC dans le bureau) que le matin avant de partir (enclencher le PC ou téléphoner = effort). Par contre, les usagers changent de parcours ou de mode plus facilement le matin (qui voudrait laisser p.ex. la voiture au lieu de travail durant la nuit ?). Environ 80 % des usagers ont changé soit le parcours soit l'heure de départ après avoir appris l'existence d'une congestion (seulement 25 % si cette information venait d'une chaîne radio !). La plupart de ces personnes (60 %) croit avoir gagné du temps (20 min. en moyenne), à peine 2 % pensent en avoir perdu. Une faible partie a même changé de mode de transport en se basant sur les informations en ligne. L'utilisation du service par téléphone est moindre, peut-être par manque de connaissance de ce service.

Un sondage a été effectué par téléphone (de manière arbitraire) après la fin du projet pilote en 1998 [34]. Les voyageurs sont divisés en quatre groupes : les pendulaires utilisant leur véhicule privé, les pendulaires utilisant les transports publics, les non-pendulaires utilisant leur véhicule privé et les non-pendulaires utilisant les transports publics. Voilà quelques résultats importants :

- La façon d'acquérir les informations n'a pas changé depuis la première étude, mais le comportement des usagers après avoir reçu les informations a changé
- La répartition modale et le rapport entre pendulaires et non-pendulaires sont inchangés
- Le moyen le plus utilisé reste la radio, surtout en route. Un fort potentiel est recensé dans les systèmes de navigation
- On peut distinguer deux groupes de chercheurs d'informations : ceux qui préfèrent les médias conventionnels (radio, TV, téléphone) et ceux qui préfèrent les nouveaux médias (internet, téléphone portable, système de navigation)
- Les informations les plus utiles pour les conducteurs sont a) celles qui identifient les meilleures alternatives, b) les informations en temps réel et c) celles qui indiquent le trajet le plus rapide à travers un système de navigation. Pour les usagers des trans-

ports publics, les informations en temps réel sont les plus utiles, suivies par celles qui indiquent la meilleure alternative

- Deux fois plus de personnes ont changé leur comportement en vue d'une congestion en 1998 qu'en 1995. Très peu ont changé de mode de transport

Répartition modale :

<b>Mode</b>	<b>Pendulaires</b>	<b>Non-pendulaires</b>	<b>Total</b>
Véhicule privé :	<b>85.9</b>	<b>83.5</b>	<b>85.2</b>
- conduire seul	77.3	78.6	77.7
- moto	0.7	0.3	0.6
- covoiturage	7.9	4.6	6.9
Transport public :	<b>14.1</b>	<b>16.4</b>	<b>14.8</b>
- transit	8.2	8.2	8.2
- combinaison (P&R)	5.9	8.2	6.6

**Tableau 1 : Répartition modale selon TravInfo**

Changement du comportement :

Action	%
Changer l'heure de départ	19.1
Utiliser transports publics	1.3
Annuler le déplacement	1.6
Prévenir quelqu'un d'une arrivée tardive	14.4
Trouver un trajet alternatif	62.5
Pas sûr	1.2

**Tableau 2 : Changement du comportement en disposant de l'information**

La raison principale de ne pas écouter les informations à la radio est que le trajet utilisé n'est pas mentionné. Deux autres raisons sont le manque de trajet alternatif et le fait que la personne n'écoute habituellement pas la radio.

Une enquête ciblée parmi ceux qui ont utilisé le service TATS de TravInfo a également été menée. Les résultats principaux sont [35] :

- La majorité des personnes est satisfaite avec les informations reçues
- Ils trouvent que les informations sont plus utiles, plus justes et plus fiables que celles de la radio et de la TV
- Plus de la moitié a changé de comportement pour le déplacement, mais l'effet sur la répartition modale est négligeable

### Potentiel de commercialisation

Une enquête avait pour but d'étudier la commercialisation des services TravInfo. On a de nouveau des pendulaires et des non-pendulaires utilisant leur véhicule privé ou les transports publics. Les résultats principaux sont les suivants [36] :

- La plupart (56%) préfèrent payer « par appel », 17% désirent un paiement mensuel et 22% ne seraient pas prêts à payer du tout
- Les montants acceptés pour l'utilisation d'un système ATIS sont soit un abonnement de \$7 par mois, soit un montant allant jusqu'à \$1 par appel
- Les informations souhaitées sont des infos en temps réel, une indication de trajets alternatifs, des infos dans le véhicule, une indication du retard et une comparaison de différents trajets
- Les résultats correspondent à des études antérieures

En général, les ATIS, qui sont souvent encore en phase de test, sont gratuits. Plusieurs personnes pensent qu'un tel service devrait être fourni par le secteur public. Un autre problème est qu'un tel service doit s'autofinancer et le montant demandé dépend des revenus nécessaires et non pas des souhaits des utilisateurs.

## Evaluation finale du projet

Un rapport résume les expériences faites pendant le projet [37] :

### *Niveau institutionnel*

- Le secteur public a dû se mettre en accord de ne pas diffuser des données autrement que par téléphone, car les privés ont eu peur d'être poussés hors du projet si les privés donnaient des informations gratuitement à travers des moyens "sans fil"
- Perte de temps due à des différentes expectations des partenaires (réconciliations, contrats)
- Au total, le projet s'est retrouvé avec un retard de 28 mois pour la première phase (35 mois au lieu de 19 !)
- Des problèmes techniques ont fait que les informations de la police autoroutière n'arrivaient pas automatiquement au centre d'information, il manquait donc une source importante de données
- La campagne de publicité pour le numéro de téléphone n'était que peu efficace, par manque de moyens financiers
- Le logiciel utilisé se basait sur un système militaire et il était difficile d'y apporter des modifications. Lorsque le système fut terminé, il était déjà dépassé par la technologie
- Des problèmes de droits d'auteur sont apparus avec le consultant externe chargé d'établir le système

### *Niveau technologique*

- L'interface de travail pour les opérateurs du centre d'informations s'est révélée mal adaptée
- Le serveur utilisé s'est montré trop lent pour servir une demande élevée d'informations
- Le manque de données sur le trafic (Caltrans n'a pas pu mettre en service son système de gestion de trafic à temps, ce qui a réduit le nombre et les lieux de mesures) a également contribué au retrait de quelques petits opérateurs pourtant intéressés

Réponses des utilisateurs :

- Le projet n'a pas eu beaucoup d'effet sur la répartition modale des déplacements des voyageurs
- La plupart sont prêts à payer pour un service d'informations, si celui-ci est plus performant que ce que communiquent les chaînes radio et télévision

Conclusions :

- Les buts étaient trop ambitieux et non réalistes dans le cadre du temps à disposition
- La flexibilité du système n'était pas suffisante
- La dépendance à l'obtention de données extérieures est un risque qui doit être bien étudié
- Le marché n'est pas encore assez développé pour que les privés investissent de grands montants

Recommandations :

- Prévoir assez de temps pour la mise en route du projet
- Etablir un plan de gestion de risques pour mieux réagir en cas d'imprévis
- Encourager la discussion avec les opérateurs privés à un niveau approprié

### **3.2.3.2 Atlanta ATIS-KIOSK Project (Travelink)**

130 "kiosques" d'information ont été installés aux nœuds d'échanges des systèmes de transport et aux points touristiques<sup>3</sup>. Entre autres, des informations en temps réel de trafic et des informations des opérateurs de transport public (MARTA, CCT) y sont fournies. Ce système a été mis en place avant les Jeux Olympiques de 1996, mais n'était pas encore complet à cette période. Après les JO, son financement est devenu plus difficile et l'évaluation ne s'est faite que d'une manière très basique. L'utilisation des kiosques n'était pas très élevée dans les stations de MARTA, par manque de temps et d'intérêt des voyageurs pour changer leur itinéraire.

Le système continue d'exister, car la demande d'informations du type touristique reste élevée (météo, manifestations, info trafic,...).

### **3.2.3.3 Boston SmarTraveler**

Des informations en temps réel du trafic et des opérateurs TP peuvent être obtenues par téléphone. Ce service ne comprend toutefois pas une indication d'alternatives. Ses utilisateurs sont satisfaits des informations reçues, mais un impact sur la congestion n'a pas pu être constaté.

Egalement disponible sur internet<sup>4</sup>, il a été étendu à d'autres villes.

### **3.2.3.4 Seattle Wide-Area Information For Travelers (SWIFT)**

Ce projet a testé les performances d'un "high speed FM subcarrier" pour communiquer des informations à des pagers, des notebooks ou des systèmes de navigation<sup>5</sup>. Les informations venaient du centre de gestion autoroutier et des opérateurs des lignes de bus. Le projet a également rencontré des problèmes surtout au niveau institutionnel entre le secteur privé et le secteur public. Par l'absence d'une étude de marché, l'acceptation du système par les utilisateurs n'a pas pu être établie.

---

<sup>3</sup> Source : U.S. Department of Transportation (<http://www.its.dot.gov>)

<sup>4</sup> <http://www.smartraveler.com>

<sup>5</sup> U.S. Department of Transportation (<http://www.its.dot.gov>)

### 3.2.4 Littérature

Comme barrières principales pour l'avancement de l'intermodalité sont identifiées [38] :

- *barrières institutionnelles*  
manque de coopération entre les opérateurs, restrictions locales
- *barrières d'intégration*  
manque de la vision de l'ensemble, restrictions juridiques
- *conditions d'interopérabilité*  
échange de données, compatibilité des composantes du système
- *contraintes de financement*  
qui paye quoi ?
- *condition physique de l'infrastructure*  
toutes les stations ne permettent pas d'être un nœud d'échange entre différents modes
- *demande faible*  
utilisation de la voiture plus commode, piètre image de marque des transports publics
- *intérêt des usagers*  
protection des données en utilisant des « smart cards »
- *manque de données*  
peu d'études sur les interactions multimodales
- *manque de critères de performance*  
autre que temps de trajet ?
- *incertitude d'un gain potentiel*  
qui gagne quoi et combien ?

En tant que critère principal pour l'évaluation de la multimodalité, le temps de trajet doit être subdivisé en temps d'attente (qui est le facteur le plus pénalisant) et en temps à bord d'un véhicule.

L'utilisation de ITS est bien évidemment vue comme un facteur clé pour le développement du transport multimodal. Déjà utilisés sont des Advanced Transportation Management Systems (ATMS), la localisation automatique des véhicules (AVI), des compteurs d'usagers automatiques. Le paiement d'un forfait pour plusieurs modes de transport dans un réseau est également un facteur important.

Du point de vue des opérateurs, les systèmes de localisation automatique et le « dispatching » à l'aide de l'ordinateur sont les technologies les plus utilisées et les plus rapidement amorties (2 ans). Ces systèmes augmentent la sécurité et la ponctualité, mais en général pas le nombre d'utilisateurs.

## **4 Les transports en Suisse**

### **4.1 Transports individuels**

#### **4.1.1 Généralités**

La caractéristique principale du transport individuel est sa grande désagrégation. Les individus et les véhicules individuels peuvent se déplacer librement sur un réseau mis à disposition, selon des règles prédéfinies par la législation.

En Suisse, environ 5 millions de véhicules motorisés<sup>6</sup> sont immatriculés (voitures de tourisme, véhicules de transport de personnes, véhicules de transport de marchandises, véhicules agricoles et industriels et motocycles). Ils ont à disposition un réseau routier d'environ 71'230 km.

### **4.2 Transports publics**

#### **4.2.1 Généralités**

La Suisse est un pays qui a, pour des raisons historiques, beaucoup d'entreprises de transport, que ce soit le transport sur rail, sur la route, sur l'eau, par câble ou dans l'air. Le pays est largement connu pour ses nombreuses compagnies de chemin de fer de montagne, ainsi que pour les téléphériques.

En 2000, le réseau des lignes exploitées par les 535 entreprises de transport mesurait presque 25'000 kilomètres.

---

<sup>6</sup> Etat du 30.09.2004 selon l'Office fédéral de la Statistique

Le tableau suivant montre la part des différents moyens de transport au niveau de la longueur de réseau, nombre d'emplois, nombre de voyageurs et nombre d'arrêts :

Moyen de transport	Nombre d'entreprises	Longueur de réseau (en km)	Nombre d'emplois	Nombre de voyageurs (en millions)	Nombre de gares, arrêts et aéroports
Chemin de fer	47	5'038	35'712	429	1'835
Entreprises spéciales (Chemins de fer à crémaillère, funiculaires, téléphériques)	286	1'028	6'972	222	1'337
Transport à courte distance (Tramways, trolleybus, autobus)	16	1'719	7'769	913	1'098
Concessionnaires d'automobiles	169	13'728	4'609	258	17'350
Navigation	13	745	681	11	330
Trafic aérien (marché intérieur)	4	2'500	-	1	7
<b>Total</b>	<b>535</b>	<b>24'758</b>	<b>56'743</b>	<b>1'834</b>	<b>24'957</b>

**Tableau 3 : Chiffres clés des transports publics en Suisse**

La part des transports publics est d'environ 22 % au niveau des voyageurs-kilomètres et d'environ 24 % en nombre de voyageurs.

## 4.2.2 Entreprises

### 4.2.2.1 Entreprises publiques

Il existe deux entreprises en Suisse qui peuvent être appelées publiques. Il s'agit des Chemins de fer fédéraux (CFF SA) et du service des cars postaux (La Poste Suisse). Elles sont aujourd'hui privatisées avec une majorité du capital action est détenu par l'administration publique.

### 4.2.2.2 Entreprises privées

La Suisse a toujours été un pays qui favorisait l'installation d'entreprises de transport. Ainsi, un réseau de transports publics très dense s'est créé et aujourd'hui de nombreuses entreprises privées s'occupent du transport des voyageurs, comme en témoigne le Tableau 3.

### **4.2.2.3 Associations**

#### **Union des transports publics**

L'association nationale la plus grande et la plus importante est l'Union des transports publics (UTP<sup>7</sup>). Elle est l'organisation faîtière nationale des entreprises de transport public, organisée en société coopérative avec environ 150 membres de tous les secteurs à l'exception du trafic aérien.

Au sein de l'association existent divers groupes de travail qui s'occupent d'une multitude de thèmes concernant les transports publics. En plus, l'UTP a des délégués dans des commissions d'experts de niveau national et international.

De nombreuses entreprises industrielles et des prestataires de service dans le domaine des transports publics sont affiliés en tant que partenaires (membres amis)

La direction de l'UTP est constituée de professionnels, tant que les représentants dans les comités et les commissions sont des spécialistes travaillant pour une entreprise membre.

L'association propose différents services, comme des colloques, de la formation continue et de l'aide à acquérir le label de qualité de Suisse Tourisme.

#### **Association des entreprises suisses de navigation**

L'AESN regroupe 15 des entreprises de navigation actives en Suisse<sup>8</sup>.

#### **Remontées mécaniques**

Cette association représente quelques 430 entreprises spécialisées dans le transport par câble<sup>9</sup>. Le nombre élevé s'explique par le fait que des nombreuses petites installations, qui ne sont pas soumises à une concession de l'Office fédéral des transports, y participent également (au total, il y en a environ 650 entreprises en Suisse).

Comme l'UTP, l'association des remontées mécaniques a des partenaires dans le domaine de l'industrie. Le secrétariat est assuré en collaboration avec l'UTP, qui se trouve dans les mêmes locaux.

Le but principal de l'association est d'encourager la collaboration entre les différentes entreprises et défend les intérêts envers les administrations.

#### **Les communautés tarifaires**

---

<sup>7</sup> <http://www.utp.ch>

<sup>8</sup> <http://www.vss.ch>

<sup>9</sup> <http://www.cableways.org>

Plusieurs entreprises de transport dans des agglomérations ou des régions se sont mises en accord de gérer d'une manière commune la vente des titres de transport. Ceci facilite l'utilisation des transports publics pour l'utilisateur, qui peut emprunter n'importe quel moyen de transport de n'importe quelle entreprise avec le même billet.

La plupart des communautés tarifaires n'offrent que des abonnements hebdomadaires, mensuels ou annuels, mais pas des billets pour des trajets uniques. Les plus importantes de ces communautés tarifaires figurent dans le tableau suivant.

Nom	Région géographique couverte
A-Welle	Zofingen, Aarau, Baden
Abo Zig-Zag	Bienne, Jura Bernois, Ins
Arcobaleno	Canton du Tessin
Bäre-Abi	Bern, Langnau i.E.
Flextax	Schaffhausen
Frosch-Abo	Solothurn, Grenchen
Onde Verte	Canton de Neuchâtel
Ostwind	Frauenfeld, St. Gallen, Appenzell, Sargans
Passepartout	Cantons de Lucerne, Ob- et Nidwald
Presto	Agglomération Fribourgeoise
Stärncharte	Thun, Spiez, Kandersteg, Adelboden, Zweisimmen, Lenk
Sunnecharte	Interlaken, Grindelwald, Meiringen
Tarifverbund Oberengadin	St. Moritz, Oberengadin
Tarifverbund Olten	Balsthal, Olten, Schönenwerd
Vagabond	Canton du Jura

**Tableau 4 : Communautés tarifaires avec abonnements uniquement (Source : LITRA 2002)**

Il existe également des systèmes de communauté tarifaire plus avancés, où même les billets pour un seul trajet peuvent être utilisés avec n'importe quelle entreprise de transport sur les réseaux correspondants.

Nom	Région couverte
Schwyzepass	Canton de Schwyz, Einsiedeln
Tarifverbund Nordwestschweiz	Cantons de Bâle Ville et de Bâle Campagne, Rheinfelden
Unireso	Agglomération Genevoise, Nyon
Zugerpass	Canton de Zoug
Zürcher Verkehrsverbund	Canton de Zurich

**Tableau 5 : Communautés tarifaires avec billettique commune (Source : LITRA 2002)**

La communauté la plus importante reste pourtant celle de l'abonnement général, qui permet l'utilisation des transports publics dans le pays entier pendant une année. A peu d'exceptions près, les plus grandes entreprises de transport participent à cette prestation. Environ 240'000 personnes en Suisse possèdent un abonnement général (Source : Tribune de Genève, 2.9.2002).

#### 4.2.3 Hiérarchie

En Suisse, il n'y a pas de hiérarchie proprement dite. Malgré tout, les CFF et les cars postaux sont des acteurs principaux de par leur répartition nationale. Toutes les entreprises sont contrôlées par l'Office fédéral des transports (OFT), qui est l'autorité compétente pour octroyer les concessions. L'OFT a donc un pouvoir sur les entreprises, pour les aspects légaux principalement.

### 4.3 Nouveaux modes

Il existe néanmoins des alternatives aux transports individuel et public traditionnels, qui sont un mélange des deux. En général, ces modes proposent l'utilisation commune de véhicules individuels, soit sur réservation soit par entente entre particuliers. Ce chapitre présente deux de ces modes, le partage de voiture (Car sharing) et le covoiturage (Car pooling).

#### 4.3.1 Partage de voitures

Le concept du partage de voiture, aussi appelé car sharing, se base sur l'utilisation d'un ou de plusieurs véhicules par différents particuliers. En général, les voitures sont achetées et maintenues par une coopérative, une association ou une société. Les adhérents peuvent réserver un véhicule pour une durée qui leur convient. La facturation se fait ensuite sur la base de la durée de réservation et/ou des kilomètres parcourus.

Le partage de voitures professionnel est apparu en Suisse à la fin des années 80. En 1997, les deux coopératives les plus grandes ont fusionné pour former Mobility CarSharing Suisse. Le nombre de clients et de véhicules n'a cessé d'augmenter depuis et aujourd'hui presque 60'000 personnes profitent des 1'800 voitures à disposition.

Le système de réservation électronique permet de connaître en tout temps l'état des réservations et d'utilisation des véhicules. Les informations concernant une voiture sont également disponibles sur l'ordinateur de bord. L'actualisation se fait par transmission de messages codés (du type SMS) à travers le réseau GSM.

#### **4.3.2 Covoiturage**

Pour le covoiturage, un conducteur met à disposition une ou plusieurs places dans son véhicule sur un trajet qu'il prévoit de faire. Par la loi, il est interdit d'accepter une rémunération des passagers. Ce système est appliqué de préférence par des personnes qui habitent et travaillent pas loin l'une de l'autre, ou des employés d'une même entreprise.

### **4.4 Modélisation des réseaux**

La base de calcul d'une chaîne de transport optimale est le modèle qui représente les systèmes de transport disponibles. Le modèle est en général un graphe, composé d'arcs orientés, sur lesquels un mouvement est possible, et de nœuds, où un changement d'arc est possible ou une action peut être effectuée. La manière de disposer les nœuds et les arcs constitue la base fondamentale de tout algorithme pour la détermination du parcours le plus court. Aujourd'hui encore, la modélisation des réseaux de transport se fait d'une manière différente pour les transports individuels que pour les transports publics. Ces différences et leurs conséquences sont présentées dans ce chapitre.

#### **4.4.1 Réseaux de transports individuels**

Les réseaux de transports individuels se basent principalement sur l'infrastructure disponible : principalement les routes et les carrefours pour les voitures de tourisme et les bicyclettes. Les nœuds du graphe sont les carrefours et les arcs représentent les routes ou les pistes cyclables.

#### **4.4.2 Réseaux de transports publics**

Pour les transports publics, le graphe n'est pas basé sur le réseau physique des routes ou des rails. Plus important pour le service sont les arrêts qui sont représentés par les nœuds du graphe. Les arcs qui les relient symbolisent le parcours à effectuer entre les arrêts, sans tenir compte d'éventuels carrefours intermédiaires.

#### **4.4.3 Réseaux multimodaux**

De nombreux travaux de recherche traitent de la modélisation de réseaux de transport et de leur utilisation. La construction d'un tel réseau est en général effectuée en utilisant différents niveaux. Les niveaux peuvent se distinguer soit par importance (trafic local, régional, interrégional, etc.) soit par moyen de transport. Ensuite, les interfaces (aux nœuds) entre les différents niveaux doivent être établies.

Ainsi, il est possible de modéliser un changement de mode à ces interfaces. Pour calculer une chaîne de transport en mode statique, un tel réseau multimodal est suffisamment précis. Toutefois, si l'on veut rajouter des informations en temps réel, cette manière de représentation simplifie trop certains cas spécifiques dans lesquels, en réalité, il existe une forte interaction entre différents modes de transport. Un exemple est la mixité de plusieurs modes sur une voirie urbaine. On y trouve du trafic individuel (voiture, moto, etc.) ainsi que des véhicules de transport public (trams, bus). Si les voies de circulation ne sont pas séparées, ces différents modes peuvent se gêner mutuellement (p.ex. un bus retenu dans une congestion), ce qu'un modèle dont les réseaux sont séparés ne peut pas représenter.

## **5      Système de navigation dynamique multimodale**

### **5.1      Concept général**

La présente recherche s'attache à définir le développement d'informations et le concept de système de navigation. Ce système est dynamique en ce qu'il s'adapte au cours du temps selon la situation du transport (par exemple en fonction de la congestion) et il est multimodal car il s'ouvre aux divers modes de transports privés ou publiques.

Un Système de Navigation Dynamique Multimodale (SNDM) doit être capable de déterminer la chaîne de transport idéale pour chaque voyageur, en proposant plusieurs possibilités, selon les souhaits personnels et les informations les plus actuelles à disposition. Une fois le voyage commencé, le système doit intervenir si les modifications de l'état d'exploitation des réseaux nécessitent un changement de la chaîne de transport initialement proposée. Finalement, il est également important de retourner de l'information après la fin du voyage, afin de pouvoir adapter, le cas échéant, les informations pour une utilisation future. Ainsi, le SNDM est utilisé avant le voyage, pendant le voyage et après le voyage.

Tout l'intérêt d'un outil dynamique est lié au fait que les informations statiques ne sont pas adaptées aux besoins de la plupart des voyageurs. En plus, certaines informations sont loin d'être statiques dans la réalité, ce qui est surtout le cas du temps de parcours. La variabilité d'une heure à l'autre et d'un jour à l'autre fait que ce paramètre important est difficile à prévoir d'une manière fiable par un calcul statique.

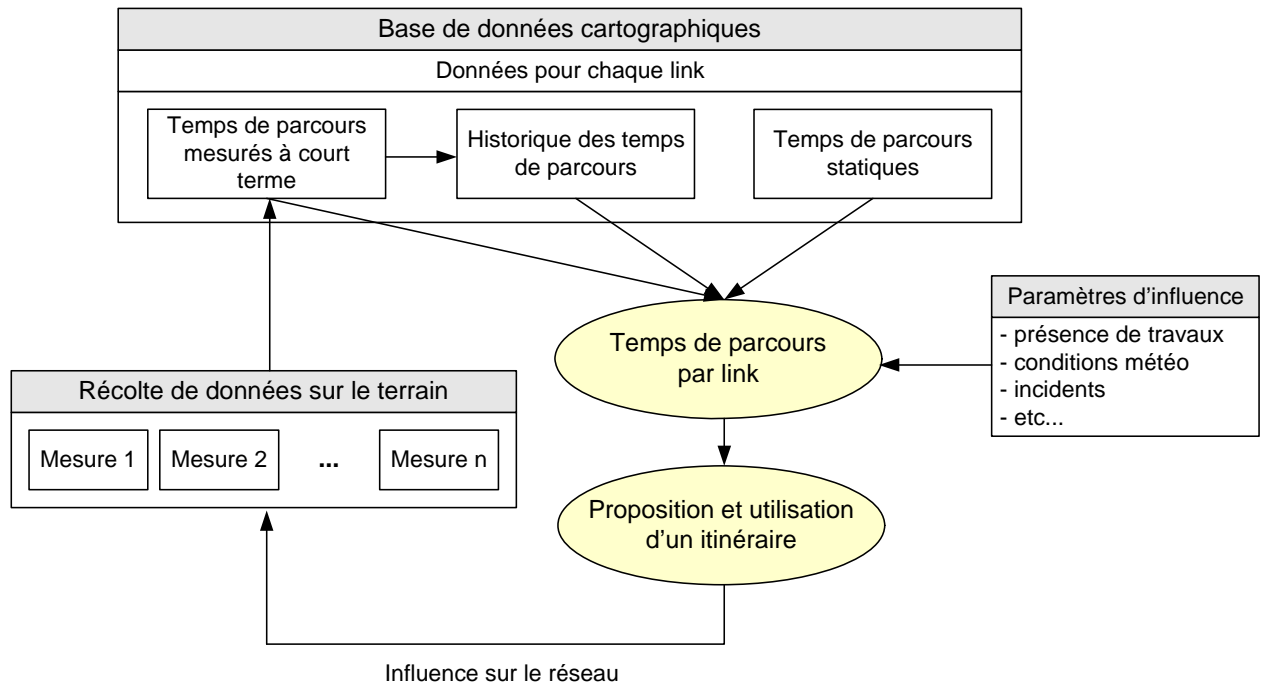
La présente recherche se veut indépendante de tout développement technologique et plus particulièrement vis-à-vis des appareils potentiellement utilisables pour la navigation dynamique multimodale. Actuellement le terme de système de navigation désigne plutôt un appareil utilisé pour le guidage d'un automobiliste. Le terme de système de navigation dynamique multimodale (SNDM) est censé lui être un outil personnel et personnalisé ( « Personal Travel Assistant » – PTA) qui se veut très général et indépendant du mode de transport utilisé.

Le potentiel de tels systèmes de navigation sur le marché Suisse et leur impact au niveau des choix auxquels fait face le voyageur a déjà été élaboré par un travail de recherche récent mené par le bureau Ernst Basler + Partner [1].

### 5.1.1 Informations avant le voyage (Pre-trip)

Pour pouvoir donner des informations avant le voyage, le SNDM doit utiliser une base de données historique. Cette base est constamment actualisée par des informations mesurées dans le terrain. Les informations fournies peu avant le départ peuvent être parfois ajustées par des informations temps réel.

La figure suivante montre, à l'exemple du temps de parcours, quels sont les paramètres qui influencent la proposition d'un temps de parcours avant le départ.



**Figure 2 : Détermination du temps de parcours pour la proposition d'un itinéraire**

Ainsi, le SNDM propose un itinéraire idéal sur la base des informations à disposition et également un certain nombre d'alternatives. Pour qu'un suivi dynamique de l'itinéraire soit possible, l'utilisateur doit confirmer son choix d'itinéraire. Dans le cas idéal, le SNDM pourrait réserver les services nécessaires pour l'itinéraire choisi, comme le stationnement, un péage, le billet de bus, etc.

### 5.1.2 Informations pendant le voyage (On-trip)

Comme l'état d'exploitation d'un réseau de transport évolue constamment, le voyageur doit être informé dès qu'un changement affecte l'itinéraire qu'il a choisi (congestion importante ou problème d'exploitation sur une ligne de transport public). Alors, le système propose une alternative qui est compatible avec les choix effectués avant le départ. Ce service n'est possible que si l'appareil personnel est muni d'un système de positionnement.

### 5.1.3 Feed-back après le voyage (Post-trip)

Afin de pouvoir évaluer les performances du SNDM et pour développer la base de données historique, l'appareil personnel doit retourner des informations sur l'itinéraire effectué. Ceci peut se faire de manière automatique et anonyme.

## 5.2 Représentation du réseau

Comme évoqué au § 4.4, la représentation des réseaux de transport par un graphe adapté est essentielle pour un calcul de parcours optimal utilisant des informations dynamiques. Dans le cas idéal, un seul graphe représente tous les modes de déplacement confondus. Une séparation ne peut être acceptée que pour les transports en site propre qui ne présentent aucune interaction avec d'autres modes. C'est par exemple le cas des chemins de fer et du trafic aérien.

Les nœuds et les arcs doivent pouvoir contenir plusieurs informations, comme les modes qui peuvent les emprunter (sinon, c'est un arc par mode et la mixité n'est plus possible) et d'autres informations dynamiques comme le temps de parcours pour chaque tranche de temps. Cette dernière dépend de la précision souhaitée du système, car plus courte est la tranche de temps, plus précis est le calcul de l'itinéraire

Une attention particulière doit être prêtée aux interfaces de transport où un changement de mode est possible. Chaque interface nécessite une analyse particulière, afin de pouvoir déterminer les temps et les conditions de changement nécessaires. La figure suivante propose la modélisation d'un parking-relais (P+R). Cette interface est composée de trois nœuds : l'intersection, le parking et l'arrêt de bus. Le temps nécessaire pour trouver une place de stationnement libre, se rendre à l'arrêt de bus et le temps d'attente jusqu'au prochain véhicule peut se baser sur des moyennes. Il est encore préférable de chercher une corrélation avec le taux d'occupation du parking et la localisation des places libres.

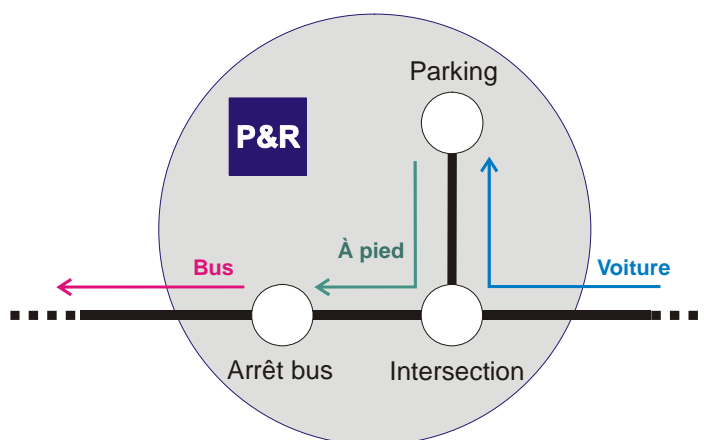


Figure 3 : Modélisation d'un parking-relais dans un réseau multimodal

## 5.3 Fonction d'utilité

La fonction d'utilité essaye de décrire l'attitude du voyageur face au choix qu'il peut faire pour réaliser son déplacement. Différents paramètres peuvent être pris en compte, et à chacun est attribué un poids de pondération. Le but principal de cette fonction est de trouver l'utilité maximale que le voyageur peut tirer de son déplacement. En général, les poids de pondération sont fonction des préférences personnelles du voyageur et sont ainsi fortement variables.

### 5.3.1 Les différents choix du voyageur

Dans leur travail de recherche, Raymann et al. [1] décrivent les quatre choix qui influencent le comportement du voyageur :

#### 1) Choix de la destination

Pour les déplacements journaliers (pendulaires), le choix de la destination ne joue qu'un rôle moindre, car le lieu de travail reste en général fixe. Quand il s'agit d'un déplacement de loisir, le choix dépend de l'offre de la destination.

#### 2) Choix modal

Aujourd'hui, le choix modal se fait à plusieurs niveaux. D'abord à long terme, comme l'achat d'une voiture ou d'une moto. Il peut avoir un choix à moyen terme avec un achat d'un abonnement pour les transports publics. Finalement, il y a le choix à court terme pour un seul déplacement ou un voyage. En général, le choix d'un niveau est influencé par les niveaux supérieurs, c'est-à-dire que, par exemple, un seul déplacement dépend du fait que le voyageur dispose d'un véhicule privé ou d'un abonnement. Ce comportement est décrit par Flamm [39]. Ainsi, les coûts d'un déplacement ne sont pas considérés dans leur totalité. Pour le propriétaire d'un abonnement général, un déplacement en transports publics est considéré comme gratuit. Celui qui possède une voiture ne considère que les coûts variables (essence, péage, parkings, etc.), car il supporte de toute façon les coûts fixes (amortissement, assurances, etc.).

#### 3) Choix de l'heure du parcours

L'heure de départ peut, dans certains cas, être modifiée, afin de retrouver plus de confort lors du déplacement.

#### 4) Choix du parcours

Le choix du parcours a une influence importante sur le comportement, car il permet d'optimiser le temps de parcours, le paramètre le plus important de la fonction d'utilité.

Le travail de recherche [1] conclut que les choix ne peuvent guère être influencés par un PTA pour les déplacements d'un point de vue global. Seul dans le cas d'un réseau saturé dans des agglomérations, un tel système a un intérêt plus important, ce qui confirme la nécessité de disposer des informations dynamiques pour le calcul d'itinéraire. C'est avant tout le choix du parcours qui est susceptible d'être changé.

### **5.3.2 Paramètres de la fonction d'utilité**

Comme évoqué plus haut, la fonction d'utilité tient compte de plusieurs paramètres et leur pondération. On peut distinguer deux niveaux de paramètres, les essentiels et les optionnels. Les paramètres du premier niveau sont nécessaires pour que le SNDM puisse donner des informations correctes. Les paramètres du deuxième niveau ne sont pas obligatoires pour le bon fonctionnement du système pour la plupart des voyageurs, mais peuvent être très importants pour certains groupes d'utilisateurs.

#### **5.3.2.1 Paramètres essentiels**

Parmi les paramètres essentiels pour le SNDM se trouvent le temps de parcours dynamique, ainsi que les coûts du déplacement. Ces deux paramètres sont considérés comme étant les plus importants pour un voyageur « standard ».

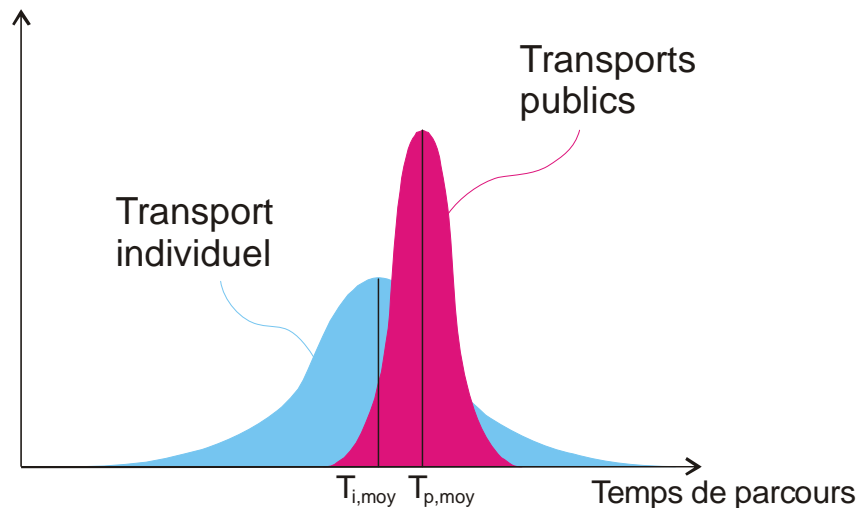
Le temps de parcours est déterminé à partir du temps de parcours historique, ajusté par l'état de l'exploitation et le temps de parcours actuel (cf. Figure 2).

Les coûts du déplacement sont fonction de la disponibilité de véhicules privés et de services abonnés. Seuls les coûts variables sont pris en compte, car les coûts fixes sont le plus souvent négligés par les voyageurs (cf. le choix modal au § 5.3.1).

#### **5.3.2.2 Paramètres optionnels**

A part les paramètres essentiels, le SNDM peut prendre en compte plusieurs paramètres optionnels. Comme le système est personnalisé, chaque utilisateur peut déterminer lui-même l'importance qu'il veut donner à ces paramètres. Il s'agit avant tout de paramètres de confort, comme le taux d'occupation, les conditions météo, l'accessibilité pour les personnes handicapées, etc.

Pour beaucoup de voyageurs, la fiabilité des informations est très importante, surtout s'il s'agit d'arriver à destination à un moment précis. L'exemple suivant montre cette différence en fiabilité du temps de parcours : le véhicule individuel est plus rapide en moyenne, mais l'écart type du temps de parcours est plutôt élevé. Le déplacement en transports publics nécessite plus de temps, mais avec une fiabilité supérieure.



**Figure 4 : Exemple de fiabilité différente pour deux modes de transport**

Il existe encore différents paramètres sociaux qui influencent le choix modal (voir Flamm [39]), mais qui restent difficiles à chiffrer, comme la sociabilité, l'adéquation symbolique, le plaisir d'utilisation, la perception du risque, etc.

### 5.3.3 Personnalisation de la fonction d'utilité

La personnalisation de la fonction d'utilité est faite en donnant des poids aux paramètres décrits ci-dessus. Pour ce faire, différentes procédures sont imaginables : une mise à disposition des paramètres standards par le fournisseur du système, la détermination directe des poids de pondération par l'utilisateur ou la définition automatique sur la base d'un questionnaire.

Le premier cas est en principe le plus simple pour l'utilisateur, car aucune modification n'est demandée de sa part, mais le niveau de personnalisation est presque nul.

La deuxième procédure demande une attention très forte de l'utilisateur, car il doit lui-même donner des valeurs de pondération. Il doit donc bien connaître les fonctions du système et être conscient des conséquences d'un changement.

La troisième approche est la mieux adaptée pour un système complexe. Il s'agit de développer un questionnaire compréhensible qui, couplé avec quelques informations de base, détermine de manière automatique les pondérations. Le système doit demander à l'utilisateur comment il réagirait à des situations particulières et il détermine alors son attitude vis-à-vis des modes de transport, de leurs coûts et du confort attendu, ainsi que de la perception du temps de déplacement.

Au fur et à mesure de l'utilisation, un apprentissage automatique du SNDM permet d'adapter les poids de pondération pour obtenir une meilleure personnalisation du service. Ceci se fait sur la base des choix d'itinéraire effectués et un éventuel feed-back de l'utilisateur.

## 5.4 Calcul d'itinéraire

### 5.4.1 Introduction

L'introduction de chaînes de transport multimodales dans les algorithmes de calcul de trajet a fortement contribué à la complexité de ces derniers. Actuellement, les efforts sont mis dans l'intégration de données en temps réel. Malgré cela, la plupart des applications courantes ne considèrent que des trajets simples et un trajet aller-retour est composé de deux de ces trajets simples. Pourtant, des allers simples ne sont rarement pratiqués, car un voyageur retourne habituellement à son point de départ (maison, lieu de travail, etc.). Or, si l'utilité d'un arc est, en réalité fonction du temps, le coût du trajet aller-retour lui n'est pas forcément égal au double du coût de l'aller optimum. Les différentes valeurs de l'utilité des arcs peuvent parvenir de données soit dynamiques soit historiques. La tendance actuelle va vers l'enregistrement et le stockage de ces types de données, ce qui est nécessaire pour la description de l'état du réseau en temps réel, ainsi que pour les prévisions. Le pas suivant sera d'intégrer ces données dans le calcul de futurs trajets.

De nombreux travaux de recherche, terminés ou en cours, regroupent les différents services nécessaires pour offrir un système d'information au voyageur (Advanced Traveller Information System – ATIS). En général, une application pratique des services est établie dans une ou plusieurs régions test, afin de tester l'installation et les performances du système. Un service d'information multimodal fonctionne ainsi : Le client indique son lieu de départ, sa destination, ainsi que son heure de départ ou d'arrivée visée. Le système calcule ensuite le trajet optimum pour des modes privés (voiture, vélo, etc.) ou pour des modes de transports publics. C'est le client qui compare les différentes variantes et qui décide laquelle retenir. Le cas échéant, des données dynamiques sont intégrées dans le calcul.

La possibilité de changer d'un mode de transport à l'autre au cours du trajet n'est offerte que dans de rares cas. Les raisons principales sont liées à la modélisation différente des réseaux, aux différents modes et aux paramètres utilisés pour décrire l'utilité d'un arc en fonction du mode. Des trajets aller-retour peuvent être calculés pour certains modes, particulièrement en transports publics, en se basant sur les données statiques de leurs horaires. Dans ces cas, l'intermodalité se limite à quelques modes de transports publics d'une région limitée. De plus en plus de services offrent la possibilité d'optimiser un trajet de porte-à-porte en tenant compte du temps nécessaire pour rejoindre l'arrêt de transports publics le plus près ainsi que du temps nécessaire pour rejoindre sa destination à partir du dernier arrêt utilisé.

#### **5.4.1.1 Recherche**

Le développement d'algorithmes de calcul du trajet le plus court fait appel en général à la recherche opérationnelle. Les résultats paraissent dans des revues spécifiques et échappent ainsi souvent à un certain nombre d'utilisateurs potentiels. Pallottino et Scutella [40] ont publié un résumé intéressant des techniques existants pour calculer les trajets optimum en transports. Dans leur article ils décrivent les différentes approches utilisées dans le passé et dans le présent. Ziliaskopoulos et Wardell [41] proposent un algorithme qui tient compte du réseau multimodal, de la valeur dynamique de l'utilité des arcs, ainsi que du temps nécessaire pour changer de mode. Ils soulignent quelques problèmes fréquents dans ce genre de calcul et ils testent la performance de leur algorithme.

#### **5.4.1.2 Applications**

Il est intéressant de voir comment les algorithmes sont utilisés dans différentes applications. Or l'objet principal de recherche est souvent un service et les outils de calcul peuvent parvenir de sources différentes. Malheureusement, le calcul du trajet optimum se base souvent sur des algorithmes développés par des entreprises privées. Ce sont des boîtes noires, dont le fonctionnement reste inaccessible à l'utilisateur. Ci-dessous sont présentés quelques-uns des projets de grande envergure, réalisés en Europe et aux Etats-Unis. La liste n'est de loin pas exhaustive, mais les résultats des études sont facilement accessibles et les services sont toujours opérationnels.

- EU-SPIRIT n'est pas un système d'information en soi, mais une initiative pour combiner les informations existantes de services régionaux.
- VMZ Berlin [42] offre une bonne information sur l'état actuel du trafic. Il est également possible de faire calculer un trajet porte-à-porte optimum pour différents modes, mais une comparaison directe entre les modes n'est pas disponible. Le calcul d'un trajet aller-retour peut être effectué en indiquant la même adresse pour le lieu de départ et de destination et l'adresse de destination réelle en tant que point intermédiaire, mais le temps d'escale ne peut pas être défini.
- Dans la région tri-nationale de Bâle, le service Trans 3 [43] offre de l'information de trafic et de transports publics. Le calcul de trajet entre origine et destination est effectué pour différentes chaînes de transport. L'introduction de points intermédiaires n'est pas possible, mais des données dynamiques sont prises en compte, si elles sont disponibles.
- Il est possible de recevoir de l'information sur l'état du trafic en temps réel, sur les transports publics et le car pooling dans la région de San Francisco à travers le service TravInfo® [32]. Le client peut appeler un service téléphonique pour recevoir l'information. Aucune information de trafic n'est disponible sur internet.

La liste pourrait être poursuivie avec d'autres applications (voir aussi [31, 44-49]), mais les résultats sont essentiellement les mêmes que pour les cas cités ci-dessus.

### 5.4.2 Problèmes spécifiques du calcul d'un trajet aller-retour

Lors d'un trajet aller-retour, le choix de mode de transport du trajet de retour dépend fortement du choix effectué pour le trajet de l'aller en quittant le point de départ. Si une personne prend la voiture pour se rendre au travail le matin, elle va très probablement rentrer en voiture le soir. Si elle laisse sa voiture dans un parking-relais et continue en transports publics, elle va devoir passer dans le même parking-relais lors du trajet de retour, afin de récupérer son véhicule. Il est ainsi possible que cette personne, en suivant les conseils donnés le matin par un système d'information, perde plus de temps lors du trajet de retour que ce qu'elle a gagné le matin en utilisant un certain mode de transport. Le calcul d'itinéraire doit donc tenir compte de données dynamiques (ou historiques) pour l'aller et le retour. Il doit aussi être possible de changer de mode à des endroits spécifiés. Ceci nécessite une définition détaillée des interfaces des réseaux, comprenant le temps nécessaire de changement de mode. Des contraintes supplémentaires peuvent ainsi être ajoutées au calcul, comme le véhicule privé qui est garé dans un parking-relais. Des modes alternatifs, comme la partage de voitures, la location de véhicules, etc. devraient également être proposés aux voyageurs.

L'exemple suivant (Figure 5) illustre le problème décrit ci-dessus. Prenons la même personne que précédemment qui se rend de sa maison au lieu de travail le matin et rentre le soir et qui a le choix entre sa voiture (V) et le bus (B). Les deux modes empruntent le même parcours avec deux parkings-relais (P&R) intermédiaires. L'utilité d'un arc (ici le temps de parcours) est fonction du moyen de transport utilisé et de l'heure de la journée. Afin de simplifier l'exemple, les temps de changement de mode aux P&R ne sont pas pris en compte. L'optimisation classique du trajet du matin montre que la personne devrait déposer sa voiture au deuxième P&R, à partir d'où elle prend le bus ; ce trajet prend 51 minutes. Mais la personne est obligée de passer par ce deuxième P&R le soir, afin de récupérer son véhicule et ainsi le retour dure 63 minutes. Le trajet le plus rapide le soir (50 minutes) est de prendre le bus jusqu'au premier P&R, ce qui n'est pas possible, car la voiture de la personne ne s'y trouve pas. En optimisant le trajet aller-retour, on constate que la personne devrait utiliser le premier P&R, pour une durée totale de déplacement de 102 minutes, que l'on peut comparer aux 114 minutes en utilisant le deuxième P&R.

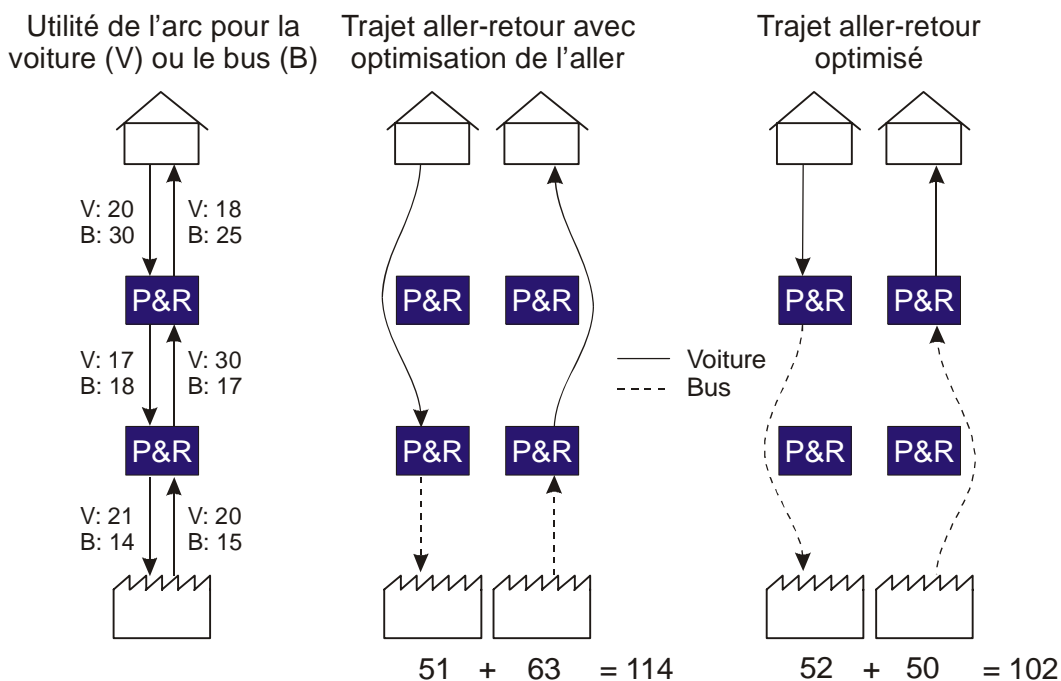


Figure 5 : Comparaison des temps de déplacement pour deux trajets aller-retour

#### 5.4.3 Proposition d'une approche pour le calcul d'un trajet aller-retour multimodal

La problématique des contraintes indiquée ci-dessus est identifiée et connue par les spécialistes, mais son intégration dans un algorithme d'optimisation est loin d'être évidente. Ce chapitre fixe des conditions-cadre pour le développement d'un algorithme qui réponde aux besoins décrits plus haut.

Tout d'abord, quelques hypothèses sont énoncées. Elles ne sont pas encore entièrement développées, mais elles représentent également des sujets de futures recherches. Ensuite, la méthode proposée pour le calcul d'un trajet aller-retour dans un réseau multimodal est expliquée. Le but n'est pas de développer un nouvel algorithme, mais plutôt une approche d'un point de vue de l'ingénieur en transport. Ensuite, les problèmes spécifiques de contraintes introduites dans le calcul de trajets aller-retour dans un réseau multimodal sont présentés. Finalement, les paramètres d'entrée nécessaires sont listés.

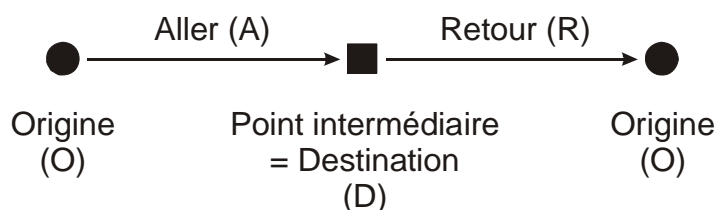
### 5.4.3.1 Hypothèses

La première condition est celle de la disponibilité de données dynamiques et/ou historiques. En effet, en utilisant des données statiques, le trajet de retour aurait la même utilité que celui de l'aller, peu importe le jour ou le moment de la journée, et aucune optimisation ne serait possible. Il s'agit donc d'une condition essentielle, afin que l'approche proposée soit réaliste.

La deuxième condition est la possibilité de pouvoir comparer de manière égale les différents modes de transport.

### 5.4.3.2 Méthode générale

Le trajet complet est modélisé comme un seul parcours comportant des points intermédiaires (Figure 6). Les points intermédiaires permettent de s'y arrêter soit brièvement (p.ex. pour changer de mode) soit pendant une période plus longue (le temps passé au bureau, courses, etc.). La destination (D) du voyageur est ainsi modélisée comme un point intermédiaire, atteinte après le trajet de l'aller (A). Le trajet aller-retour continue avec le trajet de retour jusqu'au point de départ (R).



**Figure 6 : Schéma d'un trajet intermodal aller-retour**

Afin de déterminer la durée de l'escale aux points intermédiaires, les possibilités suivantes doivent être offertes :

- La plus simple est d'indiquer la durée pendant laquelle le voyageur veut rester à sa destination. Ainsi, le temps de départ du retour est fonction de l'arrivée du trajet de l'aller.
- Le voyageur définit son temps de départ pour le trajet de retour, indépendamment de l'arrivée du trajet de l'aller.
- L'heure de retour au point de départ (origine) est la troisième possibilité. De nouveau, aucun lien n'existe avec le temps d'arrivée de l'aller

Bien évidemment, les deux dernières possibilités doivent également être disponibles pour le calcul du trajet de l'aller (temps de départ de O ou temps d'arrivée à D). Les algorithmes courants permettent l'introduction de points intermédiaires, mais il n'est pas possible de définir un temps d'escale.

### 5.4.3.3 Contraintes dues au changement de mode

Dès que le voyageur est conseillé de changer de mode de transport pendant le trajet A, des contraintes supplémentaires peuvent être introduites pour le calcul du trajet R. En laissant un véhicule privé, on s'oblige à passer au même endroit au retour pour récupérer son véhicule. Changer de mode de transport public n'introduit pas une telle contrainte spatiale, mais ceci peut avoir une influence sur le billet nécessaire.

Le tableau suivant montre les contraintes introduites au trajet de retour en changeant d'un mode à l'autre pendant le trajet de l'aller. Les véhicules privés (voiture, vélo, etc.) et les transports publics (chemin de fer, transport urbain, etc.) forment chacun une seule catégorie, car le traitement du problème est le même à l'intérieur de ces catégories.

de	à						
	marche à pied	véhicule privé	transports publics	taxi	car sharing	car pooling	location de véhicule
marche à pied	■	n	n	n	n	n	n
véhicule privé	o	o	o	o	o	o	o
transports publics	n	n	n	n	n	n	n
taxi	n	n	n	■	n	n	n
car sharing	o	o	o	o	■	o	o
car pooling	n	n	n	n	n	■	n
location de véhicule	n	n	n	n	n	n	■

o: avec contrainte  
n: sans contrainte

Figure 7 : Contraintes de mode, introduites par un changement lors du trajet de l'aller

La Figure 8 est un exemple simple pour illustrer le problème de contraintes. Supposons que deux chaînes de transport sont possibles pour le trajet aller-retour. La première passe par le point intermédiaire W1, où un changement de mode avec contrainte est effectué. Ainsi, le retour doit passer par ce même point W1. La deuxième chaîne passe par deux points intermédiaires, mais sans introduire de contrainte. Le retour peut être complété sans contrainte et peut même passer par des points intermédiaires différents.

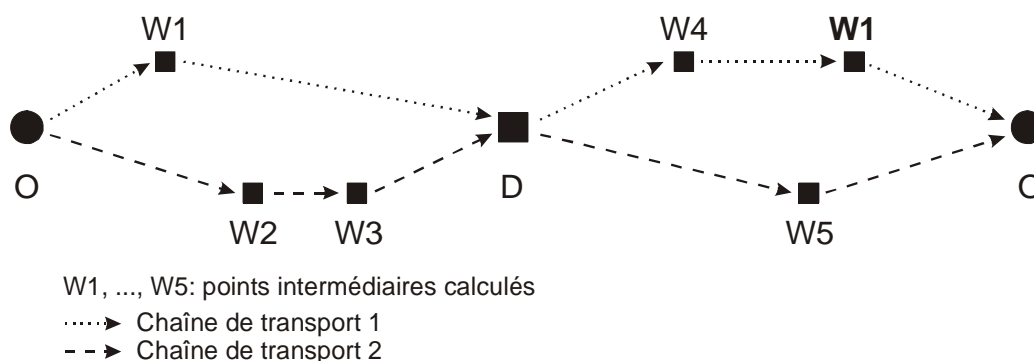


Figure 8 : Deux chaînes de transport multimodales possibles pour un trajet intermodal aller-retour

Il n'est bien évidemment pas possible de changer de mode à n'importe quel nœud du réseau. Une définition exacte des interfaces entre les différents modes est indispensable.

#### **5.4.3.4 Paramètres d'entrée**

Différents paramètres doivent être rentrés par le voyageur. Ceux couramment utilisés sont les adresses de l'origine, de la destination et d'éventuels points intermédiaires, la date du voyage, ainsi que le temps désiré de départ ou d'arrivée. A ceux-ci se rajoute maintenant le temps d'escale au point intermédiaire en utilisant une des trois méthodes décrites plus haut.

Le système doit également savoir à quels points du réseau des véhicules privés sont disponibles, car ils ne se trouvent pas forcément à proximité du logement, surtout dans des zones urbaines. De plus, le trajet ne doit pas forcément débuter à la maison et aucun véhicule privé n'est disponible à proximité. Cette information doit être introduite par chaque utilisateur et peut être stockée dans un profil d'utilisateur, tout en restant modifiable.

La base des données historiques doit être tenue à jour pour représenter une situation actuelle. Ceci peut être fait soit en utilisant des données dynamiques, mesurées en permanence dans le terrain, soit en analysant les réactions des utilisateurs (post-trip).

## **5.5 Définition des besoins**

Il est maintenant possible de dresser une liste des besoins d'un système de navigation dynamique multimodale :

- Modélisation des réseaux à l'aide d'un seul graphe orienté
- Développement de la fonction d'utilité qui tient compte des paramètres essentiels et optionnels, y compris leurs poids de pondération. Ces paramètres sont :
  - Temps de parcours dynamique
  - Coûts variables des déplacements
  - Confort
  - Fiabilité des informations
- Centralisation des données dynamiques dans un centre de calcul, stockage des données et mise à jour continue des profils historiques
- Développement d'un appareil personnel qui sert d'interface entre l'utilisateur et le fournisseur de service

Afin de pouvoir donner les informations nécessaires, les données suivantes doivent être acquises. La suite du rapport traite des méthodes d'acquisition et de traitement de ces données :

- Transports individuels
  - Temps de parcours en temps réel
  - Profil historique des temps de parcours
  - Etat d'exploitation des réseaux
  
- Transports publics
  - Temps de parcours en temps réel
  - Etat d'exploitation des réseaux
  - Type et état des véhicules
  - Taux d'occupation des véhicules

## 6 Données actuellement disponibles en Suisse

### 6.1 Transports individuels

Comparé aux pays voisins, il est indéniable que le niveau de performance des systèmes de récolte dynamique de donnée trafic suisses est plus faible. Ceci s'explique notamment par le fait que la gêne liée aux surcharges de trafic dans nos villes et sur nos autoroutes s'est avérée, jusqu'à présent, plus limitée que dans ces pays. Il faut également reconnaître que les systèmes actuels de récolte de données sont largement insuffisants pour alimenter de manière satisfaisante un SNDM.

#### 6.1.1 Les services d'informations aux automobilistes

Qu'ils soient gérés par les pouvoirs publics, le domaine privé ou une combinaison des deux, les services d'information routière aujourd'hui disponibles en Suisse peuvent être regroupés en trois grandes catégories.

##### 6.1.1.1 *Les services radiodiffusés*

Ce service de diffusion est très populaire car il présente principalement l'avantage de fournir des informations "on-trip" - c'est-à-dire pendant que l'utilisateur effectue son trajet – et sans qu'aucune action particulière de sa part soit nécessaire. Par informations radiodiffusées, on entend généralement des communiqués lus par l'animateur en cours d'émission. Ces communiqués portent quasi uniquement sur des informations de types événementielles (présence d'un bouchon ou d'un accident, route fermée, conditions météo difficiles, etc.) et sont généralement accompagnés d'un jugement d'ordre qualitatif ("fort" ralentissements, "importantes" perturbations, "faible" retard, etc.) dont l'interprétation concrète est laissée au soin de l'utilisateur.

Les informations transmises sous formes de données par les sous-porteuses des fréquences FM sont également à considérer dans cette catégorie. Ce système de transmission, appelé RDS (Radio Data System), permet par exemple d'afficher des messages sur l'écran du récepteur radio. Même si cette possibilité n'est encore que peu utilisée pour l'information trafic, il existe quelques exemples tel que la diffusion du temps nécessaire au franchissement de Glion (A9 entre Vevey et Aigle) qui a été proposée par la Radio Suisse Romande durant les travaux d'entretien du tunnel en 2004 et 2005.

D'un impact beaucoup plus important, le formatage des informations trafic envoyé par RDS selon le format TMC (Traffic Message Channel) permet aux systèmes de navigation embarqués d'interpréter cette information et de la prendre en compte dans son calcul d'itinéraire. Les données trafics ainsi codés décrivent, suivant des normes bien définies, l'emplacement exact de la perturbation ainsi que son type. Il s'agit du seul apport dynamique aujourd'hui disponible pour les systèmes de navigation routier. Il est toutefois important de souligner ici que l'interprétation de données de types événementiels par de tels systèmes est particuliè-

rement délicate. En effet, si un ralentissement sur un des arcs du réseau est signalé au navigateur, ce dernier ne pourra pas déterminer s'il y a lieu de passer par un autre itinéraire s'il ne connaît pas le retard concret engendré par ce ralentissement.

#### **6.1.1.2 Les sites Internet**

Plusieurs sites internet proposent des informations trafics très similaires à celles qui sont radiodiffusées (les sources sont souvent communes) sous forme d'une carte géographique sur laquelle sont répertoriés les différents événements qui perturbent l'écoulement du trafic. Celui du TCS, par exemple, propose une couverture nationale en se concentrant sur les axes principaux du pays.

Il existe également quelques rares sites proposant des informations à un niveau plus locales, généralement l'agglomération urbaine d'une ville. Les sites de la ville de Genève<sup>10</sup> et de Zürich<sup>11</sup> en sont de parfaits exemples. La philosophie de ce genre de site est par contre passablement différente de celle de l'information purement événementielle. Les niveaux de fluidité du trafic (fluide, dense, saturé) sont en effet proposés par l'intermédiaire d'une carte de la région concernée et d'un code de couleur. Il s'agit donc d'une information qualitative dérivant de données quantitatives que sont les débits mesurés sur ces axes.

Si un tel service permet à un usager connaissant bien le réseau en question de choisir l'itinéraire le mieux adapté au regard des conditions du moment (en pre-trip), il ne permet cependant toujours pas d'alimenter de manière satisfaisante un SNDM.

#### **6.1.1.3 Les indicateurs liés à l'infrastructure (PMV)**

Service offert exclusivement pas les pouvoirs publics, l'information aux usagers par l'intermédiaire de panneaux à messages variables (PMV) se veut avant tout localisée. Généralement placé sur les autoroutes, ces PMV informent les usagers de la présence d'événements (accident, bouchon, etc.) sur les quelques kilomètres voire dizaines de kilomètre en aval. Une fois encore, seules des informations de type événementiel ou qualitatif sont habituellement transmises par ce support.

### **6.1.2 Disponibilité des données**

Il n'existe pour l'heure pas de système de récolte de données trafics centralisé en Suisse. Cela explique pourquoi chaque entité politique du pays (Confédération, cantons, voire même villes dans certains cas) gère une partie des données disponibles ainsi que les instruments servant à les mesurer. Seule la société ViaSuisse basée à Bienne s'occupe en partie du rôle de centralisation de l'information (routière et chemins de fer) nationale. Elle est d'ailleurs à la source de la plupart des services radiodiffusés proposés en Suisse.

---

<sup>10</sup> [http://etat.geneve.ch/infomobilite/fr\\_infomobilite.htm](http://etat.geneve.ch/infomobilite/fr_infomobilite.htm)

<sup>11</sup> <http://www.zuerittraffic.ch/>

### **6.1.2.1 Données qualitatives ou événementielles**

Les données événementielles et qualitatives sont généralement obtenues via les services de gendarmeries cantonales qui transmettent à une centrale la nature et l'emplacement de l'événement pour lequel ils sont appelés à intervenir. Elles peuvent également résulter d'observations particulières de la part des véhicules de patrouilles. Hormis la présence de ralentissement (causé ou non par un accident), ils sont les mieux à même de transmettre les décisions qu'ils ont prises pour la gestion d'incident (fermeture de routes, déviations, etc.).

Avec la proportion très importante de possesseur de téléphone portable, l'utilisateur joue aujourd'hui un rôle clé dans la transmission d'information trafics. Comme la gendarmerie, elle peut annoncer la présence de ralentissement ou d'événement particulier. Par contre, et c'est là l'une des difficultés liées à ce mode de récolte, le manque de connaissance du terrain et l'aspect émotionnel pas toujours contrôlé des automobilistes transmettant une information est à l'origine d'importantes imprécisions dans les données fournies (erreur sur l'emplacement de l'événement, exagération de son ampleur et de ses conséquences, etc.).

Il est encore à noter que certaines données de type événementiel peuvent résulter du traitement de données quantitatives brutes. C'est par exemple le cas des systèmes de détection d'incidents qui existent sur les autoroutes périphériques de certaines villes. Ces systèmes se basent sur les valeurs de vitesses, débit et taux d'occupation fournis – majoritairement – par des boucles inductives. Ainsi, la présence d'un accident et de la zone de congestion qu'il implique (événementiel) peut être signalée sans toutefois que l'évolution du temps de parcours du tronçon incriminé (quantitatif) ne soit disponible.

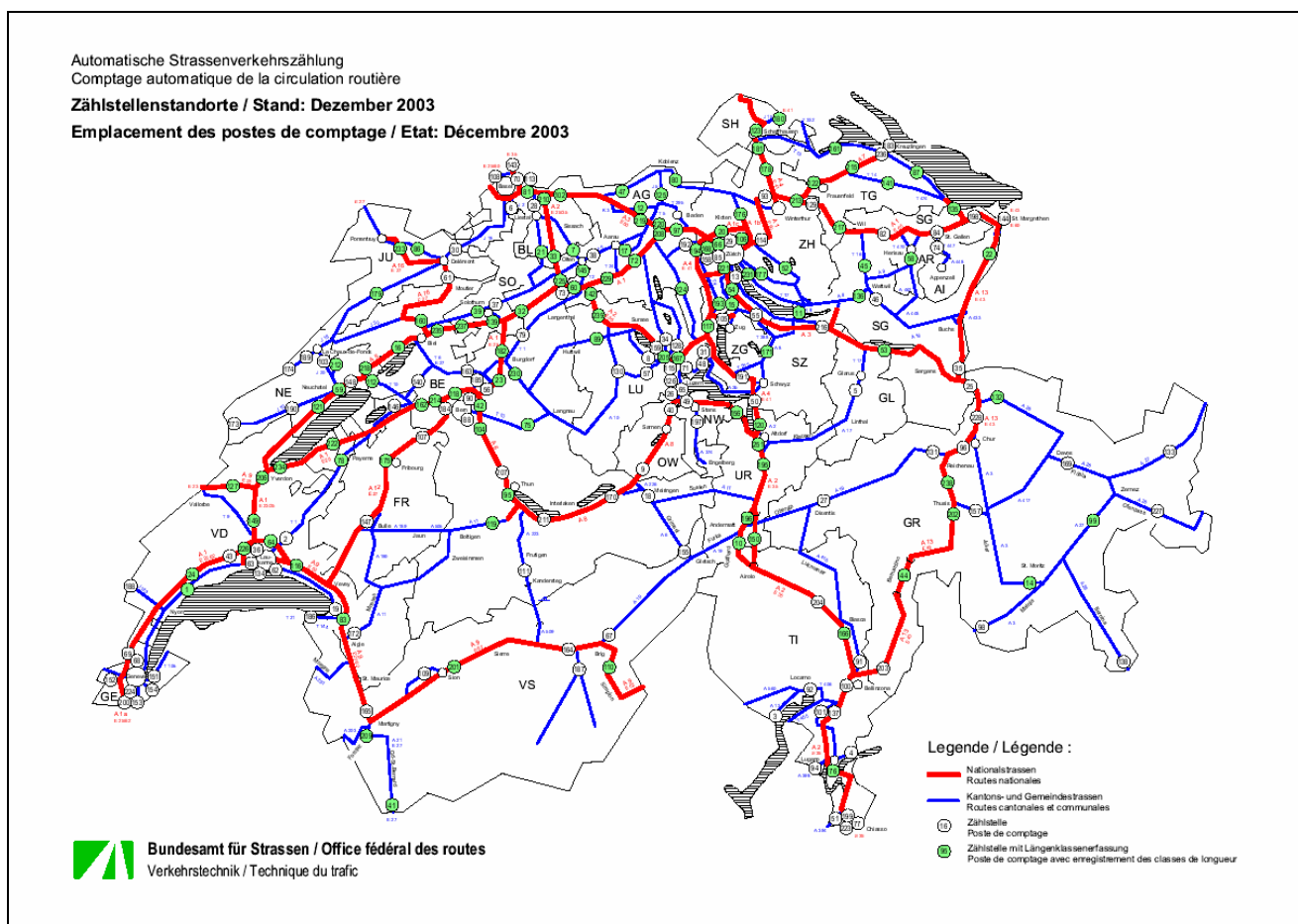
### **6.1.2.2 Données quantitatives**

Comme déjà introduit précédemment, les boucles inductives (regroupées en stations de comptage) sont les outils de mesures de données quantitatives les plus répandus sur notre territoire. Elles permettent la mesure des débits, des taux d'occupation et (dans le cas des doubles boucles) et de la vitesse. Plus de détails quant à leur fonctionnement seront présentés au § 7.1.2.1.

Initialement, la majorité de ces stations de mesures ont été installées (que ce soit par l'OFROU, les cantons ou les villes) dans l'optique de récolter des données à des fins statistiques nécessaires pour la planification des réseaux routiers. Ce n'est que récemment que leur utilisation pour la gestion dynamique du trafic est apparue comme évidente.

Comme expliqué précédemment, chaque entité politique gère son réseau de boucles. Par exemple, la Figure 9 présente l'emplacement de quelques 250 stations gérées par l'OFROU. Parmi elles, 122 sont situées sur des autoroutes ce qui, contenu du fait que la Suisse compte 1450 kilomètres de ce type de routes, représente une densité d'environ une station pour 12 kilomètres. A ces stations, il faut dans certaines zones rajouter celles gérées par les cantons. Ces dernières sont généralement situées sur les autoroutes de contournement des grandes villes dont notamment Genève et Zürich. Sur ces secteurs, des densités d'une station tous les 2 à 3 kilomètres peuvent être atteintes. Les autres stations de comptage se si-

tuent, elles, sur les routes cantonales et communales à haut débit et sur les axes urbains principaux.



**Figure 9 : Emplacements des postes de comptages fédéraux, état décembre 2003 (Source : [www.verkehrsdaten.ch](http://www.verkehrsdaten.ch))**

Hormis ces stations de comptage, il existe également un important nombre de boucle à induction qui servent à fournir des données pour la gestion dynamique des carrefours à feux. Ces boucles, que l'on trouve principalement en milieu urbain transmettent à fréquence élevée la présence ou non de véhicules. Malheureusement, très peu de ces boucles sont utilisées à d'autres fins, les données qu'elles fournissent n'étant que rarement centralisées. Les exceptions sont notamment les villes de Genève et de Zürich qui utilisent les données de ces boucles (en plus des stations de comptage) pour établir leurs cartes de fluidité du trafic (cf. § 6.1.1.2).

Mise à part les boucles inductives, on peut trouver également (sur les autoroutes principalement) des caméras de vidéo dont le rôle peut être l'acquisition de données trafics (cf. § 7.1.2.1) et/ou la détection d'incident.

### 6.1.3 Besoins

Au niveau des transports individuels, le chapitre 5 a clairement mis en évidence que le SNDM nécessite avant tout d'être alimenté en temps de parcours d'arc fréquemment réac-

tualisés. Au vu de l'état des lieux de la récolte de données en Suisse présenté dans ce chapitre, il apparaît évident que de telles informations ne sont actuellement pas disponibles. La présente étude va donc proposer une série de méthodes d'acquisition de temps de parcours qui sont en adéquation avec les particularités du réseau routier Suisse et avec les outils de récolte de données déjà existantes.

La première approche considère l'utilisation des données trafics provenant des différentes boucles de comptages pour l'estimation de temps de parcours. Plusieurs modèles doivent être étudiés et comparés. Ceci permettra, entre autre, de déterminer si la densité des stations de comptage équipant actuellement notre réseau routier est suffisante ou si une augmentation du nombre est indispensable pour obtenir une qualité d'estimation de temps de parcours acceptable.

Dans un deuxième temps, le chapitre 7 va proposer d'autres solutions possibles pour la récolte de ces données, à fortiori si la densité actuelle des détecteurs est jugée insuffisante.

## **6.2 Transports publics**

### **6.2.1 Questionnaire**

Un questionnaire a été envoyé à plusieurs entreprises du domaine des transports publics, afin de connaître leurs expériences et leurs pratiques au niveau de l'acquisition et le traitement de données. Les détails du questionnaire se trouvent en annexe 11.1.

#### **6.2.1.1 Questions posées**

Un des objectifs principaux du travail de recherche est de faire un recensement de données relevées et leur utilisation pour l'information des voyageurs. Il n'y a pas de normes ou de pratiques communes dans ce domaine, ainsi le questionnaire envoyé à quelques exploitants de transports publics donnera une vue générale sur ce sujet. Ce chapitre décrit les questions posées, leur importance et les résultats qui en découlent.

## **Données relevées**

Il est important de connaître le type de données relevées par les exploitants, ainsi que la périodicité avec laquelle cela est fait. La première question est donc la suivante : « Lesquelles des données suivantes sont relevées par votre entreprise ? Veuillez bien indiquer la périodicité avec laquelle vous cela est fait (en temps réel, journaliers, hebdomadaires, mensuels, annuels,...) » Les paramètres à considérer sont :

- Position des véhicules dans le réseau
- Etat technique des véhicules, besoins en réparations
- Maintien de l'horaire, resp. de la cadence
- Temps effectif entre les arrêts
- Temps d'attente aux arrêts
- Distinction du type de véhicule
- Taux d'occupation

Les réponses à cette question donnent un aperçu des données qui sont relevées en Suisse dans le domaine des transports publics. Il s'agit de données de base, nécessaires à notre avis pour pouvoir donner des informations importantes en temps réel aux clients. A partir de ces connaissances il doit être possible de donner des recommandations sur le relevé de données dans le futur.

## **Informations aux clients**

Deux questions sont posées dans cette catégorie. La première, « Quelles informations transmettez-vous à vos clients ? », est très importante pour connaître les pratiques courantes des exploitants dans le domaine de l'information.

Avec la deuxième question de cette catégorie « Avec quels moyens techniques ? », les moyens d'information utilisés sont demandés. Ceci donne une image du développement technique et de la vision actuelle des exploitants.

## **L'avenir de l'information aux clients dans votre entreprise**

Les questions suivantes sont posées par rapport à l'avenir de l'information aux clients :

- « Quelles informations allez-vous donner à vos clients dans l'avenir ? »
- « Avec quels moyens techniques ? »
- « Est-ce que cela vous oblige de relever d'autres données ou de changer la périodicité de mesures ? »

Ceci donne une impression générale de la direction dans laquelle les entreprises se dirigent dans ce domaine, ainsi que des mesures qu'ils pensent nécessaires pour y arriver. Cela donne la possibilité de comparer leur vision avec nos propositions.

## **Amélioration de l'information aux clients**

« Pensez-vous qu'une amélioration de l'information aux clients peut faire augmenter les fréquences ? »

« Quelles améliorations pourraient-elles être bénéfiques au niveau financier ? »

Ces deux questions montrent l'attitude des entreprises envers les bénéfices qui peuvent résulter d'informations de bonne qualité. Il est clair que l'information aux clients est loin d'être gratuite et certains investissements doivent être faits. Il s'agit de déterminer les gains supplémentaires attendus de ces investissements.

### **Information multimodale**

« Pensez-vous que la participation de votre entreprise à une plate-forme d'information multimodale aurait un effet positif sur l'attractivité de vos services (p.ex. en relation avec des parkings-relais, partage de voitures, etc.) ? Le contraire, une diminution de l'attractivité, serait-il possible ? »

« Comment jugeriez-vous l'intérêt des informations suivantes du point de vue du client ? (aucun intérêt, intéressant, indispensable) »

- Temps de parcours actuel (en temps réel)
- Retards
- Temps d'attente jusqu'au prochain véhicule
- Type de véhicule
- Taux d'occupation
- Possibilités de changement de ligne, de correspondances
- Prix

L'on sait par expérience que les entreprises de transports publics sont hésitantes quand il s'agit d'être comparées à d'autres modes de transport, en particulier la voiture, car le temps de parcours ne leur est pas toujours avantageux. Il est important de savoir si les entreprises voient un avantage ou un désavantage à être intégrées dans une plate-forme d'information multimodale. Les mesures nécessaires pour l'établissement d'une telle plate-forme dépendent des réponses données.

### **6.2.1.2 Premiers résultats du questionnaire**

Quatre questionnaires (sur huit) ont été retournés.

Le premier montre une vision modeste pour l'entreprise de transport d'une des grandes villes en Suisse. Elle ne voit que peu d'avantages d'une information en temps réel, si ce n'est l'affichage des minutes à attendre le prochain véhicule d'une certaine ligne et ceci uniquement à des arrêts importants. L'importance des informations d'une plate-forme multimodale est jugée plutôt sans intérêt ou, au maximum, intéressante (retards, temps d'attente, correspondances).

La deuxième réponse est plus précise et montre l'importance qui est donnée à l'information de l'utilisateur, car un client mal informé ne se sent pas à l'aise. Selon l'avis de cette entreprise, les investissements (importantes) dans la récolte et le traitement des données résultent en un service plus performant et plus complet. Une centralisation des données et/ou des informations au niveau national serait souhaitable, mais impossible à réaliser dans les 5 années à venir. Toutes les informations sont jugées au moins intéressantes, voire indispensables (retards, temps d'attente, correspondances, prix).

La troisième réponse vient d'une entreprise du domaine ferroviaire (trafic régional). Elle veut renforcer l'information lors de perturbations de service, en utilisant principalement les outils déjà à disposition. L'information de l'utilisateur est considérée comme élément primordial dans le domaine du service. La participation à une plate-forme multimodale serait sans doute bénéfique pour l'entreprise. Le jugement de l'importance des informations correspond à celle de la deuxième entreprise.

La quatrième réponse est semblable à la deuxième, l'acquisition des données d'exploitation se fait en temps réel. Pour cette entreprise aussi, une centrale de mobilité au niveau régional est imaginable et augmenterait l'attractivité des services.

### **6.2.2 Disponibilité de données**

La plupart des entreprises de transports publics disposent d'un système de gestion de leur flotte, qui indique la position, soit relative, soit exacte de leurs véhicules dans le réseau. Ainsi, les temps de parcours et les éventuels retards sont connus de l'exploitant.

Le taux d'occupation des véhicules n'est recensé que dans des cas très rares. Il y a des véhicules qui sont équipés de senseurs (infrarouge, en général) pour estimer les entrées et sorties. La pertinence de ce genre de mesure est actuellement assez limitée.

### **6.2.3 Besoins**

Plus haut, les besoins en informations relatives au calcul de trajet ont été indiqués. Pour les éléments liés au temps (temps de parcours, retards, temps d'attente), les données en provenance du système d'exploitation sont suffisantes, nécessitant peu de mise en forme. Ces données doivent être disponibles en temps réel, ce qui est le cas pour une grande partie des exploitants importants.

Le confort est plus difficile à mesurer. Les exploitants connaissent en général le type de véhicule qui assure une certaine course. Cette information peut être intéressante pour des personnes à mobilité réduite, afin de trouver un véhicule à plancher bas, par exemple. Ce type de donnée peut également être transmis aux clients.

En ce qui concerne le taux d'occupation des véhicules, ces données sont plus difficiles à mesurer. Deux méthodes sont imaginables, la première recense les entrées et les sorties du véhicule (par capteur infrarouge ou similaire), la deuxième consiste à détecter la présence des clients dans le véhicule (par image vidéo, poids, etc.). Un système de billetterie électronique pourrait également fournir ces données (par les mêmes moyens).

## 7 Méthode proposée pour l'acquisition des données manquantes

### 7.1 Transports individuels

Comme l'a montré le chapitre 6, la disponibilité de mesures automatiques et dynamiques de temps de parcours sur le réseau routier suisse est pour l'instant quasi inexistante. Or, le chapitre 4 a clairement mis en évidence la nécessité de ce type de données pour qu'un système de navigation (qu'il soit multimodal ou non) soit considéré comme dynamique. En effet, les données qualitatives et événementielles récoltées au jour d'aujourd'hui ne permettent pas de disposer de temps de parcours réactualisés des arcs du réseau codés dans la base de données cartographique.

Par conséquent, le présent chapitre propose différentes solutions pour palier à ce manque de données. Il décrit essentiellement deux types d'approche de récolte de temps de parcours qui pourrait raisonnablement être appliquées en Suisse. La première traite des techniques de mesure **indirecte** en listant les différents outils disponibles ainsi que les modèles mathématiques d'estimation de temps de parcours à utiliser ou restant à développer. La mesure de type **directe** fait, elle, l'objet de la seconde approche détaillée par la suite. Il s'agit principalement de la technique des véhicules flottants (ou traceurs), technique plus connue sous sa dénomination anglaise, le Floating Car Data ou FCD. La description de ces deux approches est précédée d'une brève (mais essentielle) mise au point sur le concept de temps de parcours pour les transports individuels.

#### 7.1.1 Définition et concept du temps de parcours

La notion de temps de parcours ne présente aucune difficulté lorsqu'elle se réfère à un seul véhicule. Il est alors défini comme le temps mis par ce véhicule pour relier un point A à un point B. Dans le cas particulier où ces deux points sont les extrémités d'un arc du réseau, il s'agit du temps de parcours d'arc d'un véhicule (Link Travel Time, abrégé LT par la suite). Cette notion devient, par contre, nettement moins triviale lorsqu'elle se réfère à un flux de véhicules.

##### 7.1.1.1 L'approche déterministe

Comme son nom l'indique, l'approche déterministe propose de définir la notion de temps de parcours d'un flux de véhicules par une seule et unique valeur. Il s'agit alors en quelque sorte d'une modélisation ou une simplification du "phénomène" temps de parcours. Pour un véhicule isolé, le temps de parcours peut faire référence à un moment précis dans le temps, soit par exemple, une heure de départ ou d'arrivée. Un flux de véhicule, lui, doit être considéré comme un phénomène continu. Cela implique que la notion temps de parcours doit être liée à une période de temps (et non à un instant donné) durant laquelle ce temps de parcours est considéré comme constant.

L'approche déterministe est donc une agrégation des temps de parcours individuels pas discrétisation temporelle. De manière instinctive, la notion de temps de parcours moyen semble être la plus représentative de la série de mesures individuelles. Par conséquent on définira le temps de parcours moyen d'un point A à un point B par:

$$\bar{T}_{AB,\tau} = \frac{1}{N_\tau} \sum_{n=1}^{N_\tau} T_{AB}^n \quad \text{Equ. 1}$$

où  $N_\tau$  est le nombre de véhicule ayant passé par le point B pendant l'intervalle de temps  $\tau = [t, t+\Delta t]$ ,  $\Delta t$  étant la période d'agrégation (Aggregation Period, abrégée AP par la suite).

C'est l'approche la plus couramment utilisée dans la littérature, A et B pouvant être les extrémités d'un arc du réseau ou celles d'un itinéraire<sup>12</sup> (plusieurs arcs consécutifs). Dans le premier cas, il s'agit du temps de parcours moyen d'arc (Average Link Travel Time, abrégé ALT par la suite). Dans le deuxième cas, il peut y avoir confusion s'il existe plusieurs itinéraires pour rallier les points A et B. Les deux approches (prise en considération ou non de l'itinéraire suivi par les véhicules) ayant chacune leur utilité, il y a donc lieu de les différencier. Ainsi, le temps de parcours moyen d'un itinéraire spécifié p (Average Path Travel Time, abrégé APT par la suite) sera alors défini comme:

$$APT_{p,\tau} = \frac{1}{N_\tau} \sum_{n=1}^{N_\tau} PT_p^n \quad \text{Equ. 2}$$

où  $PT_p^n$  est le temps mis par le véhicule n (faisant partie des  $N_\tau$  véhicules ayant fini de parcourir l'itinéraire p durant la période  $\tau$ ) pour parcourir la totalité des arcs composants l'itinéraire p.

Il est primordial de faire ici la différence entre l'APT et le temps de parcours reconstitué de l'itinéraire p (Built Path Travel Time, abrégé BPT). Ce dernier est l'addition des ALT calculés pour chaque arc composant l'itinéraire p:

$$BPT_{p,\tau} = \sum_{a=a_0}^{a_k} ALT_{a,\tau} \quad \text{avec } p = \{a_0, a_1, \dots, a_k\} \quad \text{Equ. 3}$$

Parmi les différences fondamentales qu'il existe entre ces deux notions, les deux principales sont:

- a) Il se peut que seule une partie des véhicules dont les mesures de LT ont servi au calcul des ALT aient parcouru l'entier de l'itinéraire p.
- b) Le  $PT_p$  d'un véhicule dont le LT de l'arc  $a_j$  est utilisé pour calculer l' $ALT_\tau$  de ce même arc peut n'être utilisé que pour le calcul du  $APT_{p,\tau+i}$ , i étant d'autant plus grand que l' $APT_{p,\tau}$  est plus grand que l'AP.

<sup>12</sup> Par définition, un itinéraire est composé de deux arcs ou plus

Ce deuxième point est illustré par la Figure 10 où les trajectoires de trois véhicules sont représentées dans un diagramme espace-temps (mileage/time). Si l'itinéraire  $p$  est composé des arcs A1, A2 et A3, alors seul le véhicule V3 est pris en compte pour le calcul de l' $APT_{\tau}$ , qui dans ce cas, est égal à  $T$ . Durant cette même période  $\tau$ , un seul véhicule est sorti de chacun des trois arcs ce qui fait que  $ALT_{A1,\tau} = t1$ ,  $ALT_{A2,\tau} = t2$  et  $ALT_{A3,\tau} = t3$ . Finalement  $BPT_{\tau} = t1+t2+t3$  est différent de  $APT_{\tau}$ .

Le BPT est toutefois fréquemment utilisé comme approximation de l'APT car, dans la pratique, la mesure des ALT est nettement plus aisée que celle des APT. L'erreur d'approximation est d'autant plus grande que la variation temporelle des ALT est grande et que l'AP est petite.

Il est à noter que la moyenne n'est pas la seule valeur statistique représentative d'une série de données. La médiane, par exemple, permet de déterminer le temps de parcours pour lequel la moitié des véhicules ayant parcouru un arc ou un itinéraire pendant un intervalle de temps  $\tau$  ont été plus rapides alors que les autres ont été plus lents.

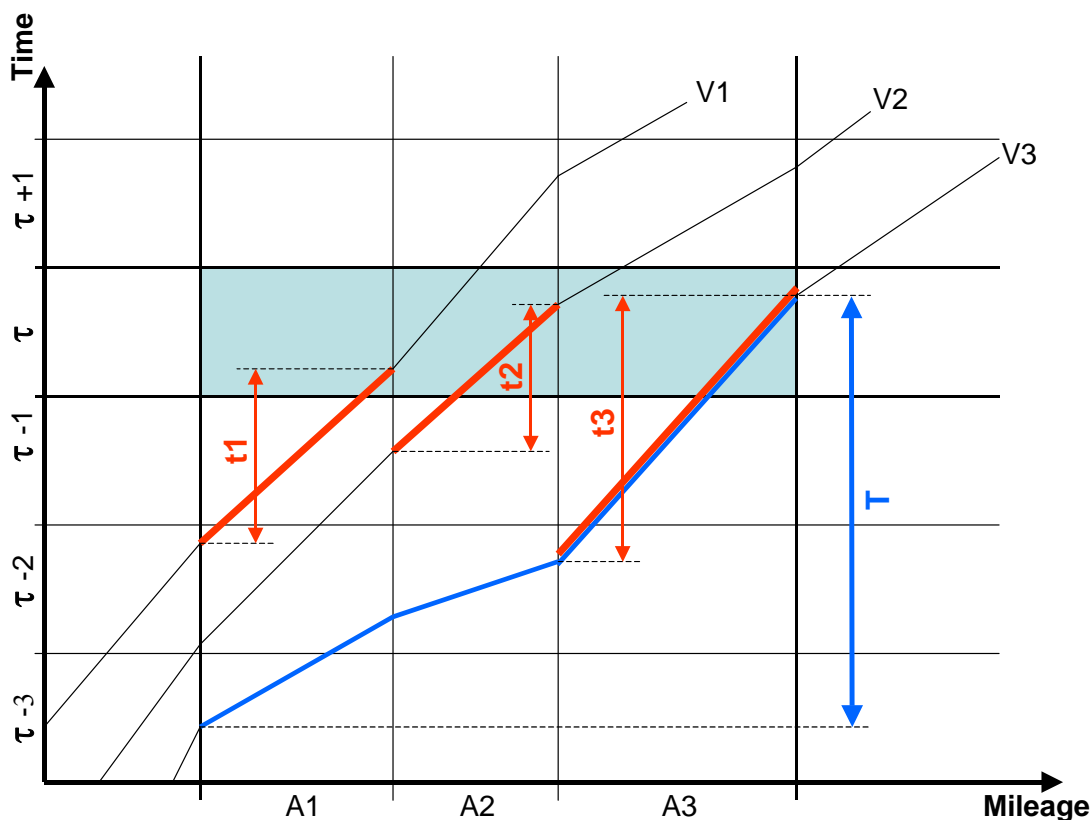
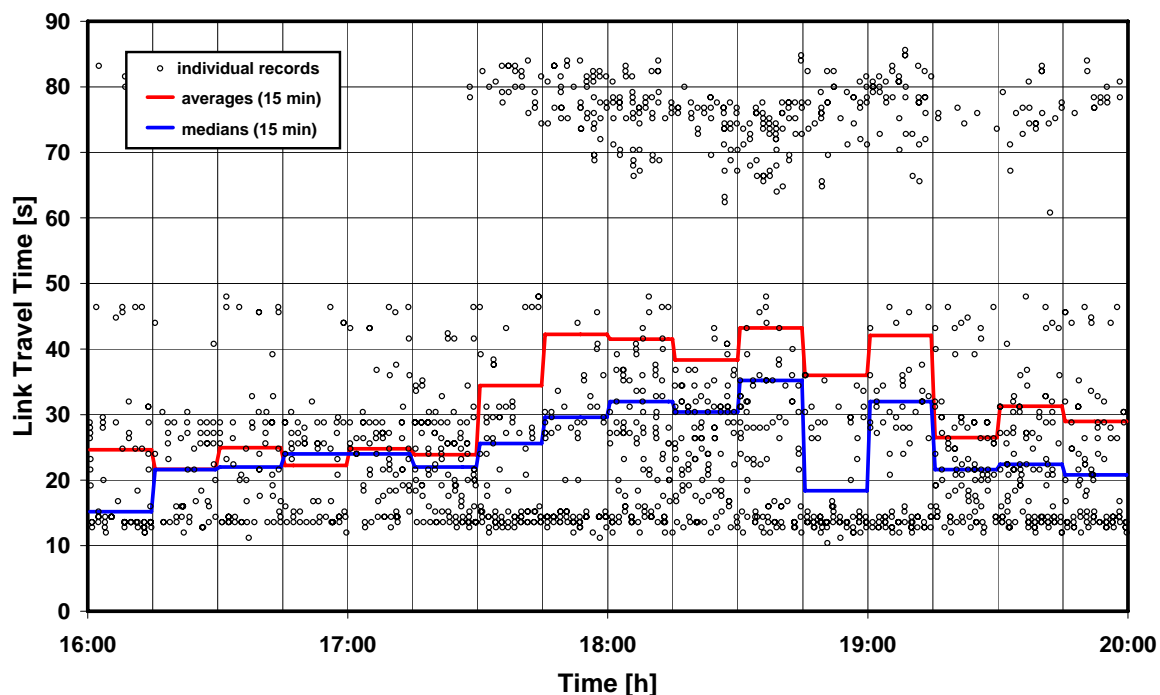


Figure 10 : Différence entre le calcul du BPT (en rouge) et de l'APT (en bleu)

La Figure 11, représentant les mesures individuelles de LT d'un arc du modèle de Lausanne, illustre le processus de discrétisation et d'agrégation expliqué ci-dessus en représentant les temps de parcours par leurs moyennes ou leurs médianes.



**Figure 11 : Agrégation des mesures de LT par moyenne ou médiane sur 15 minutes**

La médiane est une représentation justifiée du phénomène de temps de parcours. Elle possède de plus l'avantage d'être nettement moins sensible (que la moyenne) aux valeurs extrêmes, parfois aberrantes. Par contre, dans le cas particulier d'une distribution bimodale des LT, elle peut se montrer très variable d'une période d'agrégation à l'autre si la répartition de la population de mesures entre les deux modes est équilibrée. La période allant de 18h45 à 19h00 du graphique de la Figure 11 en est un exemple. Si le problème de la bimodalité est soulevé ici, c'est qu'il s'agit d'un cas de figure fréquent pour les arcs se terminant par un carrefour à feux et que l'on retrouve par conséquent pour un réseau urbain. Ce sujet sera traité plus en détail par la suite.

### 7.1.1.2 La particularité des réseaux urbains

La majorité des travaux de recherche réalisés par le passé sur le thème de l'estimation des temps de parcours se sont fondés sur des réseaux de types autoroutier ou VRU (Voies Rapides Urbaines). Ces axes routiers présentent la particularité d'offrir aux automobilistes des conditions de trafic, certes variables, mais non discontinues dans le temps. Si les quelques minutes suivant l'occurrence d'un incident peuvent impliquer une discontinuité marquée dans les conditions de trafic, elles ne concernent qu'une part limitée du quotidien de ce types de routes.

Si deux véhicules ayant un type de conduite similaire (agressivité, vitesse désirée,...) roulent assez proche l'un de l'autre, alors cette continuité temporelle des conditions de trafic impliquera des temps de parcours semblables pour les différents tronçons du réseau. Dans ces conditions, la variance de la population des LT mesurés s'explique principalement par les différences de comportement des usagers.

A l'inverse, les réseaux de type urbain présentent des conditions de trafic discontinues dues à la présence de carrefour à feux. En effet, deux véhicules se suivant de près peuvent enregistrer des temps de parcours d'arc très différents si le premier peut juste passer au vert (voir à l'orange) alors que le second doit s'arrêter au rouge. L'étendue (différence entre les mesures extrêmes) de la population des LT mesurés durant une période d'agrégation est donc proche de la durée de la phase de rouge du feu situé en aval de l'arc. La longueur de ces arcs étant assez courte (comparée à celle d'un réseau autoroutier par exemple), il est fréquent de constater que la moyenne de la population des LT est nettement inférieure à son étendue, impliquant parfois un coefficient de variance (écart type sur moyenne) dépassant les 100%.

	Autoroutier	Urbain à feux
Conditions de trafic	Continue	Discontinue
Longueur des arcs	Longue (de 0.5 à plusieurs km)	Courte (de 10 à 200 mètres)
Coefficient de variance ( $\sigma / \bar{x}$ )	$\ll 100 \%$	= ou $> 100 \%$

**Tableau 6 : Différences entre les particularités des réseaux autoroutiers et urbains**

Hormis les jonctions à feux, les réseaux urbains comportent également des jonctions non contrôlées (avec généralement un axe prioritaire et d'autres secondaires) ou de type rond-point. La distribution des mesures de temps de parcours d'arcs diffère selon le type de ces jonctions.

Ces particularités ont une influence directe sur l'estimation et des temps de parcours, que ce soit par l'intermédiaire de techniques indirectes ou directes.

### 7.1.2 Acquisition indirecte

Comme leur nom l'indique, les techniques d'acquisition de temps de parcours indirectes ne mesure pas à proprement parler ces derniers, mais les déduisent (via un modèle d'estimation) d'autres paramètres de trafic mesurés sur le terrain.

Ces techniques ont pour objectifs d'utiliser les données (débits, vitesses, densités) provenant de stations ponctuelles de mesures réparties sur le réseau pour en déduire les temps de parcours des arcs le composant. La principale difficulté liée à cette approche est évidemment la non connaissance des conditions de trafic entre ces points de mesures.

Ce paragraphe présente, dans un premier temps, les différents outils de mesures ponctuelles pouvant être utilisés avant de présenter en détails les modèles d'estimation de temps de parcours et leurs limites.

#### 7.1.2.1 Les outils de mesure

##### Les boucles inductives (ou électromagnétiques)

La boucle inductive est l'outil de mesure de trafic le plus répandu dans les pays européens et d'Amérique du nord. Il s'agit d'un câble métallique noyé dans la chaussée et formant généralement un rectangle dont la largeur est à peu près équivalente à celle d'une voie de circulation et dont la longueur dépend du type d'utilisation (comptage ou détection). Un courant électrique parcourt cette boucle en permanence. La présence d'une masse métallique au-dessus de la boucle modifie alors le champ électromagnétique permettant ainsi la détection des véhicules.

En Suisse, comme l'a déjà expliqué le § 6.1, ces boucles sont principalement utilisées pour :

- déterminer les charges de trafic journalier ou horaire sur les axes principaux du réseau (aide à la planification)
- détecter la présence de véhicules et mesurer la longueur des files d'attente aux intersections (gestion dynamique des feux).

Le premier cas s'applique principalement aux routes nationales du réseau suisses et aux artères principales des villes. Si leur aptitude à mesurer la vitesse (pour les boucles doubles) et le taux d'occupation est aujourd'hui parfois utilisée pour de la gestion de trafic et plus spécialement pour la détection d'incident, il n'en reste pas moins que l'emplacement sur le réseau et la densité de ces boucles n'ont pas été initialement choisis ni adaptés à cette fin.

Le deuxième cas trouve son application dans les milieux urbains. En suisse, la majorité des carrefours à feux des villes sont en effet équipés d'une gestion dynamique des phases. La détection de la présence des véhicules et des files d'attente, données nécessaires pour le bon fonctionnement de ces systèmes adaptatifs, est effectuée par l'intermédiaire de boucles inductives conventionnelles. La variation des temps de parcours en milieu urbain étant principalement liée à l'évolution des temps d'attente aux feux, l'utilisation de ce type de boucle pour l'estimation des temps de parcours sur les arcs urbains s'avère particulièrement pertinente. De plus, ces boucles étant placées sur chaque voie et présélection, une différenciation des temps de parcours en fonction du mouvement des véhicules dans le carrefour pourraient être réalisés, améliorant par là même la finesse des données obtenues.

Malheureusement, à l'heure actuelle, la majorité de ces boucles ne sont reliées qu'à l'armoire de commande se situant à proximité du carrefour. Cette dernière ne gardant pas longtemps en mémoire les données mesurées (au maximum quelques heures) et – à l'exception de villes comme Genève et Zürich (cf. § 6.1) - n'étant pas connectée à un centre de trafic, ces données ne sont actuellement pas exploitables. Pour cette raison, un effort important devrait être réalisé au niveau des autorités communales et cantonales pour favoriser la centralisation et l'enregistrement de ces données à des fins autres que la gestion dynamique des feux de signalisation.

D'un point de vue technique, la boucle inductive présente un rapport intrinsèque coût/performance très favorable, expliquant par là même sa popularité. Toutefois, il faut prendre en compte les deux éléments importants que sont sa mise en place et son entretien. Etant noyée dans le revêtement, toute opération sur une boucle inductive implique une fermeture plus au moins provisoire de ou des voies concernées. Lorsque les charges de trafic y

sont importantes (ce qui est généralement le cas de l'endroit où l'on désire placer une boucle), cela peut conduire à d'importantes perturbations. Sur le périphérique de certaines grandes villes européennes, les boucles défectueuses ne sont plus remplacées par crainte des répercussions qu'une telle opération pourrait avoir sur l'écoulement du trafic.

### Senseurs ultrason

Il s'agit d'un émetteur-récepteur d'ondes ultrasons placé à environ 5 mètres du sol et mesurant le temps que met une onde envoyée en direction de la chaussée pour revenir après réflexion sur un obstacle. Si ce temps est plus court que celui de référence (aller et retour émetteur-récepteur – chaussée), la présence d'un véhicule est détectée. Le principe de mesure est donc similaire à celui de la boucle inductive mais avec un outil situé au-dessus du trafic et non en dessous. L'avantage principal d'un tel outil réside dans les faibles répercussions qu'entraînent son installation et son entretien sur l'écoulement du trafic. Aucune intervention directe n'étant réalisée sur la chaussée, la durée de ces opérations s'en voit nettement diminuée. Dans certaines situations, la gêne du trafic est même nulle. C'est en effet le cas si un autre accès à l'appareil de mesure existe comme par exemple un passage supérieur sur lequel est fixé l'émetteur-récepteur.

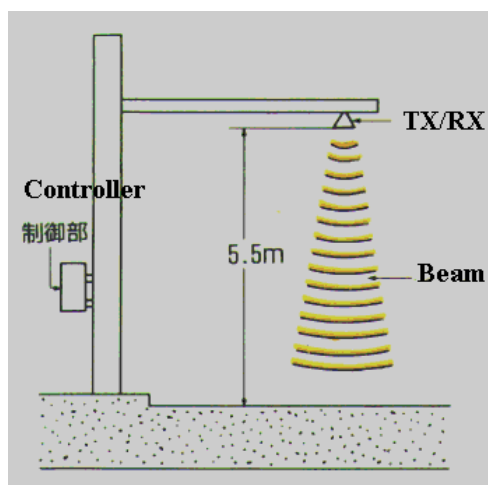


Figure 12 : Schéma d'un senseur ultrason

Particulièrement utilisés au Japon et dans certaines villes des Etats-Unis, les senseurs ultrasons peuvent donc, comme les boucles inductives, mesurer le débit et le taux d'occupation. La vitesse, elle, nécessite également deux émetteurs-récepteurs (équivalent de la double boucle).

Ce type d'outil présente toutefois deux défauts. Le premier est d'ordre esthétique. En effet, la présence de mâts console (éléments de fixation des émetteurs-récepteurs) sur les côtés de la route peut être considérée comme une dégradation du paysage (urbain ou non). Sur ce point, il faut toutefois noter que de nombreux éléments se situant au-dessus des routes sont déjà existants et pourrait servir de support pour ce type d'outil. Il s'agit, par exemple, de ponts (notamment sur les autoroutes), de portiques pour panneaux indicateurs ou encore de candélabres. Il est à noter toutefois que les émetteur-récepteurs ne peuvent être placés directement sous un pont car la réflexion des ondes sous le tablier perturberait les mesures.

Le deuxième inconvénient est d'ordre technique. Contrairement aux boucles inductives, les senseurs ultrasons ne peuvent mesurer la présence de véhicules que pour une zone restreinte de la chaussée. Il n'est donc pas possible de couvrir de longues zones comme le font les boucles allongées présentes à l'approche des carrefours à feux. Pour palier à ce désavantage, les pays utilisant ce genre d'instrument équipent généralement les sections ce type de route de plusieurs senseurs consécutifs. Le premier est situé juste avant la ligne d'arrêt puis les autres, à espace régulier, en amont. Cette technique permet de maîtriser de manière approximative l'évolution des files d'attente.

En conclusion, ce genre d'outil pourrait s'avérer idéal pour augmenter la densité de points de mesure sur les autoroutes (urbaine et interurbaines) et pourrait être utilisé comme sources d'informations complémentaires aux boucles inductives pour les réseaux urbains.

### **Détecteurs infrarouges**

Les détecteurs infrarouges sont de deux types: les passifs et les actifs. Les premiers fonctionnent de manière similaire aux détecteurs à ultrason décrits précédemment. Placé également au-dessus du trafic, ces appareils mesurent évidemment le flux et le taux d'occupation mais en plus, et c'est là réside leur avantage, ils sont capables de mesurer avec une précision raisonnable la vitesse du flux. Pour être plus exact, l'estimation de la vitesse agrégée (sur 2 ou 5 minutes par exemple) est assez précise alors que les mesures individuelles (véhicule par véhicule) sont plus imprécises. Ainsi, suivant la précision souhaitée un seul appareil peut être suffisant pour mesurer les trois valeurs.

Les détecteurs actifs, en plus des propriétés décrites ci-dessus, permettent l'établissement d'une communication bidirectionnelle à haut débit entre les véhicules et le centre de gestion du trafic. Evidemment, les véhicules en questions doivent être équipés d'un émetteur-récepteur. La Figure 13 présente les zones dans lesquelles doivent se trouver les véhicules pour qu'une communication soit établie. Plus onéreux que les premiers, ce type de détecteur infrarouge offre toutefois un excellent moyen pour transférer des données à des SNDM embarqués à bord du véhicule. C'est tout de moins l'une des options qui a été choisie pour le Japon dans le cadre de son service de navigation dynamique appelé VICS: La communication montante, quant à elle, peut être utilisée pour des mesures de temps de parcours directes. En effet, la reconnaissance d'un même identifiant (envoyé par le véhicule au début de la transmission) à plusieurs points du réseau (là où se trouvent les détecteurs) permet de connaître le temps mis par un véhicule pour les rallier.

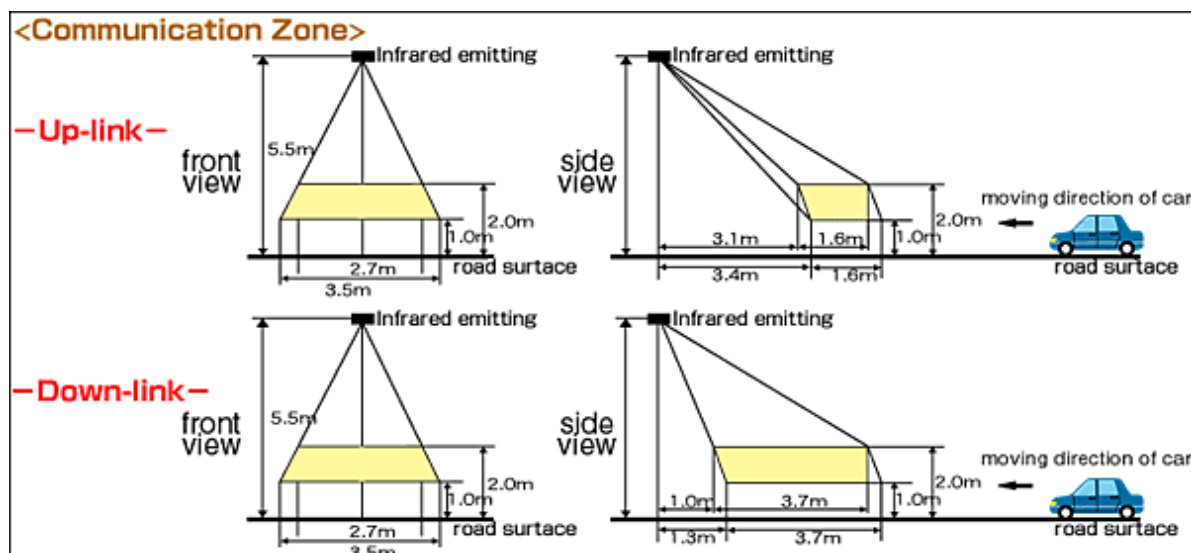


Figure 13 : Zones de communications entre les véhicules et le détecteur infrarouge

### Caméra vidéo

L'utilisation d'images vidéo dans le but de mesurer des données trafic est une technique plus courante sous nos latitudes. Dans ce cas, des portions d'image appelées "fenêtres" sont définies et représente l'équivalent de boucles d'induction. Avec ces dernières, les véhicules sont détectés par le changement du niveau de tension électrique. Avec une caméra vidéo, ils le sont par le changement du niveau de gris moyen dans la fenêtre (un véhicule étant en général plus clair ou plus foncé que la chaussée). On peut donc utiliser cette approche pour mesurer le débit, le taux d'occupation ainsi que la vitesse.

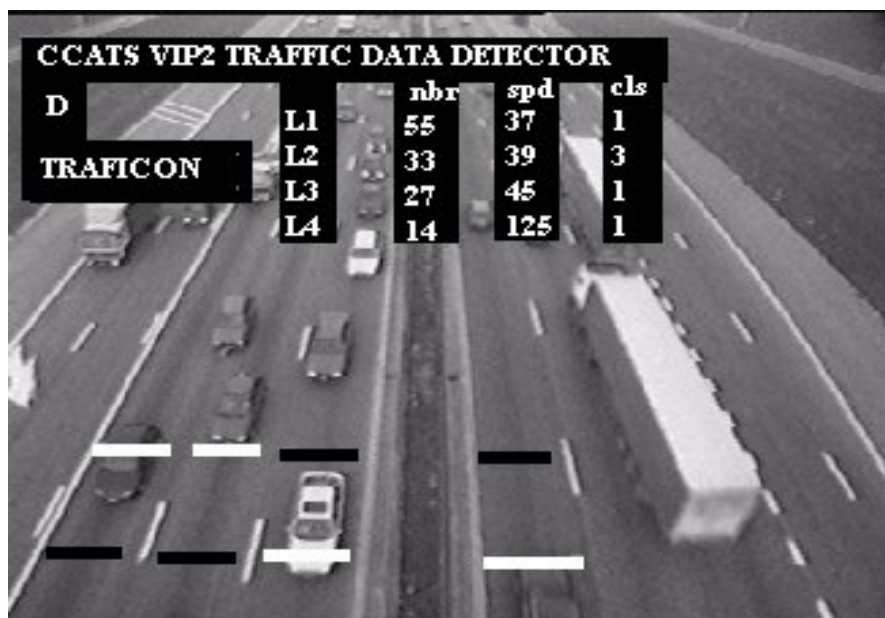


Figure 14 : Exemple de définition de "fenêtre" de mesure sur une image vidéo du trafic

Un des grands avantages de cette technique est, qu'en plus des données brutes de trafic qu'elle permet d'obtenir, elle offre la possibilité aux gestionnaires de réseau d'avoir un

contrôle visuel du tronçon filmé. Certaines situations de trafic difficilement identifiables par les seules mesures ponctuelles de vitesse et débit peuvent ainsi être détectées. Il faut toutefois signaler qu'il existe une certaine incompatibilité entre ces deux utilisations des images vidéo qui empêche souvent de les appliquer conjointement. Le contrôle visuel de la route demanderait, en effet, un angle d'orientation de la caméra proche de l'horizontale (pour une capter le champ de vision le plus large possible) contrairement à la mesure de données trafic qui nécessiterait un angle beaucoup plus vertical.

En plus du coût d'investissement important, le principal obstacle à l'utilisation de ce type d'outil est qu'il nécessite un réseau de communication à haut débit (fibre optique) pour transmettre les images à fréquence adéquate au centre de trafic. Il serait certes possible de ne transmettre que les données mesurées directement par la caméra (ce qui impliquerait un traitement d'image local), mais l'atout principal de la caméra vidéo, c'est à dire la possibilité d'observer visuellement l'évolution du trafic, serait supprimé.

### 7.1.2.2 Les modèles mathématiques d'estimation de temps de parcours

#### Réseaux autoroutiers

Dans la pratique, c'est sur ce type de routes que les techniques d'acquisition de temps de parcours indirecte se sont montrées à ce jour les plus performantes. La plupart des grandes villes européennes ont d'ailleurs équipé leurs autoroutes d'un tel système en se reposant notamment sur un réseau de détecteurs très dense.

D'un point de vue mathématique, les modèles d'estimation de temps de parcours existant peuvent être regroupés en deux groupes principaux basés sur la vitesse et sur les débits. Voyons ci-après le modèle basé sur la vitesse.

#### Modèles basés sur la vitesse

L'idée de base de ces modèles est de découper le réseau autoroutier en autant de sections qu'il possède de détecteurs (ou plus précisément de stations de mesure). Chacune de ces sections  $S_i$  débute au point se trouvant à équidistance des détecteurs  $D_i$  et  $D_{i-1}$  et se termine au point situé à équidistance des détecteurs  $D_i$  et  $D_{i+1}$ , comme le montre la Figure 15.

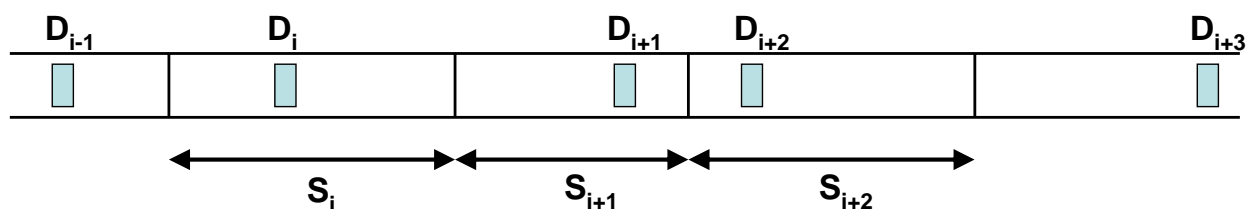


Figure 15 : Découpage de l'autoroute en sections suivant l'emplacement des détecteurs

L'hypothèse d'une vitesse homogène sur l'ensemble de la section  $S_i$  est alors admise, cette dernière étant égale à la vitesse moyenne  $V_i$  mesurée par le détecteur  $D_i$  durant une période d'agrégation  $\Delta t$ . Ainsi, le temps de parcours  $T(S_i)$  de la section  $S_i$  (dont la longueur est  $L_i$ ) se calcul de la manière suivante :

$$T(S_i) = \frac{L_i}{V_i} \quad \text{Equ. 4}$$

Si cette technique semble relativement primaire, elle offre une estimation des temps de parcours raisonnable à condition toutefois que la période d'agrégation soit assez courte (quelques minutes) et surtout que les détecteurs soient très proches l'un de l'autre (pas plus de 500 à 1000 mètres d'espacement).

Néanmoins, elle présente deux défauts majeurs. Tout d'abord, la précision d'estimation est d'autant plus mauvaise que l'itinéraire dont on cherche à déterminer le temps de parcours est long. En effet, les temps de parcours des sections sont tous mesurés simultanément et leur somme le long de l'itinéraire ne correspond pas à un cas réaliste puisque les conditions de trafic évoluent pendant qu'un véhicule parcourt ce trajet. Ensuite, le découpage en sections tel que défini à la Figure 15 ne correspond pas avec celui de la base de données cartographiques utilisée par un SNDM. Une transformation serait alors nécessaire avec les incertitudes supplémentaires que cela entraînerait.

Conscient de ces limites, plusieurs auteurs ont proposé des variantes plus sophistiquées de cette approche. Parmi elles, on retiendra notamment les travaux proposés par Cortés et al. [50]. Ces derniers suggèrent, dans un premier temps, de considérer la vitesse moyenne d'un véhicule  $U_{12}$  sur le tronçon allant du détecteur  $D_1$  au détecteur  $D_2$  comme étant une moyenne pondérée des vitesses moyennes mesurées par ces deux détecteurs :

$$U_{12}(t_1) = \alpha V_1(t_1) + (1 - \alpha) V_2(t_1 + t_{12}) \quad \text{Equ. 5}$$

On notera que si  $t_1$  est l'heure de passage du véhicule sur la première boucle, la vitesse moyenne  $V_1(t_1)$  est mesurée sur l'intervalle  $[t_1 - \Delta t, t_1]$  et surtout que la vitesse moyenne  $V_2(t_1 + t_{12})$  est elle mesurée sur l'intervalle  $[t_1 + t_{12} - \Delta t, t_1 + t_{12}]$  où  $t_{12}$  est le temps mis par le véhicule pour passer d'un détecteur à l'autre. Le paramètre  $\alpha$  pourrait être fixé à 0.5, mais les auteurs conseillent plutôt une valeur entre 0.55 et 0.6.

On en déduit alors logiquement que :

$$t_{12} = \frac{L_{12}}{\alpha V_1(t_1) + (1 - \alpha) V_2(t_1 + t_{12})} \quad \text{Equ. 6}$$

où  $L_{12}$  est la distance entre les deux boucles. Le temps de parcours  $t_{12}$  se retrouve alors des deux côtés de l'équation et un algorithme itératif est alors utilisé pour la résolution du problème.

Une généralisation de cette approche pour le calcul du temps de parcours des arcs telles qu'utilisés par le SNDM est ensuite proposée.

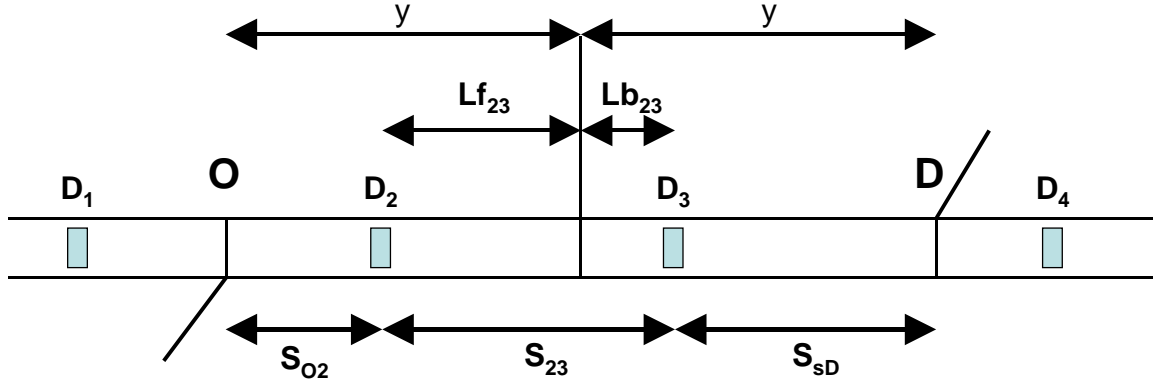


Figure 16: Décomposition d'un arc du réseau en fonction de l'emplacement des détecteurs

$$t_{O2} = \frac{L_{O2}}{U_{O2} \left[ V_1 \left( t_0 + \frac{\Delta t}{2} - t_{f23} - t_{O2} \right), V_2 \left( t_0 + \frac{\Delta t}{2} - t_{f23} \right) \right]} \quad \text{Equ. 7}$$

$$t_{f23} = \frac{L_{f23}}{U_{23} \left[ V_2 \left( t_0 + \frac{\Delta t}{2} - t_{f23} \right), V_3 \left( t_0 + \frac{\Delta t}{2} \right) \right]} \quad \text{Equ. 8}$$

$$t_{b23} = \frac{L_{b23}}{U_{23} \left[ V_2 \left( t_0 + \frac{\Delta t}{2} \right), V_3 \left( t_0 + \frac{\Delta t}{2} + t_{b23} \right) \right]} \quad \text{Equ. 9}$$

$$t_{3D} = \frac{L_{3D}}{U_{34} \left[ V_3 \left( t_0 + \frac{\Delta t}{2} + t_{b23} \right), V_4 \left( t_0 + \frac{\Delta t}{2} + t_{b23} + t_{3D} \right) \right]} \quad \text{Equ. 10}$$

### 7.1.2.3 Synthèse et recommandations

#### 7.1.3 Acquisition directe par FCD

Dans son approche habituelle, cette technique consiste à rapprocher le temps de parcours calculé sur la base des mesures enregistrées par la totalité des véhicules ayant parcourus

un arc (ou un itinéraire) en n'utilisant que les mesures enregistrées par une partie limitée de ces véhicules (les véhicules flottants). Il s'agit donc d'approcher un paramètre représentatif (moyenne, médiane,...) de la population à l'aide d'un échantillon.

Selon cette approche déterministe et en utilisant l'ALT comme valeur représentative, la technique du FCD cherche alors à approcher la moyenne de la population des  $N_{a,\tau}$  mesures de temps de parcours de l'arc  $a$  par celle de l'échantillon des  $F_{a,\tau}$  véhicules flottants (Estimated Link Travel Time, abrégé ELT par la suite) :

$$ALT_{a,\tau} = \frac{1}{N_{a,\tau}} \sum_{n=1}^{N_{a,\tau}} LT_a^n \quad \text{Equ. 11}$$

$$ELT_{a,\tau} = \frac{1}{F_{a,\tau}} \sum_{f=1}^{F_{a,\tau}} LT_a^f \quad \text{avec } F_{a,\tau} \leq N_{a,\tau} \quad \text{et } E_{a,\tau} = \frac{F_{a,\tau}}{N_{a,\tau}} \quad \text{Equ. 12}$$

Il s'agit de l'approche la plus couramment utilisée. La proportion de véhicule flottant  $E_{a,\tau}$  est variable d'un arc à l'autre et d'une période à l'autre, même si le taux d'équipement<sup>13</sup> est fixe.

L'erreur d'estimation  $\varepsilon_{a,\tau}$  est alors définie comme étant la différence entre la valeur estimée et la valeur ciblée :

$$ALT_{a,\tau} = ELT_{a,\tau} + \varepsilon_{a,\tau} \quad \text{Equ. 13}$$

La forme de la distribution statistique de la population influence de manière évidente l'amplitude de cette erreur. En effet, pour une population de taille fixe et une proportion fixe de véhicules flottants, l'erreur d'estimation sera d'autant plus importante que la variance de la population l'est. Pour être rigoureux, il faudrait plutôt parler d'erreur moyenne car, en admettant que les  $F_{a,\tau}$  véhicules flottants soient tirés au sort parmi les  $N_{a,\tau}$  véhicules de la population, chaque tirage au sort implique une moyenne de l'échantillon différente, donc une erreur différente.

Comme souligné au § 7.1.1.2, les réseaux urbains présentent justement la particularité d'avoir des populations de LT à variance élevée. On peut donc s'attendre à une approximation moins performante pour ce type de réseau (comparé aux réseaux autoroutiers) ou, autrement dit, à avoir besoin d'une proportion de véhicules flottants plus élevée pour atteindre une qualité d'approximation similaire.

La diminution de la variance de la population des LT est un des moyens d'améliorer la qualité de l'estimation de temps de parcours par FCD. Il est évident que le trafic observé ne peut être influencé par l'application de cette technique de mesure et seule la modification des limites spatiales et temporelles de la population permet d'obtenir cette réduction de variance. Concrètement, il s'agit d'étudier:

<sup>13</sup> Voir le § 7.1.3.2 pour la définition du taux d'équipement

la durée de la période d'agrégation

la définition d'un arc du réseau

Ces deux éléments jouent un rôle principal dans le processus d'estimation et feront chacun l'objet d'un paragraphe détaillé.

En conclusion, il est nécessaire de mettre en évidence l'avantage de l'utilisation de la simulation en comparaison à des études pratiques. En effet, si la simulation permet d'obtenir les mesures de véhicules flottant et de ceux du reste de la population, les applications de terrain ne fournissent que celles des véhicules flottants<sup>14</sup>. Cet avantage permet de réaliser une analyse paramétrique se basant sur des indicateurs de performance pertinents.

### **7.1.3.1 Etat de la recherche**

Si les projets reposant sur des applications pratiques (voir § 3.1) ont démontré la faisabilité technique des systèmes ATIS (Advanced Traveller Information Systems) et en particulier ceux basés sur les FCD, ils n'ont généralement pas permis de juger les gains réels des usagers et les impacts sur la répartition des flux si un tel système venait à être appliqué à grande échelle. Cela s'explique principalement par le nombre trop limité des véhicules engagés pour ces tests, comme l'admettent la majorité des auteurs de ces études. Une flotte de véhicules FCD trop petite ne permet, en effet, pas d'offrir des informations trafic en temps réel satisfaisantes. Les questions du nombre minimum de véhicules à équiper et celle des techniques pour filtrer et analyser les données qu'ils envoient sont donc rapidement devenus un axe de recherche prioritaire.

Deux méthodes principales d'acquisition de données sont possibles. Dans la première, les mesures obtenues par le système FCD sont les positions des véhicules régulièrement transmises (par exemple toutes les trois minutes à Paris [14]). Les temps de parcours pour chaque arc du réseau routier sont alors déduits - au centre de trafic - à partir de la position des véhicules sur une carte digitale et par l'intermédiaire d'un algorithme assez élaboré. La deuxième méthode consiste à équiper chaque véhicule d'une base de données cartographique. Les véhicules peuvent ainsi directement enregistrer les temps de parcours entre les points clés du réseau (carrefours, changement du nombre de voies, sorties, etc.) mentionnés dans la base de données.

---

<sup>14</sup> Dans certains cas, quelques informations d'un nombre limité de véhicules non équipés sont utilisées à titre de comparaison

Les mesures obtenues avec la seconde méthode sont généralement plus précises et les calculs réalisés au centre de gestion sont nettement moins importants. Toutefois, l'équipement de tous les véhicules d'une base de données cartographique et d'un ordinateur de bord plus sophistiqué représente un investissement très important. Le coût global de transmission des données peut lui aussi être très élevé.

Le problème du nombre de véhicules nécessaires pour une acquisition de données par FCD peut se résumer à deux questions :

- Dans quelle mesure les temps de parcours des véhicules équipés (échantillon) reflètent-ils les temps de parcours de la totalité du trafic (population) ?
- Quelle est la précision pouvant être jugée comme suffisante pour un ATIS ou, plus spécifiquement, un SNDM ?

Plusieurs modèles statistiques différents ont été proposés pour répondre à ces questions. Van Aerde et al. [13] ont développé une expression analytique pour déterminer la fiabilité des temps de parcours mesurés par FCD. Cette expression, basée sur l'hypothèse que les mesures n'avaient aucun lien statistique entre elles, montre que plus le pourcentage de véhicules FCD dans le trafic augmente, plus la moyenne de l'échantillon approche celle de la population. D'autres chercheurs se sont également basés sur cette hypothèse pour calculer le degré de pénétration du marché nécessaire [3, 51, 52]. A l'inverse, en analysant les données obtenues par FCD dans le cadre du projet ADVANCE, Sen et al. [53, 54] démontrent que les mesures d'un échantillon ne sont pas indépendantes. Si leurs travaux les mènent également à la conclusion qu'à partir d'un certain pourcentage de véhicules équipés la moyenne de l'échantillon se stabilise, celle-ci ne coïncide pas forcément avec celle de la population.

L'apparente contradiction entre ces deux travaux a été analysée par Hellinga et Fu [55]. D'après leur étude, les deux approches sont justifiées, mais chaque hypothèse est applicable pour un type de trafic et d'échantillonnage différent et aucune ne peut être généralisée. Elle met également en évidence la nécessité de subdiviser la population des véhicules en neuf sous-populations différentes en fonction de leur origine et de leur destination avant et après leur passage sur un segment. Pour un réseau quadrillé, les véhicules peuvent venir et repartir de la gauche, de la droite ou d'en face. Donc, si la proportion de véhicules équipés est différente pour chacune des sous-populations, la moyenne de l'échantillon ne peut pas coïncider avec celle de la population. Si l'idée de distinguer des véhicules selon leur destination semble justifiée (en particulier pour un réseau urbain où la longueur des files d'attente dépend de la destination), celle de différencier selon leur origine semble plus discutable.

A la lecture de certaines autres études réalisées sur ce thème [21, 56-58], il est évident qu'un taux idéal de véhicules équipés ne peut être défini pour toutes les situations et pour tous les types de réseau. En effet, les paramètres propres à chaque application comme la fréquence avec laquelle les données sont transmises au centre de gestion, la longueur et la structure des segments d'un réseau ont une trop grande influence pour permettre de déterminer une valeur globale représentative. Cette conclusion est toujours d'actualité comme le prouvent les recommandations éditées récemment par le FHWA dans son très complet "Tra-

vel Time Collection Handbook". Toutefois, selon les situations, ce taux idéal est fréquemment situé entre 3 et 7%.

### **7.1.3.2 Les améliorations possibles**

#### **Le taux d'équipement**

Le taux d'équipement (Equipment Ratio, abrégé ER par la suite) est évidemment le paramètre principal de la technique d'estimation de temps de parcours par FCD. Les "on board unit" (OBU) étant chers à l'achat, l'objectif de cette technique doit être d'obtenir le niveau de performance souhaité (selon l'application) tout en minimisant le taux d'équipement.

Il s'agit donc de déterminer quel ER minimum permettrait de disposer de temps de parcours dynamiques assez fiables pour que le service de navigation dynamique offert aux possesseurs d'un SNDM soit jugé comme "acceptable" par ces derniers. Cette étude ne se fixe pas comme objectif de déterminer cet ER minimum car il nécessiterait de définir ce qu'est un niveau de service "acceptable", un paramètre hautement subjectif. C'est pourquoi, seule la relation entre l'ER et les gains – temporels notamment - espérés sera établie, le seuil d'acceptabilité par l'utilisateur pouvant, à lui seul, faire l'objet d'une étude complémentaire.

La notion de taux d'équipement nécessite d'être clarifiée car elle n'est pas univoque. D'ailleurs, sa définition varie d'une publication à l'autre. Si cette notion se limitait uniquement à son aspect matériel, le taux d'équipement devrait être considéré comme le rapport entre le nombre de véhicules étant équipés d'un OBU et le nombre total de véhicules dont les propriétaires habitent dans une zone déterminée. Il s'agit dans ce cas d'une considération plutôt technique voire économique (comme pourrait l'être le taux d'équipement d'ABS ou de boîte à vitesse manuelle). Toutefois, cette approche ne permet pas de déterminer le pourcentage de véhicules équipés circulant à un moment précis sur une zone définie du réseau routier, qui est le paramètre nécessaire pour déterminer la performance de l'estimation de temps de parcours par FCD.

De ce fait, le taux d'équipement est défini dans le cadre de cette étude de la manière suivante: il s'agit de la proportion de véhicules générés à un point d'entrée du réseau modélisé dont les mesures de LT seront utilisées pour l'estimation des temps de parcours. Ainsi pour chaque véhicule entrant dans le réseau par une origine, un tirage au sort est effectué pour choisir les véhicules considérés comme véhicules flottants, lesquels sont équipés d'un OBU. L'ER, exprimé dans cette étude en pour mille, est alors la probabilité d'être sélectionné.

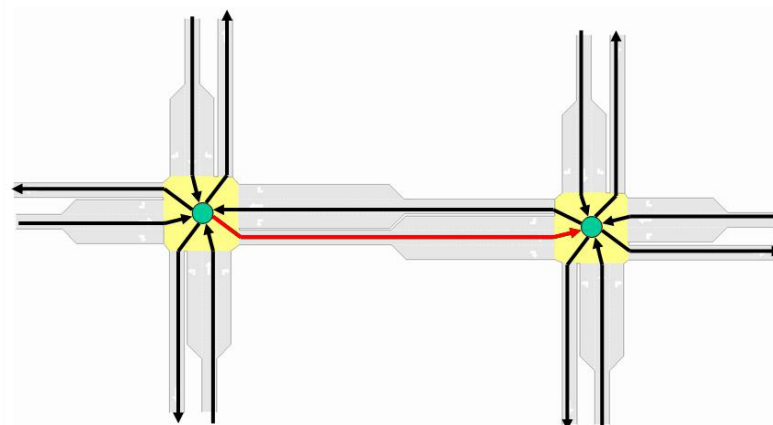
Cette sélection étant aléatoire, il s'agit d'un processus stochastique qui engendrera des résultats différents, même si deux simulations (run) d'ailleurs totalement identiques sont effectuées. Cette particularité devra être prise en compte lors du traitement des résultats.

Enfin, il faut noter que, par sa définition même, l'ER n'est pas toujours égal aux valeurs  $E_{p,\tau}$  et  $E_{a,\tau}$  définies plus haut. Cela explique pourquoi seule une approche au niveau du réseau modélisé permet de lier correctement le paramètre ER à un quelconque indicateur de performance.

Cette étude ne pouvant avoir une approche analytique, une série de valeurs représentatives de l'ER ont été retenues pour l'analyse paramétrique, soit : 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500 et 1000 ‰

### La définition des arcs

La manière coutumière de modéliser un réseau routier est de représenter les intersections par des nœuds et les routes par des arcs (un par sens de trafic) reliant ces nœuds entre eux. La Figure 17 illustre ce genre de modélisation pour une partie de réseau comprenant deux intersections à quatre branches: deux arcs relient les deux nœuds, un par sens de circulation.



**Figure 17 : Représentation classique des arcs et nœuds**

La Figure 18 (mêmes données que pour la Figure 11) est un exemple d'enregistrement de LT mesurés sur un arc reliant deux carrefours à feux du modèle de Lausanne. Les données de tous les véhicules (population) mesurées sur une période de quatre heures y figurent. La variabilité importante de cette population (l'écart type moyen est de 22 secondes) est caractéristique d'un arc de réseau urbain, particulièrement d'un arc aboutissant sur un carrefour à feu. Le coefficient de variance moyen (calculé sur la base des 16 périodes de 15 minutes) est de 0.71.

Cette variance peut s'expliquer en partie par le fait que les véhicules traversant cet arc n'ont pas tous été soumis aux mêmes conditions de trafic<sup>15</sup> ou, du moins, à des conditions similaires. Il est en effet possible d'accéder au nœud origine de l'arc étudié par différents arcs (que l'on appellera arcs entrants). De même, ils existent plusieurs arcs pour quitter le nœud destination de l'arc (que l'on appellera arcs sortants). Pour chaque paire d'arcs entrant et sortant empruntée, les conditions rencontrées sur l'arc à parcourir seront différentes et ce pour deux raisons principales:

<sup>15</sup> Ensemble des éléments externes au véhicule influençant le comportement (freiner, accélérer, changer de voie,...) de son conducteur

- la synchronisation des feux des deux carrefours entraîne des temps d'attente sur l'arc différents pour chaque paire de mouvement tournant
- les files d'attentes pour les mouvements tournants sortants peuvent être de taille variable entraînant des temps d'attente différents

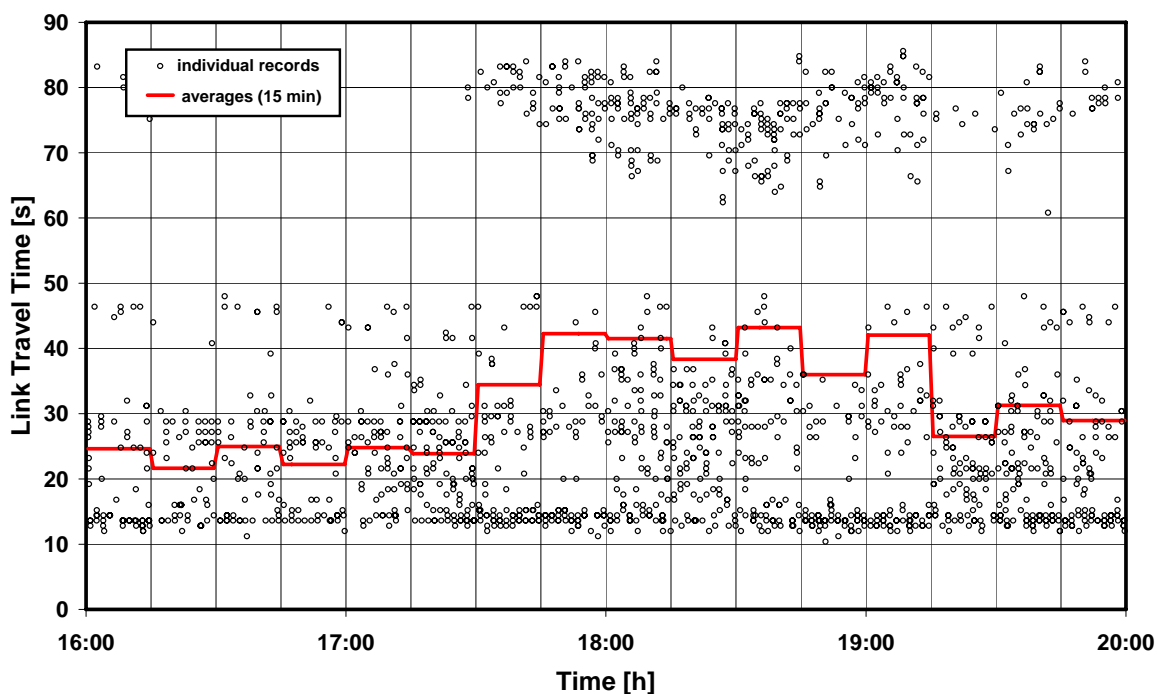
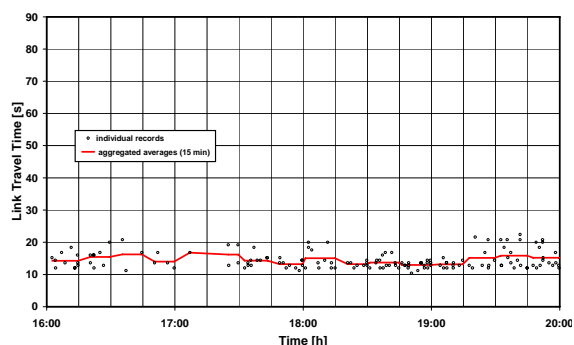
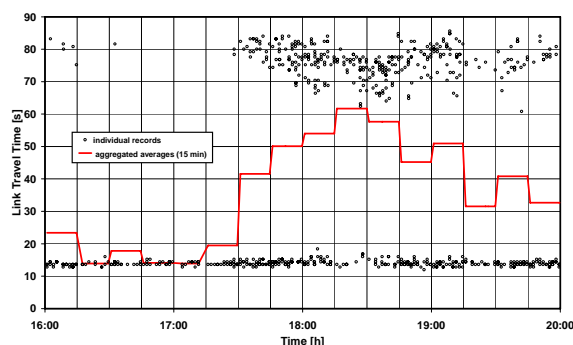
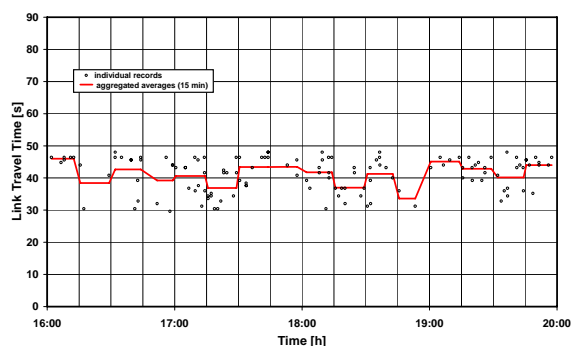
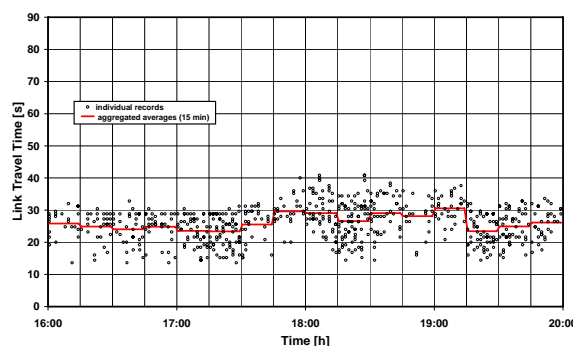


Figure 18 : Mesure de LT sur un arc reliant deux carrefours à feux

Il serait donc intéressant de séparer les mesures de LT en sous-catégories de véhicules, une par paire d'arc entrant et sortant. Dans l'exemple illustré par la Figure 18, le premier carrefour est accessible par deux arcs entrants et, de même, le second carrefour permet d'emprunter deux arcs sortants différents. La Figure 19 représente la population des LT de chacune des quatre paires, avec leur écart type moyen respectif.

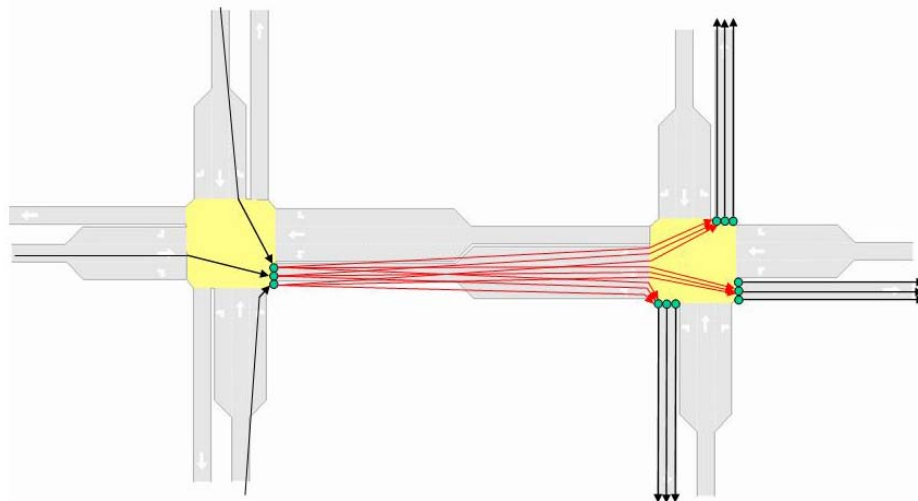
De l'entrée 1 à la sortie 3 ( $\bar{\sigma} = 2.4$ )

 De l'entrée 1 à la sortie 4 ( $\bar{\sigma} = 28.3$ )

 De l'entrée 2 à la sortie 3 ( $\bar{\sigma} = 4.5$ )

 De l'entrée 2 à la sortie 4 ( $\bar{\sigma} = 5.0$ )

**Figure 19 : Représentation des LT regroupés par paire d'arcs entrant et sortant**

Cette opération confirme que, dans trois cas sur quatre, la variance des sous-populations est relativement faible (les coefficients de variance moyens ne dépassent pas les 0.18), les LT des véhicules empruntant la même paire d'arcs entrant et sortant étant similaires.

Seule la paire empruntant l'entrée 1 et la sortie 4 présente un coefficient moyen de variance élevé (0.79), supérieur même à celui de la population globale. Cette situation s'explique par le fait que les premiers véhicules du groupe entrant sur l'arc atteignent sa fin alors que le feu pour emprunter la sortie 4 est encore vert alors que les derniers sont obligés de s'arrêter, le feu étant déjà passé au rouge avant que l'entier du groupe soit arrivé. Ce phénomène n'est observé qu'après une heure et demi de simulation: jusque là, la taille du groupe était assez faible pour que la totalité du groupe puisse passer au vert.

Cette discontinuité dans les conditions de trafic rencontrées par les véhicules implique des sous-populations à distribution bimodale, caractéristique des arcs à feux. La moyenne des temps de parcours (représentée par les lignes rouges sur la Figure 19) n'a qu'un sens limité, aucun véhicule n'enregistrant réellement un LT proche de cette valeur. Elle ne permet finalement que de se rendre compte du rapport entre le nombre de valeurs réunis dans chaque mode. Un tel exemple met clairement en évidence les limites d'une approche déterministe qui limite le temps de parcours à une seule valeur.

Toutefois, comme expliqué précédemment, l'estimation du temps de parcours par FCD est d'autant meilleure que la variance est faible. On peut donc s'attendre à obtenir une performance d'estimation élevée pour trois des quatre paires, alors que la dernière verrait la sienne limitée à celle de la population totale. D'un point de vue global, la division des arcs en sous arcs devrait donc permettre d'améliorer les performances de l'estimation par FCD. La modélisation de la Figure 17 serait alors remplacée par celle de la Figure 20.



**Figure 20 : Représentation subdivisée des arcs et nœuds**

Une telle subdivision des arcs présente toutefois certains désavantages. Premièrement, la complexité du réseau à traiter se voit sérieusement augmentée, le nombre d'arcs étant nettement supérieur. A titre d'exemple, une telle opération sur le réseau "centre" de la ville de Lausanne entraînerait une multiplication par 3.6 du nombre d'arcs. Cependant, les répercussions de cette augmentation se limitent avant tout à des accroissements des temps de traitement des données, notamment le calcul des chemins les plus courts, et il s'agit donc plus d'un problème d'ordre technique que de fond.

A l'inverse, cette subdivision implique une diminution importante de la taille moyenne de la population des LT par arc-période, ce qui est nettement plus problématique. En effet, il a bien été indiqué précédemment que la diminution de la variance entraîne une amélioration des performances de l'estimation par FCD, mais ceci à condition que la taille de la population et que la proportion de mesures des véhicules flottants soient identiques. En cas de subdivision des arcs, la proportion des véhicules flottants peu différer d'une sous-population à l'autre est donc être différente de celle de la population globale. De plus, les tailles des sous-populations sont évidemment plus petites que celles de la population globale. Il faut donc en évaluer les conséquences.

Le plus grand problème induit par la diminution de taille des sous-populations est l'augmentation des arc-périodes sans enregistrement de LT par des véhicules flottants, que l'on appellera par la suite *mesures blanches*. En effet, pour une proportion donnée de véhicules flottants, plus la taille de la population des LT est faible plus la probabilité qu'aucune mesure de véhicule flottant ne soit enregistrée augmente. La présence de mesures blanches implique qu'une méthode de substitution doit être appliquée pour obtenir un ELT, ce dernier

s'avérant très souvent moins performant que celui obtenu sur la base de données dynamiques. Cette problématique des valeurs blanches ainsi que les méthodes de substitution seront développées en détail par la suite.

En résumé, la subdivision des arcs en fonction de leur entrée et sortie présente certains avantages et inconvénients dont le rapport va dépendre d'une série d'autres paramètres. L'analyse paramétrique qui suivra devrait déterminer dans quelle condition cette subdivision offre de meilleures performances.

Jusqu'ici, une subdivision complète a été proposée. Toutefois, il serait intéressant de savoir si une subdivision partielle, uniquement au niveau des arcs sortants (sans différenciation à l'entrée) ou au niveau des arcs entrants (sans différenciation à la sortie), ne permettrait pas d'atteindre un rapport avantages/inconvénients plus intéressant. Cela serait logiquement le cas si la diminution de la variance des populations de LT était majoritairement due à un des deux types de différenciation (entrée ou sortie).

Pour obtenir une réponse à cette interrogation, quatre définitions d'arcs seront traitées:

- *Classical* (représentation habituelle)
- *In* (différence au niveau des arcs entrants)
- *Out* (différence au niveau des arcs sortants)
- *In-Out* (différence au niveau des arcs entrants et sortants)

Des résultats concrets, sur la base du modèle "centre" de Lausanne, seront présentés au paragraphe suivant, une fois la notion de période d'agrégation définie. Ils permettront de quantifier partiellement les avantages et inconvénients de la méthode de subdivision.

### **La période d'agrégation**

Comme expliqué précédemment, l'approche déterministe des temps de parcours d'arc implique une discrétisation du temps en période durant lesquels ces temps de parcours (plus exactement leurs modélisations) sont supposés constants.

La durée de cette période d'agrégation (Aggregation Period Duration, abrégé AP par la suite) joue un rôle important sur les performances de l'estimation de temps de parcours par FCD. En effet, comme la méthode de subdivision des arcs du réseau, le choix de la période d'agrégation peut influencer la variabilité des populations de LT.

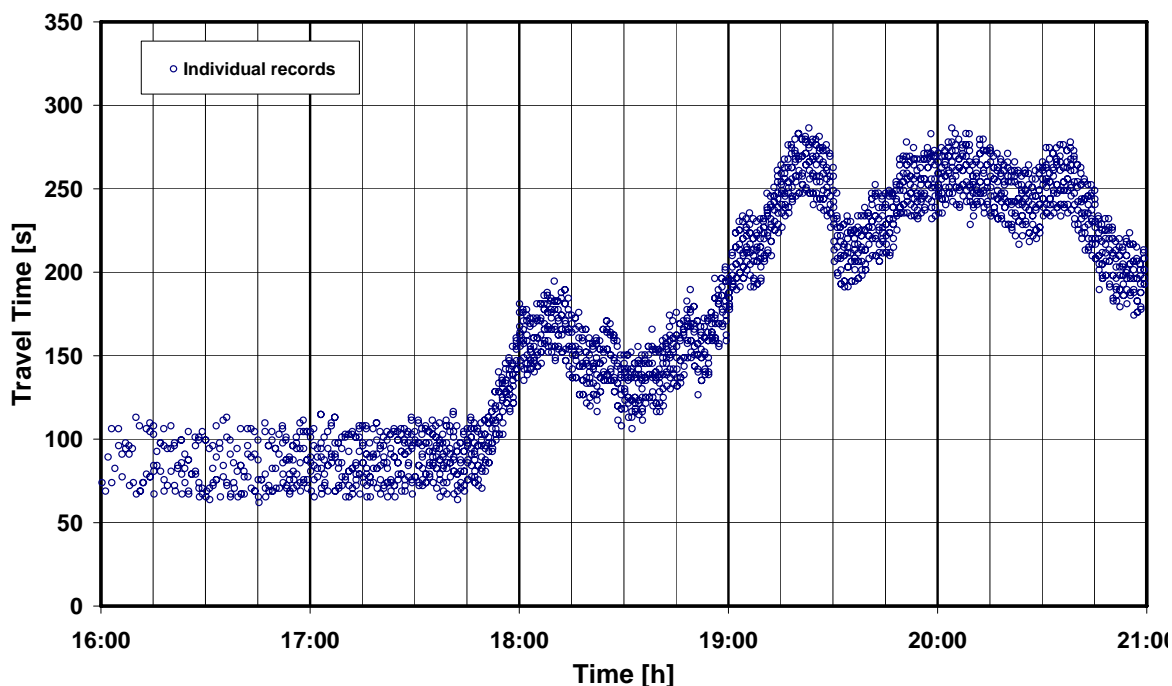
Pour mieux comprendre comment l'AP influence cette variabilité il faut préciser ici qu'il existe en réalité deux types de variabilité dans l'optique d'une analyse temporelle:

- la variabilité à court terme
- la variabilité à moyen terme

La variabilité à court terme est uniquement liée à la différence des conditions de trafic auxquelles sont confrontés les véhicules sur l'arc (comme décrit au paragraphe précédent). Cette variabilité sera toujours présente même si les flux de trafic dans le réseau étaient constants dans le temps.

A l'inverse, la variabilité à moyen terme est elle directement liée à la variabilité de la demande en trafic au cours du temps. Les conditions globales de trafic changent alors en fonction de la variation des flux de trafic et une tendance générale à la baisse ou à la hausse des LT d'un arc est constatée.

La Figure 21 permet d'illustrer ces deux notions. Avant 17h45 environ, seule la variabilité à court terme est visible, aucune tendance générale n'est constatée. Durant la suite de la simulation, si la variabilité à court terme est toujours présente, des tendances globales d'augmentation ou de diminution de LT sont nettement visibles.



**Figure 21 : Variabilité à court terme et à moyen terme cumulée**

Par conséquent, plus la période d'agrégation est longue, plus la variabilité de la population des arc-périodes présente une composante « moyen terme » importante. Il est donc logique que plus la durée de cette période d'agrégation est petite, plus on peut se limiter à la variabilité à court terme uniquement, entraînant ainsi une diminution de la variabilité de la population. A titre d'exemple, si les cinq heures d'enregistrement de la Figure 21 étaient agrégées par périodes de 30 minutes, l'écart type moyen par période serait de 18.8 secondes alors que cet écart se réduirait à 13.5 secondes pour des périodes de 5 minutes. Cette diminution de la variabilité doit donc entraîner une amélioration des performances de l'estimation de temps de parcours par FCD.

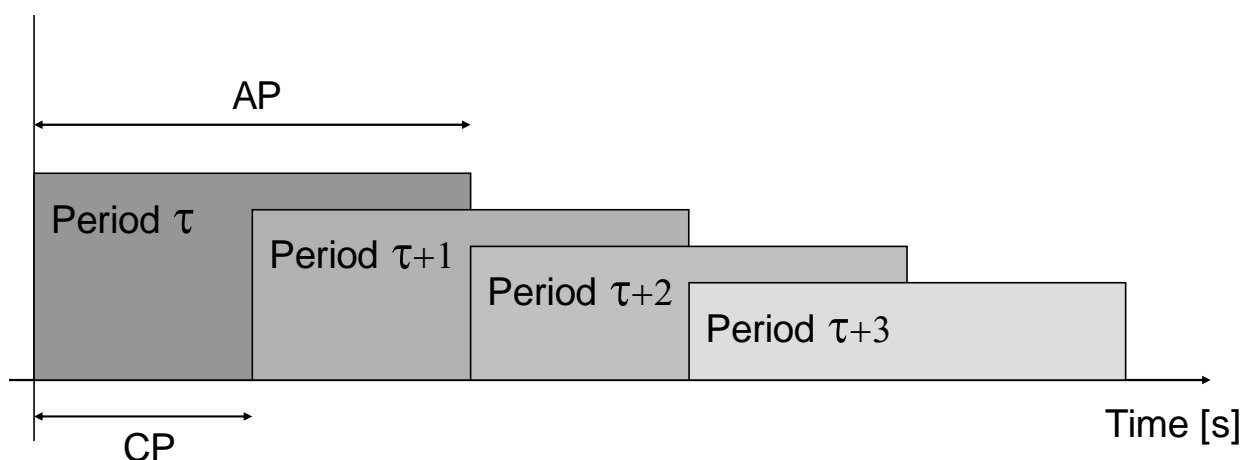
De plus, si les périodes d'agrégation se limitent à la variabilité à court terme, l'évolution temporelle des ELT correspondants permettra de mieux saisir les variations des conditions de trafic, ce qui ne peut qu'améliorer la qualité de la navigation dynamique. En effet, une réactualisation fréquente des temps de parcours mesurés (donc une AP courte) permet de modifier rapidement l'itinéraire actuellement suivi si les nouvelles conditions de trafic le nécessitent.

Toutefois, comme dans le cas de la subdivision des arcs, la diminution de la durée de la période d'agrégation réduit la taille de la population de LT des arc-périodes, entraînant une augmentation des valeurs blanches qui détériorent la qualité de l'estimation par FCD. Une fois encore, cette approche offre certains avantages et inconvénients. L'AP présentant le rapport avantages/inconvénients le plus favorable devra donc être choisie en fonction des autres paramètres rentrant en jeu dans le processus d'estimation de temps de parcours par FCD.

Comme pour l'ER, une série de valeur d'AP doit être choisie pour l'analyse paramétrique. Pour cette étude, les valeurs suivantes ont été retenues : 60, 120, 300, 600, 900, 1200, 1800 et 3600 secondes. Elles balaient de manière représentative la zone des valeurs qui peuvent être jugées comme réalistes.

### La moyenne mobile

Les périodes d'agrégation présentées au paragraphe précédent correspondent à une discrétisation de l'axe du temps réalisée de sorte à ce que la fin de la période  $\tau$  corresponde au début de la période  $\tau+1$ . Dans ce cas, chaque période d'agrégation contient ses propres mesures de LT, lesquelles ne sont pas prises en compte par les périodes antérieures et futures. Une telle approche implique que le laps de temps qui sépare deux calculs de moyenne (Calculon Period, abrégé CP par la suite) est identique à celui qu'il y a entre le début et la fin d'une période d'agrégation (CP=AP).



**Figure 22 : Principe de la moyenne mobile avec une période de calcul (CP) deux fois plus courte ( $\eta=2$ ) que celle d'agrégation (AP).**

Afin d'obtenir une fréquence de réactualisation plus élevée (une CP plus petite) sans forcément changer la durée des périodes d'agrégation, il faut donc que ces dernières se chevauchent dans le temps. Il s'agit du principe de la moyenne mobile, illustré par la Figure 22.

Dans ce cas, on a :

$$CP = AP / \eta$$

Equ. 14

Il est à noter qu'une valeur  $\eta$  trop élevée n'aurait toutefois plus de sens: le nombre de nouveaux LT enregistrés comparé à ceux déjà traités par la période d'agrégation précédente serait trop faible pour montrer une réelle évolution des conditions de trafic.

Si l'augmentation de la fréquence de réactualisation due à l'utilisation de moyennes mobiles peut améliorer les performances de la navigation dynamique (ce qui reste à démontrer), son influence sur la qualité de l'estimation des temps de parcours (le sujet traité ici) n'est pas évidente. L'analyse paramétrique permettra toutefois de l'évaluer.

### **Les méthodes de substitution**

Le traitement des mesures blanches - arc-périodes sans mesures de véhicule flottant - est un aspect fondamental de l'estimation des temps de parcours par FCD. Leur nombre, comme cela sera montré par la suite, peut en effet s'avérer très important, et il le sera bien évidemment d'autant plus que le l'ER est faible.

Une analyse prenant en compte ce taux (ER) en plus de l'AP et de la définition d'arcs est donc nécessaire pour déterminer le nombre de valeurs blanches pour chaque combinaison des paramètres. La Figure 23 présente le pourcentage de valeurs blanches pour une définition d'arc *classique* en haut et *in-out* en bas.

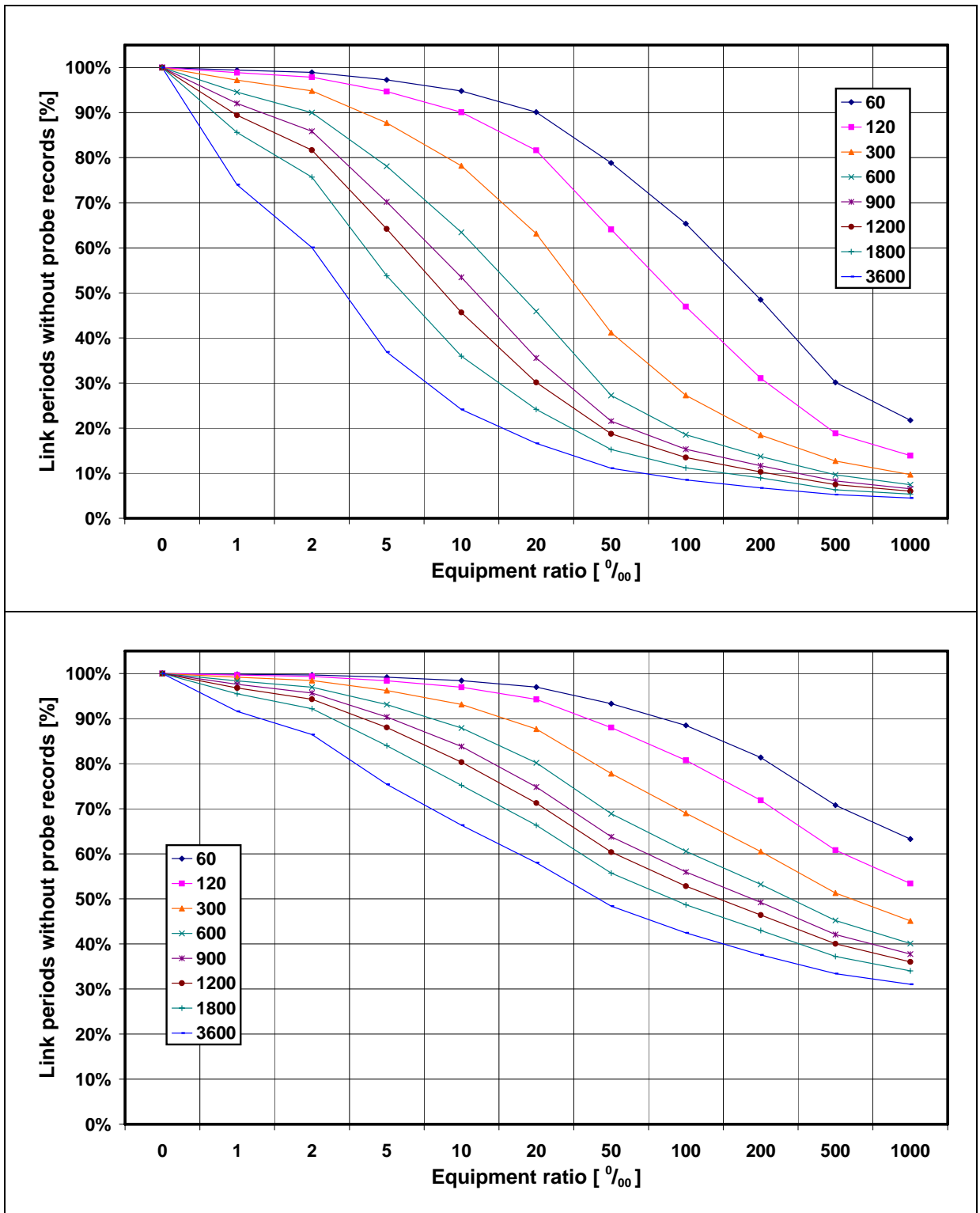


Figure 23 : Pourcentage de mesures blanches en fonction de la période d'agrégation et du taux d'équipement (définition d'arc classique en haut et in-out en bas)

### *La méthode statique (Free Flow)*

La méthode statique, appelée également *Free Flow* par la suite, propose de remplacer les valeurs blanches par le temps de parcours nécessaire pour traverser l'arc en question dans des conditions de trafic "libres" (d'où le terme de *Free Flow*). Ces valeurs *Free Flow* sont celles utilisées par les systèmes de navigation statique et sont calculées en utilisant une vitesse moyenne par catégorie d'arc. Dans le cas des arcs urbains, la plupart des produits commerciaux existant (ViaMichelin, Mapsonic, Garmin) utilisent une vitesse moyenne de 30 km/h (8.3 m/s). Comme le modèle "centre" est intégralement composé d'arcs de type urbain, le temps de parcours statique de ses arcs (*Free Flow Link Travel Time*, abrégé *FLT* par la suite) se calcule simplement par :

$$ELT_{a,\tau} = FLT_{a,\tau} = \frac{L_a}{FS} \quad \text{Equ. 15}$$

$L_a$  étant la longueur de l'arc et  $FS$  la vitesse *Free Flow* (8.3 m/s en général). A noter que le *FLT* est le même pour toutes les périodes d'agrégation vu qu'il s'agit d'un temps de parcours "statique".

Si le remplacement des mesures blanches par le *FLT* permet de mettre en évidence l'apport intrinsèque des mesures *FCD* pour le *SNA* (système de navigation auto-alimenté) par rapport à un système de navigation statique, cela ne peut pas être considéré comme une méthode satisfaisante pour maximiser les performances de la technique d'estimation de temps de parcours par *FCD*.

### *La méthode stationnaire*

L'utilisation de la méthode stationnaire se base sur le principe que tant qu'aucune nouvelle mesure *FCD* n'est disponible, le dernier *ELT* calculé est considéré comme valide. Ainsi, si durant la période  $t$  aucun véhicule flottant ne traverse l'arc  $a$  alors :

$$ELT_{a,\tau} = ELT_{a,\tau-1} \quad \text{Equ. 16}$$

En appliquant cette méthode une hypothèse de stationnarité est alors émise. Les conditions de trafic sont considérées comme peu changeantes d'une période d'agrégation à l'autre. Une telle approche peut se justifier si la variabilité à moyen terme des temps de parcours d'arc est faible (ce qui n'est en tout cas pas le cas des périodes de pointe) ou si la durée des périodes d'agrégation est très courte.

### *La méthode du profil historique*

L'idée du profil historique se fonde sur le fait qu'il existe une plus ou moins grande similarité entre les conditions de trafic qui règnent d'un jour à l'autre sur le réseau. Ces similarités sont particulièrement présentes pour un même jour de la semaine (le mardi par exemple) observé semaines après semaines, ce qui s'explique par une répétitivité des causes des déplacements, et donc de la demande en trafic.

En accumulant des paramètres de trafic mesurés par le passé (débits, vitesse, temps de parcours), un profil journalier moyen peut être calculé. On parlera alors, par exemple, du profil journalier "type" pour un mardi. Les différences entre le profil d'un jour spécifique et celui du jour type peuvent être très variables. Elles seront importantes lorsqu'un événement particulier rend ce jour "pas comme les autres", par exemple lorsqu'un incident bloque une partie du réseau ou si une manifestation implique un changement dans les habitudes des conducteurs.

Les mesures de LT transmises par les véhicules flottants peuvent donc être stockées dans le but de calculer un profil historique estimé des temps de parcours d'arc (Estimated Historical Link Travel Time, abrégé EHLT par la suite) défini comme suit :

$$EHLT_{a,\tau} = \frac{\sum_{d=1}^D \frac{\sum_{f=1}^{F_{d,a,\tau}} LT_a^f}{F_{d,a,\tau}}}{D} \quad \text{Equ. 17}$$

Le profil historique obtenu sur la base de l'entier de la population des LT (Historical Link Travel Time, abrégé HLT par la suite) est lui défini de la manière suivante :

$$HLT_{a,\tau} = \frac{\sum_{d=1}^D \frac{\sum_{n=1}^{N_{d,a,\tau}} LT_a^n}{N_{d,a,\tau}}}{D} \quad \text{Equ. 18}$$

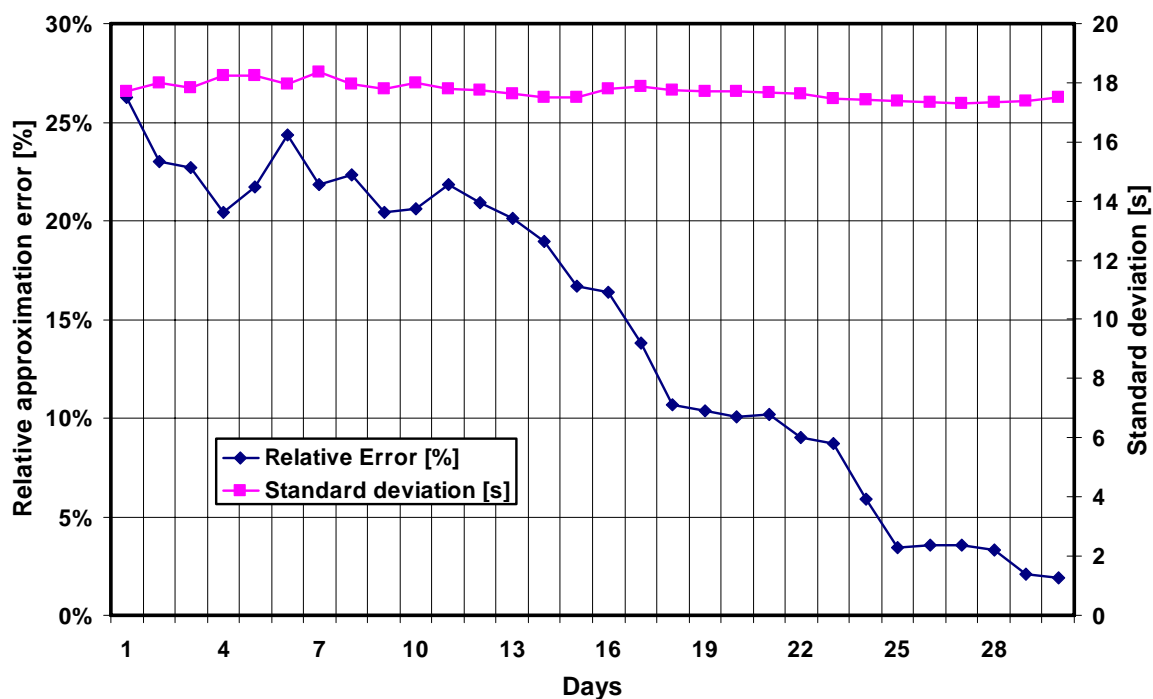
Dans ces deux équations, D est le nombre de jours d'enregistrement utilisés.

Dans la pratique, les profils historiques sont calculés de manière plus complexe, notamment en tenant compte des tendances saisonnières ou en pondérant de manière plus importante les jours les plus récents. Dans le cadre de cette étude, c'est la version simplifiée des équations 16 et 17 qui a été toutefois retenue.

L'estimation du profil historique peut être considérée comme un des points fort de la technique basée sur les FCD. En effet, en complément aux enseignements déjà mis en évidence précédemment, il peut également être démontré que, pour une population de mesures dont la variance et la proportion de mesures de véhicules flottants sont fixes, l'erreur d'estimation diminue si la taille de cette population augmente.

Par conséquent, le temps de parcours d'un arc  $a$  durant la période  $\tau$  d'un jour type de la semaine peut être considéré comme un phénomène unique à variance fixe, dont la taille de la population augmente chaque semaine où de nouvelles mesures sont stockées. Ainsi, même avec un ER très faible, on peut obtenir une bonne approximation de l'HLT par l'EHLT pour autant que les données d'un nombre de jours suffisants soient stockées dans la base de données historiques. Pour illustrer cette propriété, la Figure 24 montre l'évolution de la variance (représentée par l'écart type sur la figure) de la population de mesures de LT (en rose) ainsi que celle de la différence relative (EHLT-HLT)/HLT en fonction du nombre de

jours de données cumulées. Il s'agit de l'arc modélisant à Lausanne la rue César-Roux en direction de la place du Tunnel durant la période d'agrégation allant de 17h00 à 17h15. Le taux de véhicule flottant est de 10 ‰.



**Figure 24 : Evolution de l'erreur d'approximation relative (ER = 1%) et écart type de la population de mesures en fonction du nombre de jours de mesures cumulé**

Cette figure montre que la variance de la population reste stable bien que sa taille augmente au fil des jours cumulés. L'erreur d'approximation (illustrée par la différence relative) diminue progressivement jusqu'à tendre vers zéro pour une trentaine de jours accumulés.

Il est important de préciser que ces résultats de simulation ont été obtenus sur la base de l'hypothèse suivante: une matrice OD est considérée comme représentant la demande d'un jour type, la différence entre les jours spécifiques se faisant en changeant la semence stochastique (point de départ pour le générateur de nombres aléatoires, appelé seed par la suite) utilisée pour une réplique (ou run de simulation, en fait un cycle de calcul). Par conséquent, les trente jours simulés l'ont été sur la base de la même matrice, mais en modifiant à chaque fois la seed. Il conviendrait donc de vérifier si les changements de conditions de trafic d'une seed à l'autre sont représentatifs de ceux constatés dans la réalité, vérification qui n'a pas pu être réalisée dans le cadre de cette étude.

La méthode de substitution basée sur le profil historique consiste donc à utiliser l'EHLT en lieu et place de la valeur blanche constatée :

$$ELT_{a,\tau} = EHLT_{a,\tau} \quad \text{Equ. 19}$$

Il faut noter qu'un EHLT n'est pas forcément toujours disponible, surtout si l'ER est faible, l'arc peu fréquenté ou le nombre de jours considérés limité. Dans ce cas, il faut utiliser une autre méthode de substitution.

#### *Méthode prédictive*

Dans la pratique, les techniques d'estimation de temps de parcours sont généralement couplées avec celles de prédiction. Considérons donc la disponibilité des temps de parcours d'arcs des futures périodes d'agrégation (Predicted Link Travel Time, abrégé PLT par la suite), lesquels sont calculés par le biais d'une méthode prédictive: à la fin de la période  $t$ , les  $ELT_{\tau}$  sont calculés tout comme les  $PLT_{\tau,\tau+1}$ ,  $PLT_{\tau,\tau+2}, \dots$ ,  $PLT_{\tau,\tau+i}$ . L'idée de la méthode prédictive est alors de remplacer une valeur blanche par la dernière valeur prédite pour la période et l'arc en question :

$$ELT_{a,\tau} = PLT_{a,\tau-1,\tau} \quad \text{Equ. 20}$$

La méthode prédictive retenue dans ce cas particulier est basée sur les réseaux de neurones. Elle est décrite en annexe (§ 11.3). Deux réseaux sont utilisés, le premier se basant sur les ELT passés et le deuxième sur les ELT combinés avec les EHLT. Chaque réseau fournissant un PLT différent, deux méthodes de substitutions différentes sont donc considérées dans l'analyse paramétrique.

#### **L'estimation combinée**

L'idée sous-jacente à l'estimation combinée est que les mesures d'un ou plusieurs LT d'un arc-période par des véhicules flottants ne sont pas nécessairement les seules valeurs à utiliser pour obtenir un ELT. En effet, plus le taux d'équipement est faible moins la moyenne de l'échantillon est représentative de la population des LT et l'estimation sera par conséquent moins précise.

Il est alors probable que la valeur du profil historique (EHLT) soit, dans certain cas, une meilleure estimation que celle uniquement déduite des mesures des véhicules flottants. Ceci peut être le cas alors même que la différence entre les conditions de trafic d'un jour particulier et d'un jour "type" devrait pénaliser l'utilisation de l'EHLT.

Plutôt que de devoir choisir entre ces deux valeurs de cas en cas, une combinaison linéaire et pondérée semble plus judicieuse. En effet, si l'on appelle  $ELT_f$  l'estimation obtenue uniquement grâce aux mesures des véhicules flottants, alors la nouvelle valeur estimée peut s'écrire :

$$ELT = \alpha \cdot ELT_f + (1 - \alpha)EHLT \quad \text{Equ. 21}$$

Reste alors à déterminer la valeur du coefficient  $\alpha$ . Concrètement, plus la performance de l' $ELT_f$  est élevée, plus  $\alpha$  devrait être grand. Pas conséquent, il y a une relation évidente entre

la valeur de ce coefficient et le taux d'équipement. Il ne s'agit néanmoins pas du seul paramètre. En effet, une pondération élevée de l'EHLT (donc un  $\alpha$  faible) n'a de sens que si les conditions de trafic de l'arc-période sont similaires à celles d'un jour "type", ce qui est difficile à savoir a priori. On peut toutefois admettre que plus l' $ELT_f$  est proche de l'EHLT plus cette hypothèse a de chance d'être correcte. Inversement, si ces deux valeurs sont très éloignées alors les conditions de trafic ne peuvent plus être considérées comme "habituelles". Dans ce cas, l'utilisation d'une valeur combinée ne pourrait que dégrader la performance d'estimation.

L'influence de cette différence entre l' $ELT_f$  et l'EHLT sur la valeur de  $\alpha$  tout comme la détermination d'une valeur seuil au-delà de laquelle une combinaison ne se justifie plus n'est pas aisée. Elles sont toutes deux notamment dépendantes de la variabilité de la population de LT. Pour la prendre en compte, une fonction de type  $\alpha=f(ER, ELT_f, EHLT)$  devrait être calibrée pour chaque arc-période, chaque AP, chaque type de définition d'arcs, etc... ce qui représenterait un travail considérable et fastidieux.

Par conséquent, une fonction plus générique doit donc être déterminée. Les paramètres suivants devraient alors être notamment pris en compte : l'ER, l' $ELT_f$ , l'EHLT, l'AP, la définition d'arcs, la longueur d'arc, le type d'arc, la période et le type de jonction (feux, stop, céder le passage). Il est à noter que, mis à part les trois premiers, tous les paramètres influencent la variabilité de la population des LT.

Vu le nombre de paramètres à traiter et leur différence de type, une expression analytique est quasiment impossible à déterminer. De ce fait, il a été décidé d'utiliser le travail déjà réalisé pour la prédiction de temps de parcours et d'appliquer la méthode des réseaux de neurones pour l'estimation combinée. Comme expliqué au § 11.3, un des réseaux de neurones élaboré pour la prédiction utilise justement comme inputs l'ensemble des paramètres cités ci-dessus et ne demande que peu de modifications pour obtenir un modèle d'estimation combiné. De plus, il ne se limite pas à l'utilisation des  $ELT_f$  et EHLT de la période traitée, mais prend également ceux des deux périodes de temps précédentes comme paramètres d'entrée. Pour obtenir une méthode d'estimation combinée, il faut utiliser la valeur d' $ALT_\tau$  comme valeur cible pour le processus d'apprentissage en lieu et place de celle d' $ALT_{\tau+1}$  (cas de la prédiction).

D'un point de vue pratique, quatre nouveaux lots de 15'000 mesures ont été extraits du "container principal", selon le principe décrit au § 11.3. Le processus d'apprentissage du réseau de neurones, réalisé à l'aide du premier des quatre lots, a permis d'atteindre de manière répétée une stabilisation du coût (la fonction de coût utilisée est celle des moindres carrés, abrégée MSE) vers une valeur de  $21 \text{ s}^2$  après 100 à 150 itérations. Les valeurs de MSE obtenues en appliquant le réseau ainsi obtenu aux trois autres lots (validation) permettent de juger le modèle comme étant stable.

Apprentissage	Validation 1	Validation 2	Validation 3
---------------	--------------	--------------	--------------

MSE (ELT/ALT)	13.9	16.2	15.3	15.1
---------------	------	------	------	------

**Tableau 7 : Valeur de la fonction de coût du réseau de neurones modélisant l'estimation combinée**

Il faut toutefois noter que l'architecture du réseau de neurones, jugée adéquate pour la méthode de prédiction pour laquelle elle a été élaborée, ne l'est pas forcément pour le cas de l'estimation combinée. Il n'est donc pas impossible qu'une autre architecture permettrait d'obtenir un coût inférieur.

Afin de juger la performance de la méthode d'estimation combinée ainsi obtenue, l'indicateur MSE a été également calculé (sur la base des mesures du premier lot) en comparant la valeur ciblée ALT avec les valeurs d'ELT<sub>f</sub> et d'EHLT. Les résultats, respectivement, 35.2 et 69.3 s<sup>2</sup>, montrent de manière évidente la performance de la méthode combinée par rapport à la seule utilisation des mesures (du jour) de véhicules flottants ou du profil historique. A noter encore l'excellent coefficient de détermination R<sup>2</sup>=0.97 obtenu pour le lot d'apprentissage.

De plus, un réseau de neurones avec les seules trois valeurs d'ELT<sub>f</sub> et les trois d'EHLT comme input n'a pas permis d'obtenir un MSE inférieur à 36.6 s<sup>2</sup>, démontrant ainsi la pertinence de la prise en compte des paramètres explicatifs de la variabilité de la population des LT.

L'utilisation ou non de la méthode d'estimation combinée basée sur les réseaux de neurones (méthode abrégée CN par la suite) sera traitée lors de l'analyse paramétrique. Afin de ne pas multiplier les graphiques, elle sera traitée en même temps que les méthodes de substitution sans toutefois être, évidemment, une telle méthode.

### La valeur d'alarme

Nous avons déjà signalé l'importance de la problématique des mesures blanches. Si aucune donnée n'est envoyée, c'est qu'aucun véhicule flottant n'a atteint l'extrémité de l'arc durant la période en question. Généralement, cela s'explique par le fait qu'aucun véhicule flottant ne circulait sur cet arc entre l'heure du début de la période et l'heure de sa fin (moins un temps de parcours "raisonnable" de l'arc). Il faut toutefois prendre en compte un autre cas de figure: si l'arc en question est fortement congestionné, un véhicule flottant peut alors effectivement se trouver sur l'arc durant l'intervalle de temps considéré, mais il ne peut le parcourir en ce temps jugé "raisonnable". Un ou plusieurs véhicules flottants peuvent alors rester sur l'arc durant plusieurs périodes d'agrégation sans envoyer de données car n'ayant pas atteint la fin de l'arc.

Dans une telle situation, se limiter à utiliser une méthode de substitution pour remplacer les mesures blanches serait erroné. La présence des véhicules flottants sur l'arc congestionné permet de savoir que l'ELT est au moins supérieur à une valeur seuil. Celle-ci correspond au temps durant lequel le premier véhicule flottant étant entré sur l'arc sans en être ressorti est présent sur cet arc. Une telle information permettrait d'améliorer grandement l'estimation par substitution. Il reste toutefois à savoir comment cette information est transmise au centre de gestion.

La solution est de définir un temps de parcours qui serait appelé "valeur d'alarme" et qui serait calculable pour chaque arc du réseau. Ainsi, si un véhicule flottant n'arrive pas à parcourir l'arc dans un temps inférieur à cette valeur d'alarme, il transmet alors au centre de gestion un message, en précisant l'identifiant de l'arc sur lequel il se trouve. S'il n'est toujours pas sorti de l'arc après deux valeurs d'alarmes, un nouveau message est envoyé et ainsi de suite. D'un point de vu purement pratique, il faudrait pouvoir faire la différence entre un véhicule effectivement bloqué dans une congestion et un véhicule arrêté pour une autre raison (tester si le moteur est coupé, demander une validation par le conducteur, etc.).

Dans le cadre de la présente étude, ce seuil d'alarme a été fixé à la valeur de l'EHLT ou, si elle n'est pas disponible, à la valeur *free flow*. Si l'utilisation des messages d'alarmes n'a pas été appliquée pour les résultats qui seront décrits dans ce chapitre, elle l'a été pour l'analyse des cas avec incident du § 8.3.4. Une recherche plus approfondie sur le potentiel de cette méthode et toutefois souhaitable.

### 7.1.3.3 L'évaluation des performances de la technique FCD

#### Indicateur de performance

Pour pouvoir évaluer l'influence des paramètres entrant en jeu dans le processus d'estimation des ELT, il est nécessaire de définir des indicateurs permettant de quantifier la performance de ce dernier.

Afin de simplifier la lecture des paragraphes suivant, la notion d' "**arc-période**" doit être définie. Il s'agit d'un arc  $a$  du réseau mais n'étant considéré que durant une période d'agrégation  $\tau$  précise. On parlera alors de l'arc-période  $a,\tau$ . De manière similaire, on parlera de l'itinéraire-période  $p,\tau$  pour les itinéraires.

#### L'erreur quadratique moyenne des temps de parcours d'arc

Ce premier indicateur (Mean Square Link Travel Time Error, abrégé MSLE par la suite) découle directement de l'équation 6. Il peut être formulé comme étant l'erreur d'estimation des temps de parcours sur la totalité des  $A$  arcs du réseau étudié et des  $T$  périodes de temps considérées :

$$MSLE = \frac{\sum_{a=1}^A \sum_{\tau=1}^T \epsilon_{a,\tau}^2}{A \cdot T} \quad \text{Equ. 22}$$

Pour être plus précis, seuls les arcs-périodes ayant une population de mesures de taille non nulle sont considérés dans ce calcul. Il arrive en effet que certains arcs ne soient pas utilisés par les véhicules simulés ou qu'ils ne le soient que durant certaine période de temps.

Cet indicateur est le plus répandu pour juger les performances de la technique d'estimation de temps de parcours par FCD. Il se base sur le principe que la moyenne de la population des LT est la valeur "vraie" et que la moyenne de l'échantillon devrait l'approcher au mieux.

### *L'erreur individuelle moyenne de temps de parcours d'arc*

Comme signalé au § 7.1.1.1, la moyenne de la population des LT ne devrait pas être considérée comme la "vraie" valeur à estimer. Elle doit plutôt être considérée comme une simplification ou, plus précisément, une modélisation du "phénomène" temps de parcours d'un arc. Dans cette optique, l'utilisation du MSLE ne se justifie donc pas car elle quantifie à quel point un second modèle (l'ELT) colle à un premier (l'ALT) alors qu'il faudrait plutôt quantifier son aptitude à modéliser le "phénomène" lui-même.

C'est pourquoi, la comparaison entre chaque LT d'un arc-période et sa modélisation (l'ELT) semble plus appropriée. L'erreur individuelle moyenne de temps de parcours d'arc (Average Individual Link Travel Time Error, abrégé AILE) est donc définie par:

$$AILE = \frac{\sum_{a=1}^A \sum_{\tau=1}^T \sum_{n=1}^{N_{a,\tau}} \frac{|LT_a^n - ELT_{a,\tau}|}{ELT_{a,\tau}}}{\sum_{a=1}^A \sum_{\tau=1}^T N_{a,\tau}} \quad \text{Equ. 23}$$

En d'autres termes, il s'agit de l'erreur relative moyenne d'estimation du LT d'un véhicule.

### *L'erreur quadratique moyenne des temps de parcours d'itinéraire*

Etant donné que le temps de parcours d'itinéraire fourni par le SNDM à son utilisateur est calculé en additionnant les temps de parcours d'arcs composant cet itinéraire, la performance de l'estimation du temps de parcours d'itinéraires est directement liée à celle du temps de parcours d'arcs.

De plus, la précision de l'estimation du temps de parcours d'arc ne présente pas d'intérêt en soi, tout du moins pour l'utilisateur du SNDM qui ne s'intéresse lui qu'à la précision de celui de l'itinéraire qu'il va emprunter. De ce fait, évaluer la performance de l'estimation des temps de parcours d'arcs sur la base de l'erreur d'estimation du temps de parcours d'itinéraire est plus adéquate dans l'optique finale d'évaluer la performance d'un SNA. L'erreur quadratique moyenne des temps de parcours d'itinéraire (Mean Square Path Travel Time Error, abrégé MSPE par la suite) est donc ainsi définie :

$$MSPE = \frac{\sum_{p=1}^P \sum_{\tau=1}^T (EBPT_{p,\tau} - EPT_{p,\tau})^2}{P \cdot T} \quad \text{Equ. 24}$$

où:

$$EBPT_{p,\tau} = \sum_{a=a_0}^{a_k} ELT_{a,\tau} \quad \text{avec } p = \{a_0, a_1, \dots, a_k\} \quad \text{Equ. 25}$$

et

$$EPT_{p,\tau} = \frac{1}{F_{p,\tau}} \sum_{f=1}^{F_{p,\tau}} PT_p^f \text{ avec } F_{p,\tau} \leq N_{p,\tau} \text{ et } E_{p,\tau} = \frac{F_{p,\tau}}{N_{p,\tau}} \quad \text{Equ. 26}$$

Quant à P, il correspond au nombre total d'itinéraires différents ayant été empruntés - pendant toute la simulation - pour relier une origine à une destination.

Comme pour le MSLE, seuls les itinéraire-périodes ayant une population de mesures de taille non nulle sont considérés pour ce calcul.

#### *L'erreur individuelle moyenne de temps de parcours d'itinéraire*

La réflexion ayant mené à la définition de l'AILE peut également être appliquée au niveau des itinéraires. L'erreur individuelle moyenne de temps de parcours d'itinéraire (Average Individual Path Travel Time Error, abrégé AIPE) est définie ainsi :

$$AIPE = \frac{\sum_{p=1}^P \sum_{\tau=1}^T \sum_{n=1}^{N_{p,\tau}} \frac{|PT_p^n - EPT_{p,\tau}|}{EPT_{p,\tau}}}{\sum_{p=1}^P \sum_{\tau=1}^T N_{p,\tau}} \quad \text{Equ. 27}$$

Même si les autres indicateurs apportent certains enseignements, de l'avis de l'auteur, l'AIPE est le plus pertinent. Il est, en effet, le plus représentatif de la performance souhaitée au niveau du SNA.

### **Evaluation par simulation**

#### *Indicateur AILE*

L'utilisation de cet indicateur offre des résultats assez nuancés. La Figure 25 présente les valeurs de l'AILE obtenues pour une définition d'arc classique.

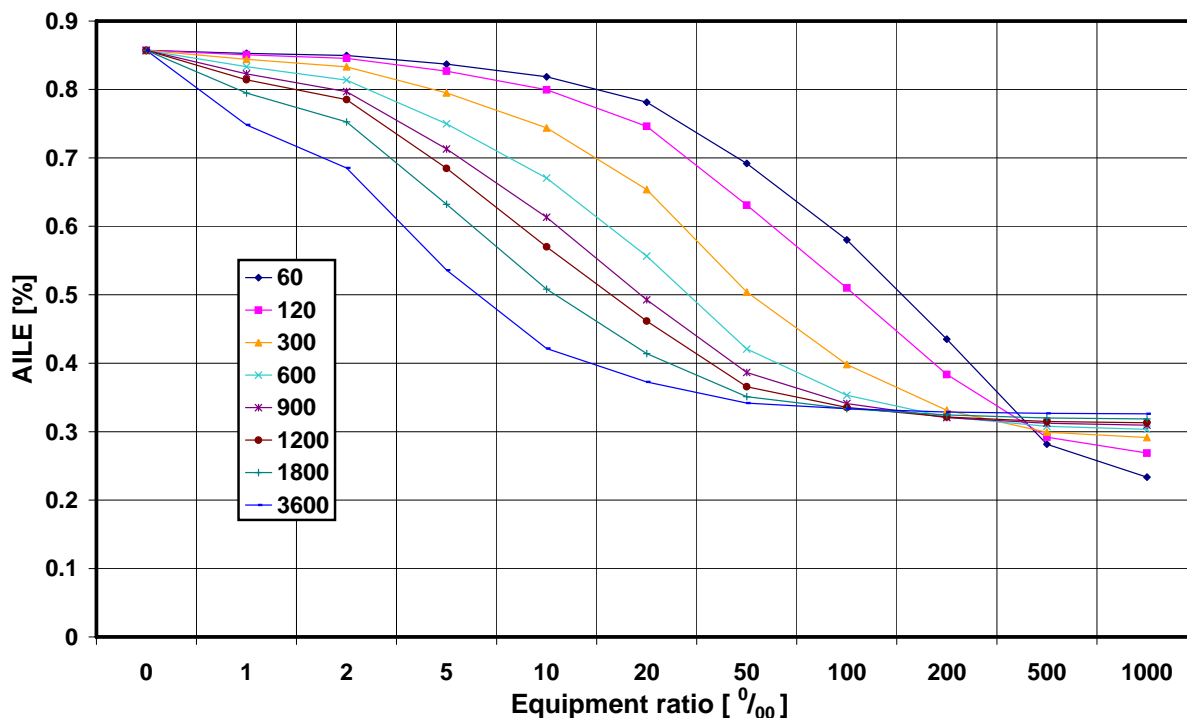


Figure 25 : AILE en fonction de l'ER et de l'AP pour une définition d'arcs classique

Lorsque le taux d'équipement est faible, la diminution rapide du taux de substitution (voir Figure 23) constatée pour les périodes d'agrégation longues offre un avantage certain sur la performance d'estimation globale. Il n'est donc pas étonnant qu'une AP de 3600 secondes offre des résultats meilleurs pour un ER inférieur à 100 ‰.

Pour ce taux d'équipement, il y a toutefois une claire convergence des valeurs d'AILE pour des AP compris entre 3600 et 600 secondes. Cela veut dire qu'à ce niveau d'équipement, les avantages d'une AP élevée (moins de mesures blanches) et ceux d'une AP faible (variabilité limitée des populations de LT) se compensent. Il est d'ailleurs intéressant de constater que, pour ces AP, aucune amélioration marquée de l'AILE n'est enregistrée pour des ER supérieurs. Pour obtenir de meilleures performances, il faut alors adopter des AP de 300, de 120 voir de 60 secondes, mais seulement pour des ER supérieurs à 500 ‰. On notera, pour finir, que l'écart maximum de performance entre une AP de 60 et de 3600 secondes est observé pour un ER de 20 ‰. Pour ce taux d'équipement, l'AILE commence à peine à baisser pour la première courbe alors qu'elle s'est quasiment stabilisée à son niveau minimum pour la deuxième. Ce constat montre l'importante influence du taux de mesures blanches qui existe à ce niveau d'ER.

La comparaison entre les valeurs d'AILE obtenues pour les quatre définitions d'arcs et une période d'agrégation fixe permet de tirer des enseignements supplémentaires. L'exemple d'une AP de 900 secondes - illustré par la Figure 26 - montre en effet qu'une définition de type *classical* ou *in* implique de meilleurs résultats pour des taux d'équipements inférieurs à 100 ‰. Cette valeur, pour laquelle les quatre courbes sont très proches, représente une nouvelle fois le point où les avantages et les inconvénients de chaque définition d'arcs se compensent.

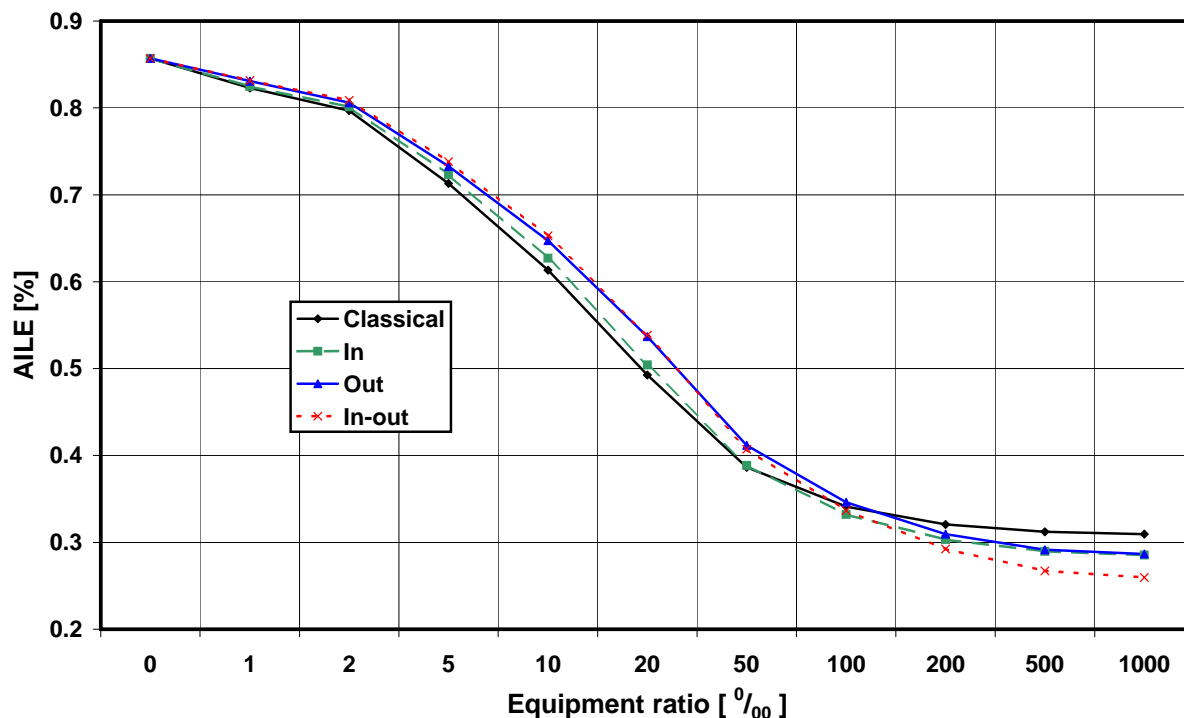


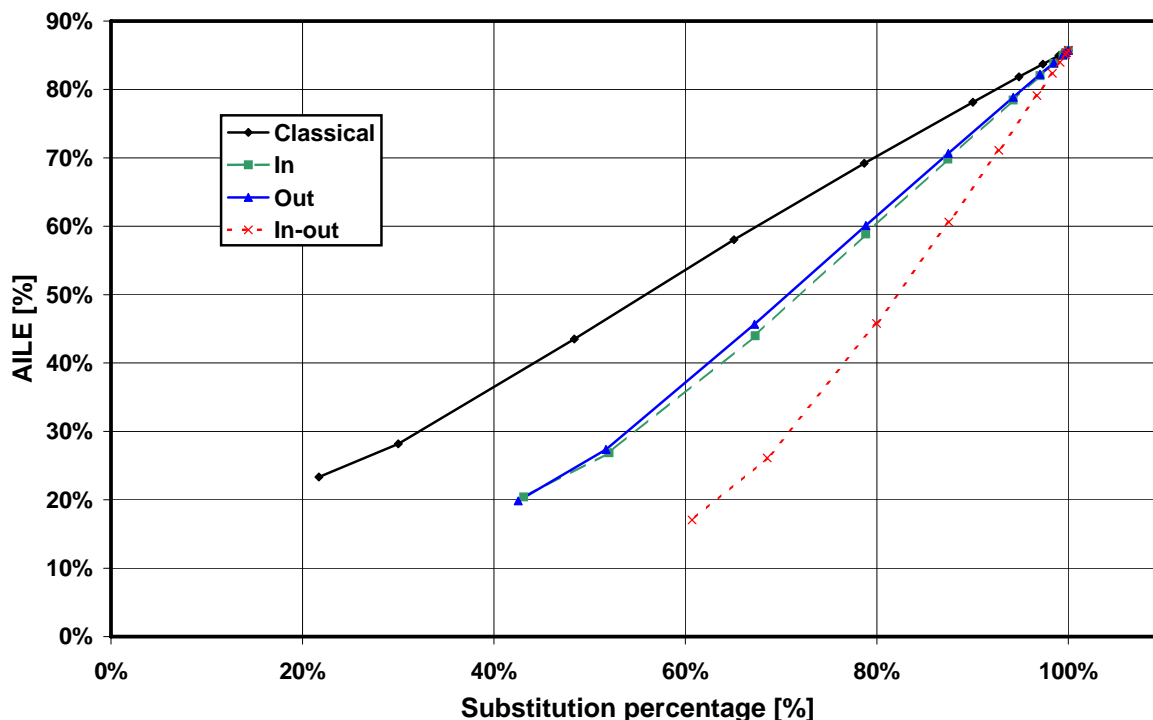
Figure 26 : AILE en fonction du taux d'équipement et de la définition d'arcs pour une AP = 900

De manière prévisible, une définition de type *in-out* permet d'obtenir les meilleures performances pour des ER supérieures à 100<sup>0</sup>/<sub>00</sub>. Une définition de type *classical* a, elle, tendance à "plafonner" rapidement tout comme, dans une moindre mesure, les deux autres définitions. Ces résultats confirment donc qu'un seul type de définition n'est pas optimal pour l'ensemble des valeurs.

Le point de croisement des quatre courbes est toutefois différent (entre 20 et 50<sup>0</sup>/<sub>00</sub> pour le premier et entre 200 et 500<sup>0</sup>/<sub>00</sub> pour le second). De tels résultats permettent de confirmer la dépendance mutuelle de tous les paramètres analysés.

Comme pour les périodes d'agrégation, les performances d'un type de définition d'arcs dépendent fondamentalement du taux de substitution que son choix entraîne. Ainsi, pour des ER faibles, les avantages qu'apportent des définitions différenciées ne permettent pas de compenser les désavantages liés à leur taux de substitution trop élevé.

Une analyse mettant en relation l'AILE avec ce taux de substitution permet d'en savoir plus sur l'influence réelle de cette valeur. La Figure 27 présente cette comparaison pour le cas d'une AP de 60 secondes. Elle souligne la différence entre la définition de type *classical* et *in-out*, les deux autres (similaires entre elles) se trouvant parfaitement entre deux. Le type *in-out* présente en effet des performances nettement supérieures au *classical* pour un taux de substitution identique, phénomène qui s'accroît avec la diminution du pourcentage de substitution et donc de l'AILE. A titre d'exemple, un taux de substitution de 60% permet d'obtenir un AILE de 18% pour le type *in-out* contre 53% pour le *classical*.



**Figure 27 : Relation entre l'AILE et le pourcentage de substitution (ou de mesures blanches) en fonction de la définition d'arcs pour une AP=60**

Les résultats présentés par ce graphique peuvent également être interprétés de la manière suivante: pour obtenir un niveau de performance identique (par exemple un AILE de 30%), le niveau de substitution de type *classical* (32%) doit être inférieur à celui du type *in-out* (72%). Concrètement, c'est ce qui se passe au point où les courbes de la Figure 26 se croisent. Pour ce taux d'équipement précis, le rapport entre les taux de substitution est tel qu'il implique des AILE semblables. Cela signifie également que lorsque le type *in-out* devient le plus performant (pour un ER supérieur à 10% dans le cas de la Figure 26), il n'en reste pas moins celui qui présente le taux de substitution le plus élevé.

L'utilisation, dans le cadre de l'évaluation d'une technique d'estimation de temps de parcours alimentant un SNDM, d'indicateurs non pas basés sur le temps de parcours d'arcs mais plutôt sur celui d'itinéraire a été justifiée précédemment. Parmi les deux proposés, seul l'AIPE sera analysé en détails pour les raisons exposées précédemment. Une comparaison entre les valeurs d'AILE et d'AIPE permettra de mettre en évidence la différence entre l'approche par arcs et celle par itinéraire.

#### *Indicateur AIPE*

La Figure 28 montre les valeurs de l'AIPE en fonction de l'ER et de l'AP pour une définition d'arcs *classical*.

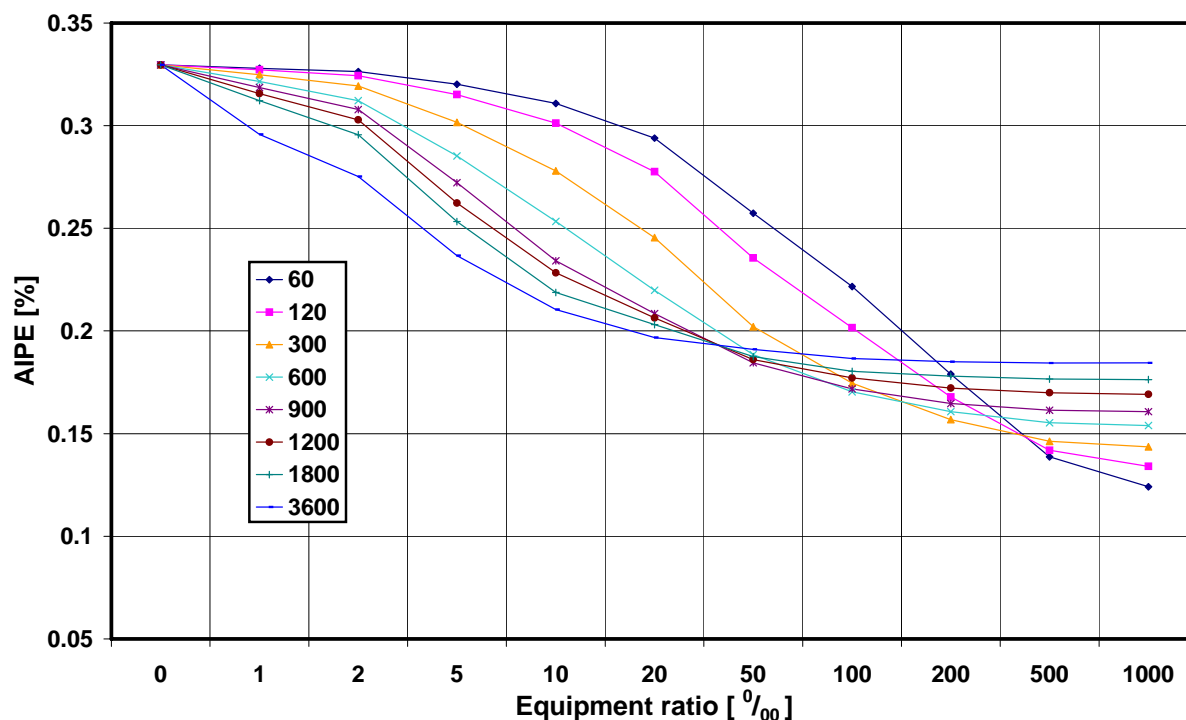


Figure 28 : AIPE en fonction de l'ER et de l'AP pour une définition d'arcs classique

Toutefois, deux éléments présentent une nette différence entre les deux graphiques. Premièrement, la zone des valeurs d'AIPE (12 à 33%) est moins étendue que celle d'AILE (22% à 86%) mais surtout présente des valeurs très inférieures. Cette première comparaison permet donc de tirer un enseignement important : pour des conditions d'estimation de temps de parcours par FCD identiques, l'erreur relative d'estimation au niveau des itinéraires est plus faible qu'au niveau des arcs.

Ce phénomène s'explique aisément par le fait que les erreurs d'estimation des arcs ne se cumulent pas le long d'un itinéraire mais ont plutôt tendance à se compenser partiellement, car pouvant être aussi bien de signe positif que négatif. En effet, l'indicateur d'AILE ne prend en compte que la valeur absolue des erreurs. De plus, la non indépendance entre les temps de parcours enregistrés sur plusieurs arcs d'un itinéraire joue également un rôle dans le cumul des erreurs d'arc.

Deuxièmement, la différence entre les deux graphiques provient de la convergence entre les courbes d'AP allant de 3600 à 600 secondes qui se situe plutôt entre 2 et 5% d'ER contre 10 et 20% pour l'AILE. L'inversement de tendance entre les AP est également plus marquée pour des valeurs d'ER supérieures à 5%. La comparaison basée sur les trois autres définitions d'arcs confirme ces tendances. Les valeurs d'AIPE justifient donc l'abaissement de la durée de la période d'agrégation pour un taux d'équipement plus faible que dans le cas d'une analyse au niveau des arcs (AILE).

A l'inverse, les graphiques montrant l'effet de la définition d'arcs sur l'AILE (Figure 26) et l'AIPE (Figure 29) ne permettent pas de constater un changement entre les deux approches. En effet, dans les deux cas, le point de croisement des courbes se situe aux environs d'un ER de 10% et ce pour une AP de 900 secondes. Ce constat est confirmé par l'observation

des résultats pour une AP de 120 et 3600 secondes. Il faut encore ajouter que comme pour l'AILE, la différence entre les quatre courbes reste limitée.

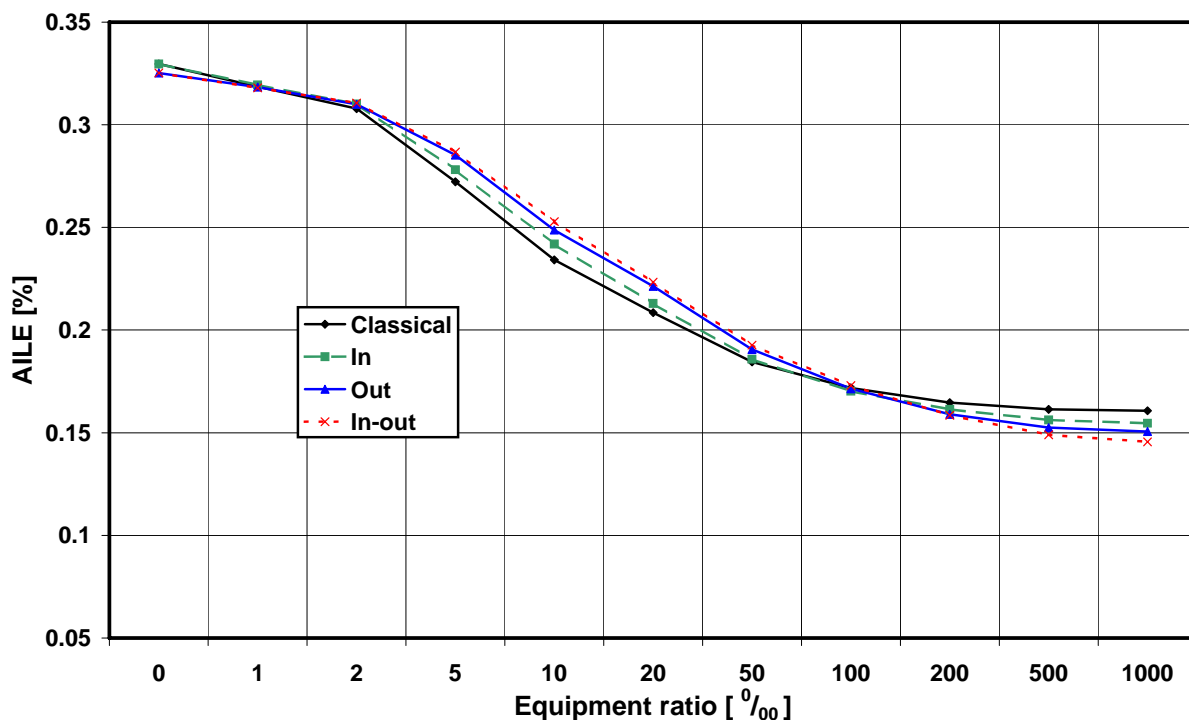


Figure 29 : AILE en fonction du taux d'équipement et de la définition d'arcs pour une AP = 900

La Figure 30 permet de comparer les valeurs d'AILE pour une définition d'arc *classical* et *in-out* et ce, sur la gamme complète d'AP possibles. Elle confirme le peu de différence constatée. La vision 3D proposée ici permet de mettre particulièrement en évidence l'effet combiné de l'ER et de l'AP sur l'AILE.

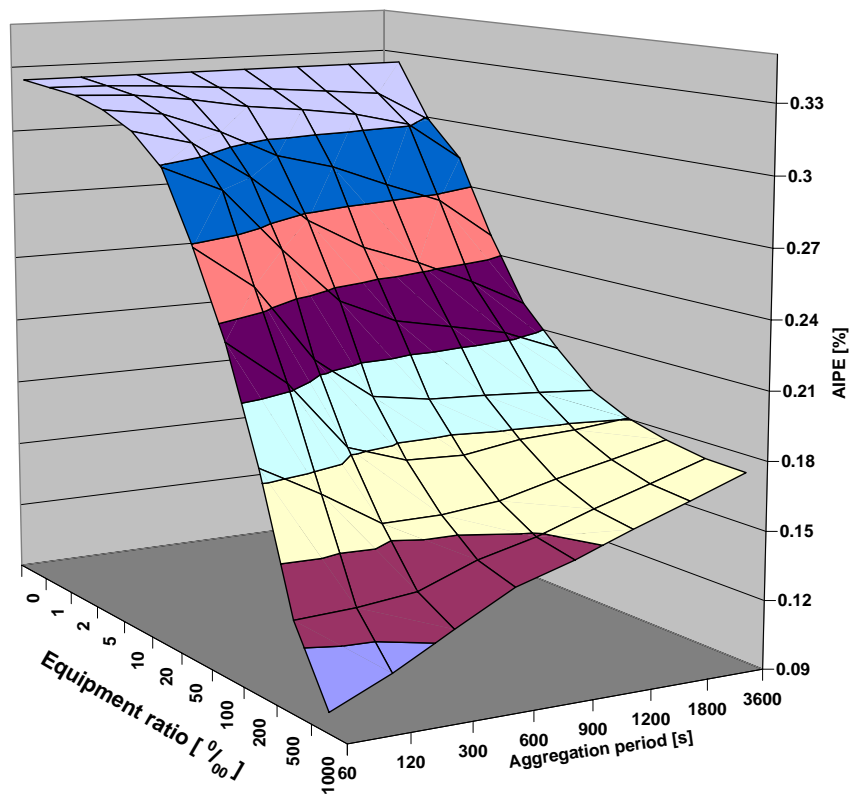
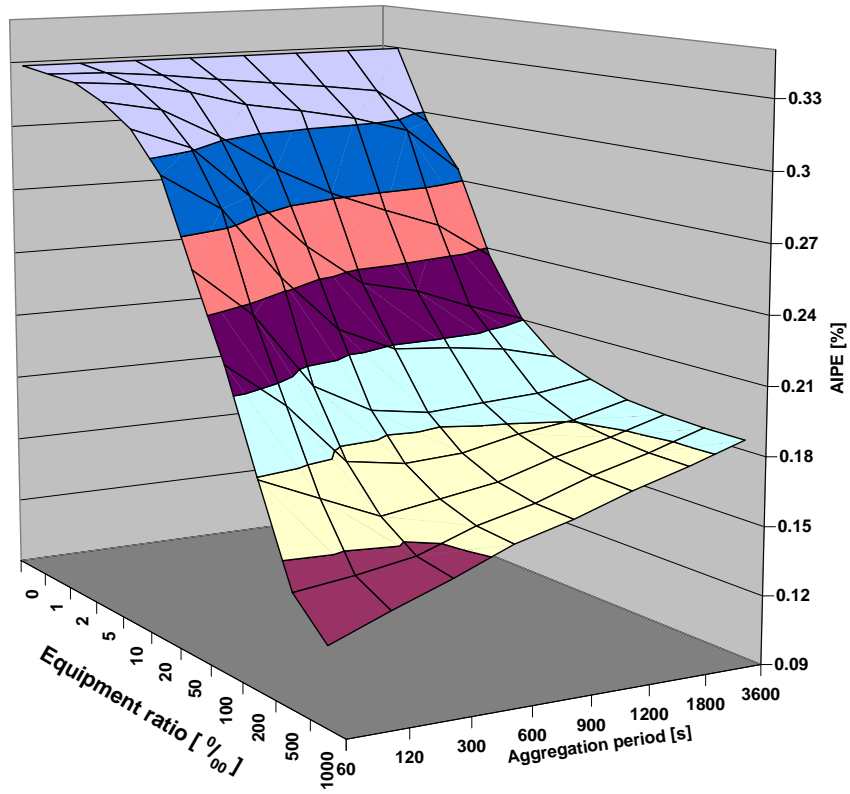


Figure 30 : Vision 3D de l'AIPE en fonction de l'ER et de l'AP pour une définition d'arcs classique (en haut) et In-out (en bas)

Jusqu'ici, cette analyse paramétrique a permis de montrer clairement qu'il existait pour chaque taux d'équipement une combinaison de d'AP et de définition d'arcs adéquate ce qui permet de relativiser les enseignements des nombreuses études considérant ces paramètres comme fixes. Il s'agit donc d'une approche clairement novatrice dans ce domaine. De plus, elle a permis de mettre en évidence que l'utilisation d'un indicateur basé sur des erreurs d'arcs pouvait induire des choix différents de celle d'un indicateur basé sur les erreurs d'itinéraires. Le second étant plus pertinent dans le cadre particulier de l'évaluation d'un SNDM, seul l'indicateur AIPE sera donc utilisé pour la suite de cette analyse paramétrique.

Il faut toutefois rappeler ici que, jusqu'à présent, seule la méthode de substitution Free Flow a été utilisée pour tirer ces premières conclusions. Si elle s'est avérée idéale pour isoler l'effet des autres paramètres sur les indicateurs elle n'en n'est pas moins la moins performante de toutes celles proposées. Une étude de ces différentes méthodes doit donc être ajoutée à l'état actuel de l'analyse.

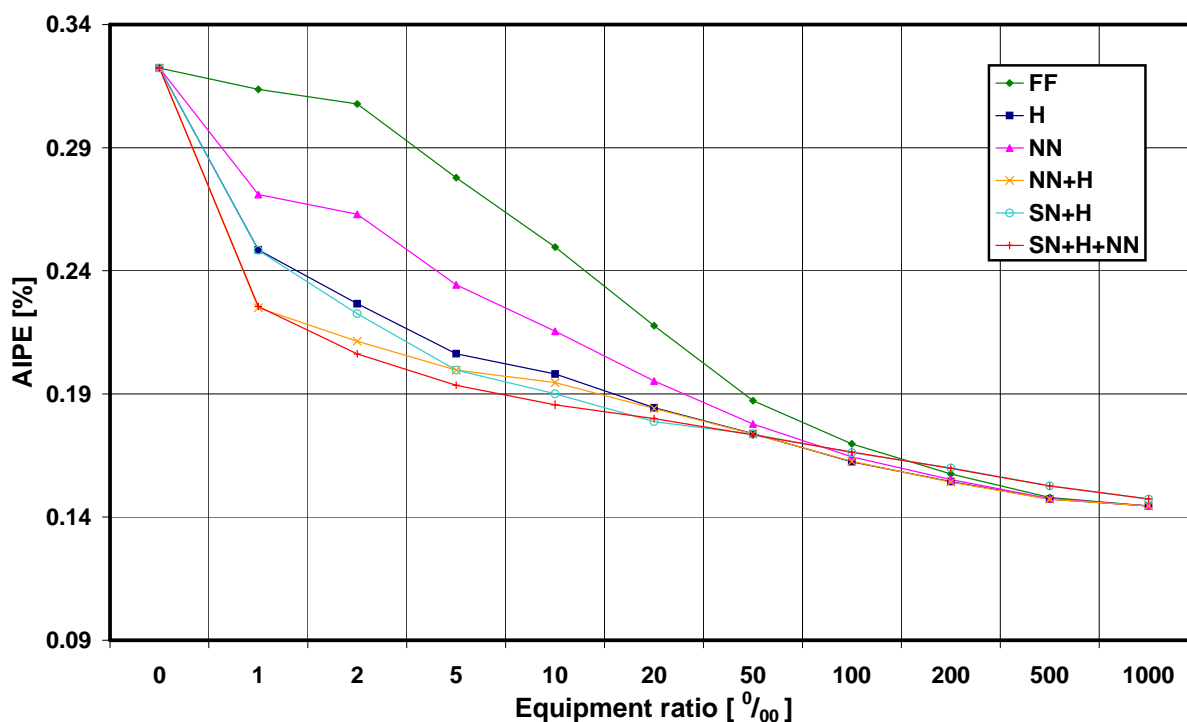


Figure 31 : AIPE en fonction de la méthode de substitution et du taux d'équipement pour une AP = 900 et une définition d'arcs in-out

La Figure 31 présente les valeurs d'AIPE en fonction des différentes méthodes et du taux d'équipement pour une AP fixée à 900 secondes et une définition d'arcs *in-out*. On rappellera ici qu'afin d'éviter d'alourdir cette analyse paramétrique, les performances de la méthode d'estimation combinée seront évaluées conjointement à celles de substitution.

Ce graphique permet tout d'abord de confirmer que la méthode *Free Flow* est de loin la moins performante (du moins dans ce cas particulier). On constate ensuite que la substitution par la méthode des réseaux de neurones ne prenant que les mesures du jour en compte (NN) propose certes une amélioration mais reste loin des performances des autres méthodes. La substitution par la valeur du profil historique (H) se montre, par exemple, nettement

plus intéressante. Ce fait démontre une fois de plus les qualités de la méthode d'estimation par FCD pour obtenir un bon profil historique. Un élément particulièrement satisfaisant est également mis en évidence par cette figure. Il s'agit de l'excellent comportement du réseau de neurones combinant les données du jour avec celles du profil historique (NNH). Fournissant des performances meilleures que la méthode NN et H, la démonstration qu'une combinaison adéquate de ces deux sources d'informations entraîne de meilleurs résultats est une nouvelle fois établie.

La méthode combinée n'étant pas une méthode de substitution, elle a été couplée avec celle du profil historique (CN+H) dans une première variante et avec le réseau NNH dans une seconde (CN+NNH). Dans ce cas particulier (AP=900, *in-out*), force est de constater que l'amélioration espérée n'est pas très importante. Elle présente même des résultats plus mauvais, ce qui était attendu, pour des ER élevés (>20%). Cette différence reste toutefois très limitée ce qui démontre un bon fonctionnement du réseau de neurones.

Au-delà de la comparaison entre les méthodes, la Figure 31 apporte un enseignement d'une grande importance. En effet, ce graphique permet de constater qu'avec la méthode de substitution adéquate (dans ce cas la NNH), il est possible de réduire d'un tiers l'erreur d'estimation de temps de parcours d'itinéraire avec seulement un ER d'un pour mille ! Mieux encore : si l'on considère la différence entre l'AIPE à ER=0 avec l'AIPE à ER=1000 (soit  $33-15=18\%$ ) comme étant la marge de progression possible, alors avec ce taux d'équipement de  $1\text{‰}$ , la moitié de cette progression peut-être réalisée ! Ce résultat met clairement en évidence le potentiel réel de la méthode d'estimation de temps de parcours par FCD.

On notera enfin que les différences entre les méthodes ne sont visibles que jusqu'à un ER d'environ 10%, valeur à partir de laquelle la proportion de mesures blanches est trop limitée pour qu'elles aient suffisamment d'influence sur l'AIPE.

	ER	0	1	2	5	10	20	50	100	200	500	1000
FF	AP	-	3600	3600	3600	3600	3600	900	600	600	60	60
	Link	-	cl	cl	cl	cl	in	cl	cl	in-out	in-out	in-out
	AIPE	0.3223	0.2953	0.2847	0.2292	0.2070	0.1924	0.1817	0.1691	0.1542	0.1292	0.0988
H	AP	-	3600	1800	1800	1200	900	600	600	300	60	60
	Link	-	in-out	in-out	in-out	in-out	in-out	in-out	in-out	in-out	in-out	in-out
	AIPE	0.3223	0.2156	0.2191	0.2047	0.1961	0.1844	0.1721	0.1610	0.1468	0.1193	0.0988
NN	AP	-	600	600	600	600	600	600	600	300	60	60
	Link	-	out	out	out	out	out	out	in-out	in-out	in-out	in-out
	AIPE	0.3223	0.2422	0.2394	0.2149	0.2004	0.1854	0.1765	0.1631	0.1485	0.1225	0.0988
NNH	AP	-	1800	900	600	600	300	600	300	300	60	60
	Link	-	in-out	in-out	in-out	in-out	in-out	in-out	in-out	in-out	in-out	in-out
	AIPE	0.3223	0.2152	0.2114	0.1995	0.1926	0.1834	0.1716	0.1607	0.1462	0.1203	0.0988
CN+H	AP	-	3600	1800	900	900	900	600	300	300	60	60
	Link	-	out	cl	in	in	out	out	out	out	out	in-out
	AIPE	0.3223	0.2099	0.2077	0.1944	0.1866	0.1778	0.1705	0.1615	0.1520	0.1300	0.1089
CN+NNH	AP	-	1200	900	900	600	300	300	300	300	60	60
	Link	-	in	in	out	out	out	out	out	in-out	out	in-out
	AIPE	0.3223	0.2096	0.2031	0.1913	0.1849	0.1790	0.1705	0.1608	0.1516	0.1312	0.1082

Tableau 8 : Les AIPE minimaux pour chaque combinaison ER / Méthode de substitution avec leur AP et définition d'arcs correspondantes

Après ces premiers enseignements, il faut maintenant aborder l'effet cumulé des méthodes de substitution et des autres paramètres (AP et définition d'arcs). Une représentation graphique mettant en évidence leur influence conjointe sur l'AIPE s'avérant difficile, la solution consiste à se rappeler ici de l'objectif final de cette analyse paramétrique : déterminer pour chaque ER la combinaison de paramètres permettant d'obtenir la valeur d'indicateur (dans ce cas l'AIPE) minimale.

Ainsi, pour chaque taux d'équipement et chaque méthode de substitution (et méthode d'estimation combinée), l'AIPE la plus petite a été reportée dans le Tableau 8 accompagnée de l'AP et de la définition d'arc correspondante. Pour une meilleure visualisation des résultats, les courbes des AIPE minimaux ont également été reportées sur la Figure 32.

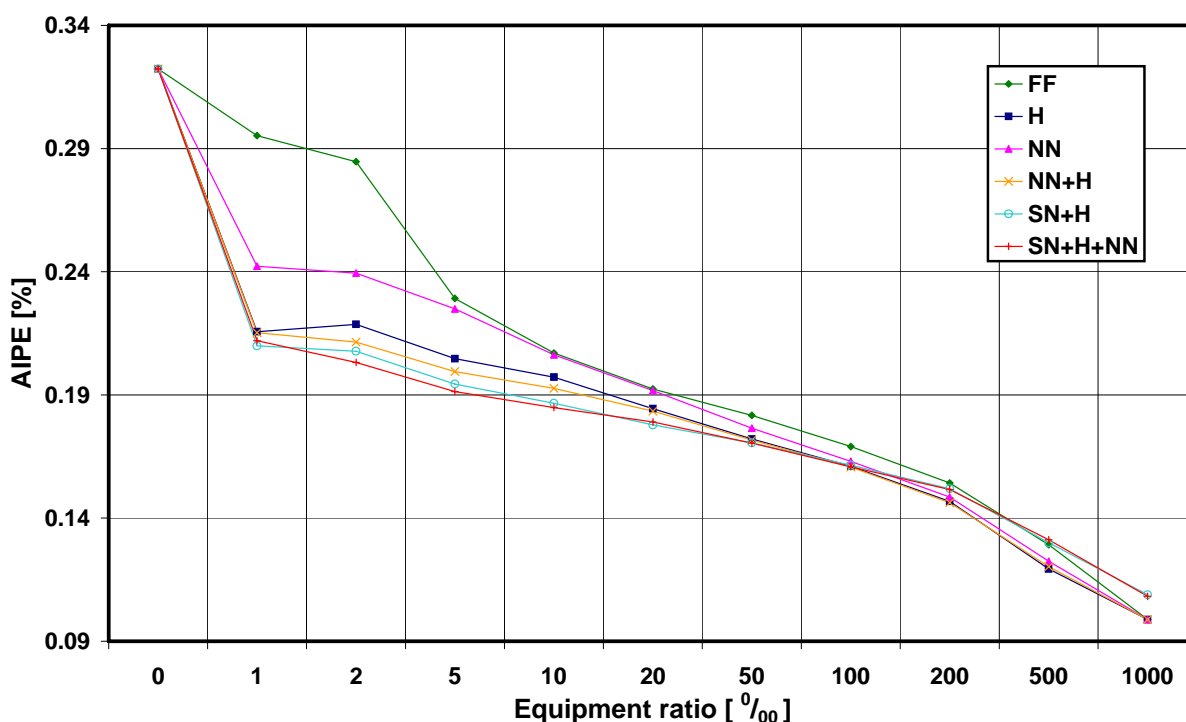
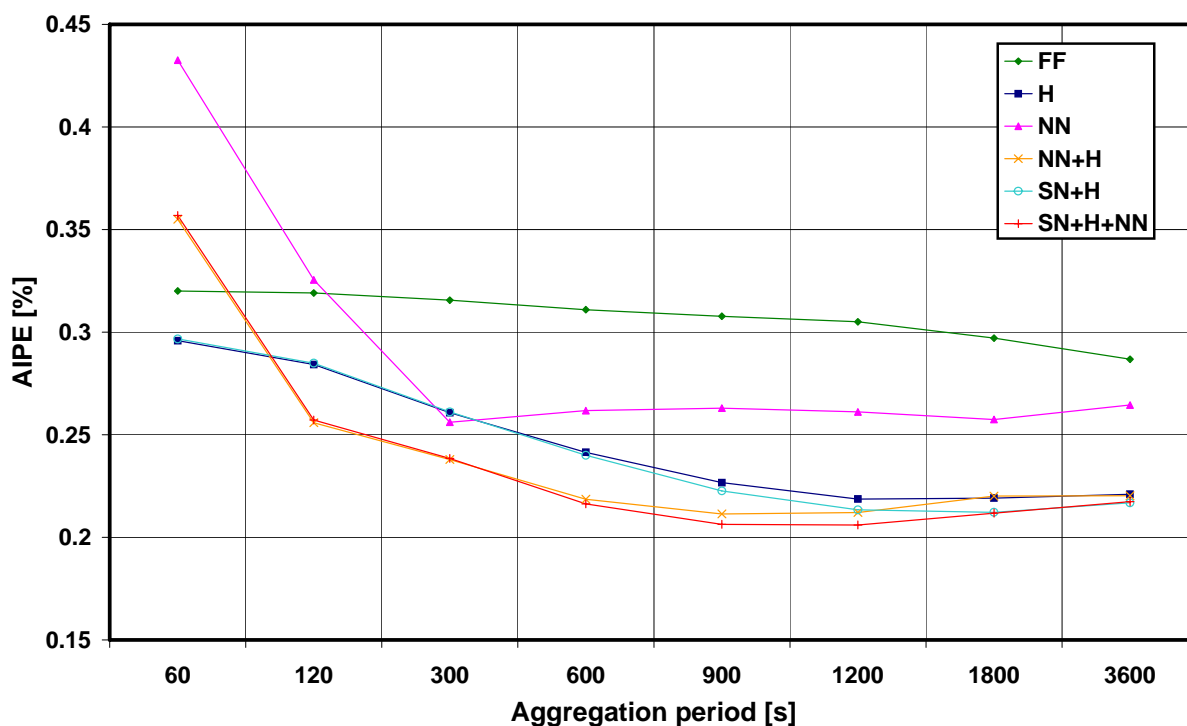


Figure 32 : Courbes des AIPE minimaux en fonction de la méthode de substitution et du taux d'équipement

Certains enseignements tirés du cas particulier de la Figure 31 se trouvent ici confirmés à un niveau général. Par exemple, le fait que la méthode NN soit la seule (à part la Free Flow évidemment) à ne pas utiliser le profil historique ne lui permet pas de fournir des performances aussi bonnes que les autres même si une nette amélioration par rapport au Free Flow est constatée. Ensuite, une moitié de la diminution possible de l'AIPE est bien obtenue dès le premier pour mille d'équipement. A noter que toutes les méthodes utilisant le profil historique présentent des valeurs très similaires d'AIPE pour ce point particulier. Toutefois, comme l'indique le tableau, ces valeurs sont obtenues avec des AP et des définitions d'arcs différents pour chaque méthode. Il est important de noter que dans le cas de la CN+NNH, qui présente l'AIPE la plus faible, une période d'agrégation de 20 minutes (1200 s) peut être adoptée pour ER=1, ce qui représente déjà une fréquence de rafraîchissement de l'information dynamique satisfaisante.

Cet assemblage de l'estimation combinée avec la méthode de substitution prédictive NNH est d'ailleurs la solution présentant les meilleurs résultats pour des ER allant jusqu'à 5%, bien que la différence avec l'assemblage CN+H soit très faible. Pour des ER plus élevés, l'estimation combinée ne semble plus porter ses fruits et l'application des seules méthodes de substitution (NNH ou H) est plus performante.

Une analyse attentive du Tableau 8 permet de tirer d'autres enseignements intéressants. Tout d'abord, on constatera que la méthode NN offre les meilleurs AIPE (pour des ER allant jusqu'à 100) lorsque l'AP est de 600 secondes. Cela démontre la nécessité d'une fréquence assez élevée de rafraîchissement des temps de parcours pour exploiter le potentiel de prédiction du réseau de neurones. Un autre point à souligner est le fait que la méthode du profil historique tout comme la prédictive NNH présentent toujours leurs meilleures performances avec une définition d'arcs *in-out*. Ceci permet de justifier d'une manière claire l'emploi de cette technique dont l'utilité n'avait jusqu'à présent été démontrée que sur des considérations purement théoriques. On notera toutefois qu'une différenciation d'arcs uniquement selon les sorties (définition *out*) semble plus adéquate pour des ER de 5 à 50 ‰ via l'utilisation de l'estimation combinée.



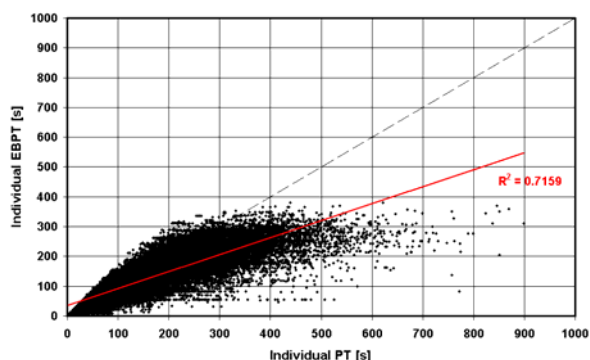
**Figure 33 : AIPE en fonction de la méthode de substitution et de la période d'agrégation pour un ER = 2 et une définition d'arc in-out**

Le Tableau 8 ne présentant que les AIPE minimaux, il serait intéressant de voir la relation entre l'AIPE et la période d'agrégation pour constater si ces valeurs minimales se détachent clairement des autres valeurs possibles. La Figure 33, présente, par exemple, l'évolution des AIPE de chaque méthode pour un ER = 2 et une définition d'arcs *in-out*. On y constate que toutes les solutions basées sur une méthode de substitution prédictive présentent des résultats mauvais, voire très mauvais (AIPE plus grands que pour le Free Flow !), pour des périodes d'agrégation de durée très courte. De plus, dans le cas particulier de la méthode NN une

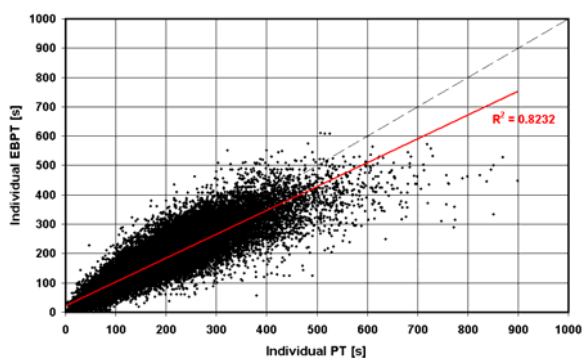
stagnation de la valeur d'AIPE à partir d'une AP de 300 secondes est constatée. L'analyse de la courbe offrant les meilleures performances (CN+NNH) montre que si l'on obtient bien une valeur minimale pour une AP de 1200, la différence avec les valeurs voisines est faible. Ainsi, par exemple, adopter une AP de 900 secondes n'impliquerait qu'une baisse de performance très limitée. Un tel constat démontre donc que les résultats proposés par le Tableau 8 doivent être utilisés de manière nuancée.

En complément à la visualisation des résultats présentés à la Figure 32, il serait intéressant de montrer une comparaison directe entre le temps de parcours estimé (EBPT) et réel (PT) de chaque véhicule simulé.

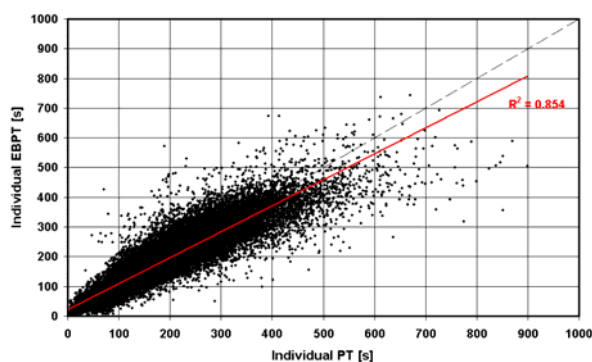
ER=0



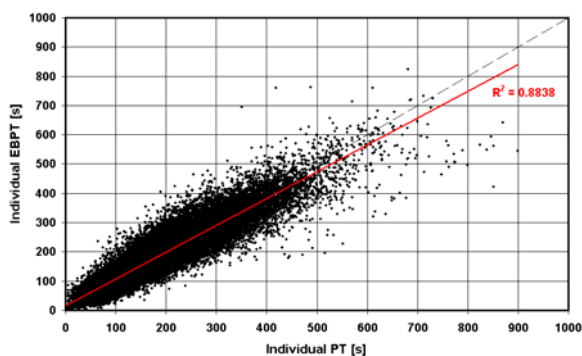
ER=1



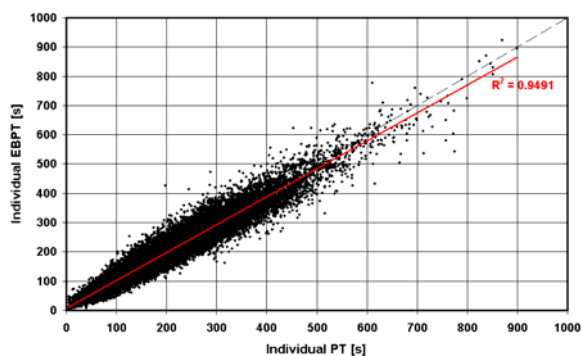
ER=10



ER=100



ER=1000



**Tableau 9 : Comparaison entre l'EBPT et le PT de chaque véhicule simulé pour différents ER**

Le Tableau 9, propose cette comparaison pour différentes valeurs de taux d'équipement. Il permet premièrement de constater une importante sous estimation des temps de parcours estimés lorsque ceux-ci sont uniquement les valeurs *Free Flow* (ER=0). C'est particulièrement le cas pour les trajets à plus longue durée. Le contraste entre ces résultats et ceux obtenus avec seulement 1 0/00 de véhicules équipés est frappant. Il confirme qu'avec un ER aussi faible, une nette amélioration de l'estimation est obtenue. Deuxièmement, le graphique présentant les résultats pour la totalité de la population des véhicules (ER=1000) illustre par-

faitement l'erreur d'approximation qu'implique l'utilisation de la somme des temps de parcours moyen d'arc (BPT) en lieu et place du PT, confirmant ainsi les remarques du § 7.1.1.1

### Les moyennes mobiles

L'utilisation des moyennes mobiles pour obtenir une réactualisation des temps de parcours plus fréquente sans changer la durée de la période d'agrégation avait été suggérée. Pour déterminer l'influence de cette technique sur la performance d'estimation de temps de parcours, un nouveau calcul des AIPE minimaux a été réalisé en utilisant, dans un premier temps, une valeur de  $\eta=2$ . Ces résultats sont présentés à la Figure 34.

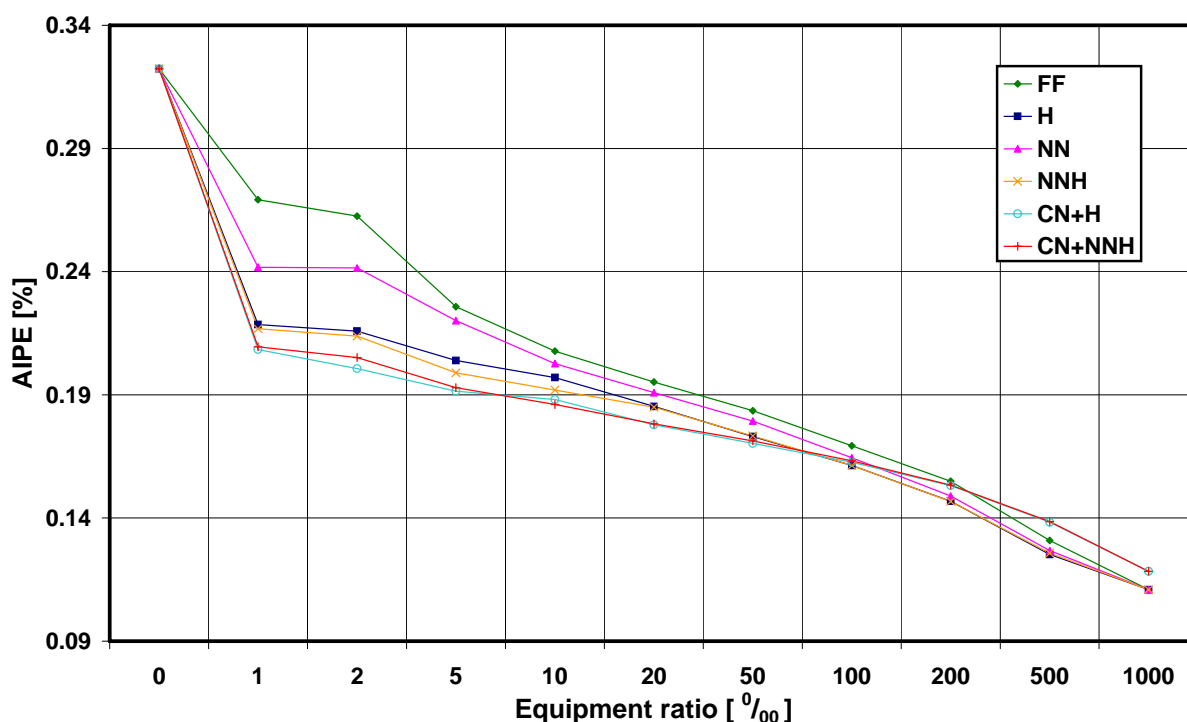


Figure 34 : Courbes des AIPE minimaux en fonction de la méthode de substitution et du taux d'équipement pour une  $CP=AP/2$

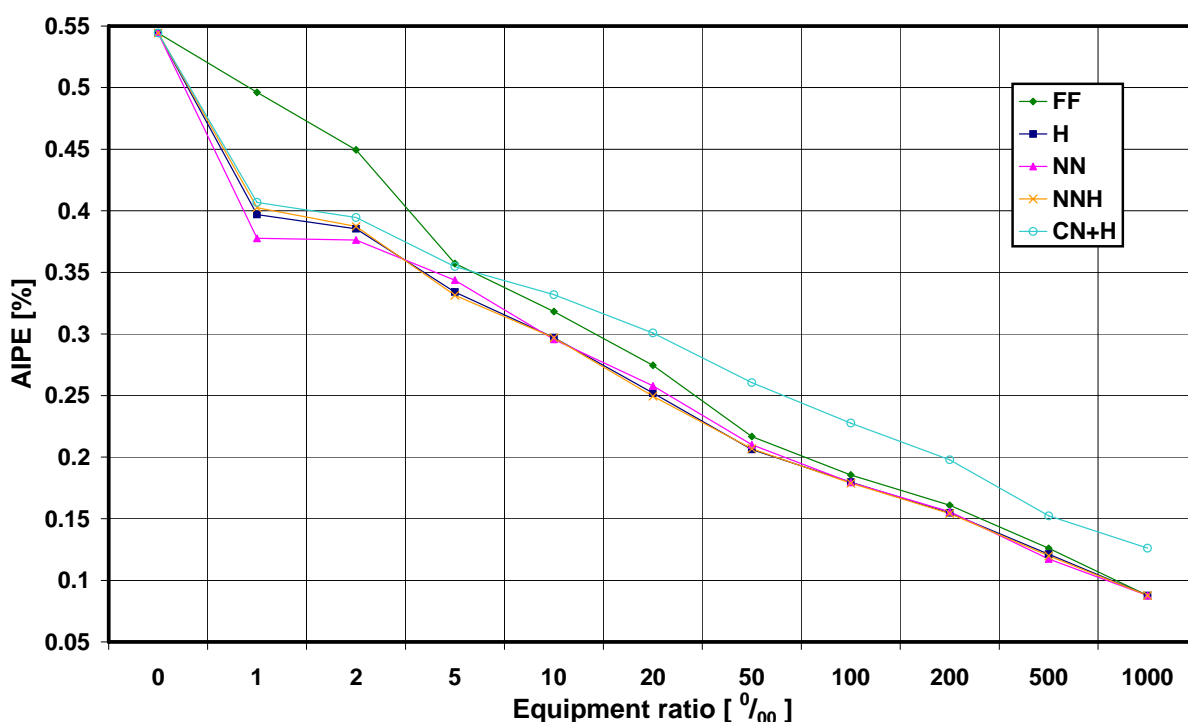
Une comparaison avec la Figure 32 ne montre que très peu de différences. Seuls les premiers points de la courbe FF présentent une certaine amélioration, ce qui ne présente pas un grand intérêt. Des résultats obtenus en appliquant un facteur  $\eta=3$  permettent enfin de confirmer que l'utilisation des moyennes mobiles n'offre aucune amélioration sensible des performances d'estimation de temps de parcours.

### Cas particulier d'un incident

Cette analyse paramétrique s'est jusqu'ici, comme indiqué en introduction à ce paragraphe, limitée à l'étude des résultats obtenus grâce à la simulation d'un jour ordinaire, c'est-à-dire sans incident particulier ou/et de demande de trafic anormalement différente de celle d'un jour « type ». Il est évident que cela explique en grande partie les bonnes performances générales de l'estimation de temps de parcours par FCD et, en particulier, de l'utilisation de méthodes (substitution ou combinée) faisant référence à un profil historique.

Il est donc nécessaire de connaître les performances de ces méthodes dans le cas où un (ou plusieurs) incident venait à modifier le comportement habituel du trafic. Pour ce faire, une simulation particulière a été réalisée (toujours sur la base du modèle « centre-ville ») ou, à chaque heure entière, un axe principal du réseau était complètement bloqué durant quinze minutes. Ce scénario a engendré la création de nombreuses zones de congestion, blocage de carrefours, reroutages, ... L'observation à l'écran de l'état du trafic lors de cette simulation a clairement permis de considérer ce scénario comme celui d'un jour très particulier comme il ne se présente que rarement dans la réalité. Evidemment, il s'agit d'un jugement relativement subjectif, aucune mesure réelle ne pouvant le confirmer, mais s'appuie sur une longue expérience du réseau acquise par l'auteur.

Comme pour le cas du jour ordinaire, un graphique regroupant les valeurs d'AIPE minimales pour chaque méthode a été réalisé. Il s'agit de la Figure 35.



**Figure 35 : Courbes des AIPE minimaux en fonction de la méthode de substitution et du taux d'équipement pour un jour avec incident**

Son observation permet immédiatement de constater que l'échelle des AIPE mesurée s'est agrandie avec un maximum (0.54) presque deux fois supérieur à celui d'un jour ordinaire (0.32). Ce maximum représente le cas où aucun véhicule équipé n'est présent sur le réseau et où seules les valeurs Free Flow peuvent être utilisées. Bien évidemment, les nombreux incidents et leur répercussion ont impliqué une importante baisse de la vitesse moyenne des véhicules traversant le réseau expliquant par là même cette augmentation d'erreur d'estimation. A l'inverse, la valeur minimale, soit lorsque les informations de la totalité des véhicules sont disponibles, n'est pas différente d'un jour ordinaire. Cela s'explique par le fait que lorsque ER=1000, l'AP permettant d'obtenir la meilleure AIPE est pour chaque cas de 60 secondes. Ainsi, seule la variabilité à court terme influence cette valeur. Si la variabilité à long terme est évidemment plus importante dans le cas avec incident que sans, ce résultat

montre qu'il n'en est pas de même avec celle à court terme qui ne semble donc pas sensible à ce type d'événement. Cet enseignement mériterait toutefois un approfondissement qui ne rentre pas dans le cadre de cette étude.

Quant aux performances des méthodes proposées, il est clair qu'elles sont, de manière générale, moins bonnes que dans le cas ordinaire du moins lorsqu'on les compare à la courbe Free Flow. Il faut néanmoins constater que la meilleure méthode pour un ER de 1<sup>0</sup>/<sub>00</sub> permet de réaliser déjà 38%  $((0.54-0.37)/(0.54-0.09))$  de diminution possible contre 50% dans le cas ordinaire ce qui est particulièrement encourageant.

On observe, par contre, que cette fois c'est la méthode NN qui propose les meilleurs résultats pour les faibles valeurs d'ER avant de se retrouver au même niveau que les autres à partir d'un ER de 5<sup>0</sup>/<sub>00</sub>. Ce s'explique évidemment par le fait que c'est la seule méthode ne se basant pas sur un profil historique et pouvant ainsi mieux s'adapter aux conditions très particulières du jour en question. Ce n'est pas pour autant que les autres méthodes présentent de mauvais résultats, démontrant ainsi que même pour des jours aux conditions de trafic très particulières, l'utilisation du profil historique dans une méthode de substitution offre de meilleures performances que la méthode Free Flow.

Par contre, ce graphique montre de manière évidente que l'utilisation de la méthode d'estimation combinée offre des performances très mauvaises dans ce cas particulier ! En réalité, il faudrait nuancer cette affirmation en disant que la méthode telle qu'elle a été calibrée ne présente pas de bonnes performances. En effet, il faut ici se rappeler que cette méthode s'appuie sur l'usage d'un réseau de neurones qui n'a été calibré qu'avec des valeurs provenant de jours ordinaires. Il est donc normal qu'il ne puisse pas être performant dans un cas pour lequel il n'a pas été entraîné ! Ces mauvaises performances s'expliquent donc par le fait que le réseau de neurones met trop de poids sur les valeurs du profil historique alors même qu'elles représentent un appui nettement moins solide que dans le cas d'un jour ordinaire.

Bien qu'ayant dans ce cas des conséquences moins importantes, il faut souligner que les NN et NNH ont également été calibrés sur la base de jours ordinaires uniquement. Bien que ce travail ne soit pas réalisé dans le cadre de cette étude, il serait intéressant de recommencer l'apprentissage des réseaux de neurones en incluant dans les lots de mesures quelques unes provenant de jours avec incidents. Il faudrait alors voir si une amélioration notable pourrait être enregistrée dans le cas des jours avec incidents sans que cela ne dégrade (trop) leurs performances pour les jours ordinaires.

L'auteur aimerait conclure ce paragraphe en rappelant que toutes ces analyses ont été réalisées sur la base d'une seule réplique de simulation par cas et un seul tirage au sort de véhicules équipés par valeur d'ER. Pour être parfaitement rigoureux et au vu des aspects fortement stochastiques de ces deux éléments, l'analyse devrait porter systématiquement sur plusieurs répliques et tirage au sort pour pouvoir observer le degré de variabilités de ces résultats. Cette tâche aurait représenté une masse de travail disproportionnée dans le cadre de cette étude. Quelques comparaisons ont toutefois été réalisées entre différentes répliques ou différents tirages au sort de véhicules équipés. S'ils ont montré qu'il y avait en

effet des différences (faibles) entre les valeurs d'AIPE, les enseignements qu'ils permettent de tirer restent eux inchangés.

#### 7.1.3.4 Le concept du SNA

Le concept du système de navigation auto-alimenté (**SNA**) repose sur la combinaison du système de navigation dynamique et de la récolte de temps de parcours par véhicules flottants.

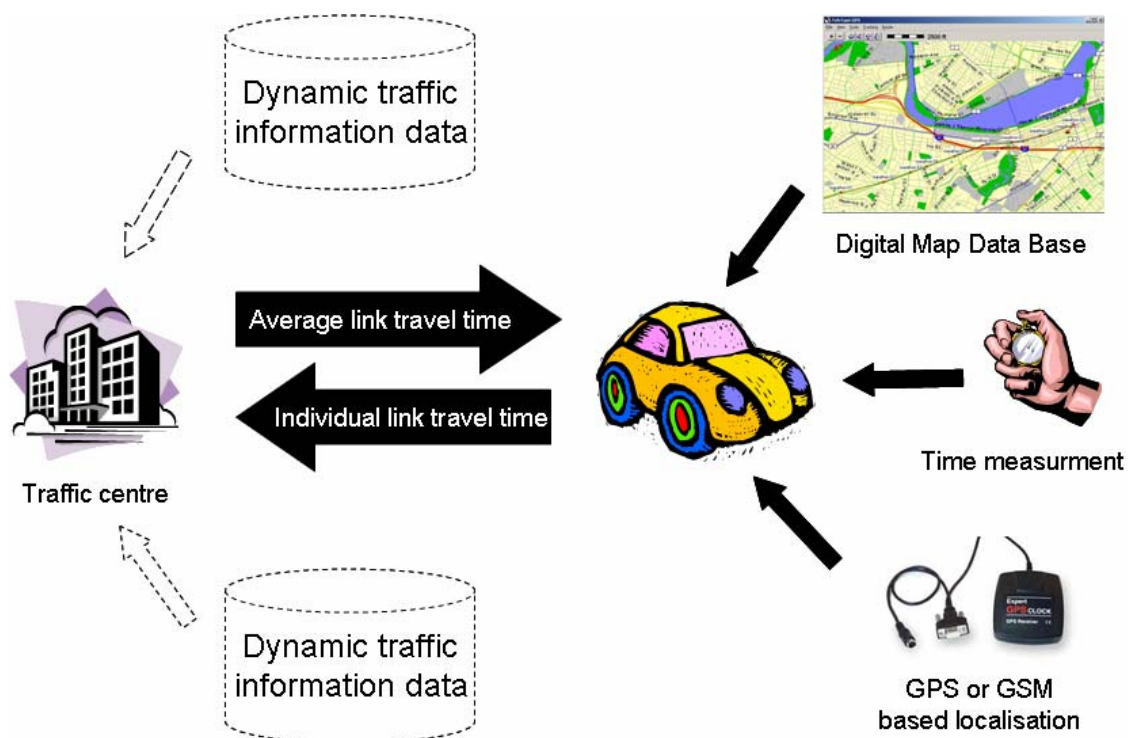


Figure 36 : Schéma simplifié du fonctionnement du système de navigation auto-alimenté

En fait, ces deux systèmes nécessitent un équipement embarqué très similaire. Seule la base de données cartographique, nécessaire pour le système de navigation, est facultative pour le FCD. Les avantages de disposer de cette base de données à bord ont toutefois été exposés précédemment.

On voit qu'une flotte de véhicules équipés d'un système de navigation dynamique pourrait être alimentée par des données provenant des mesures de temps de parcours effectuées par cette même flotte jouant cette fois le rôle de véhicules flottants. Cela justifie l'utilisation de l'adjectif "auto-alimenté".

Les principaux avantages du concept sont :

- une utilisation du même équipement pour la récolte et l'exploitation de l'information dynamique
- aucun équipement lié à l'infrastructure routière n'est nécessaire

Alors que ses limitations sont :

- une taille minimale (qui reste à déterminer) de la flotte de véhicules doit être atteinte pour que le service ainsi offert soit fiable
- l'adéquation avec la législation sur la protection des données privées

Si chacun de ces systèmes (DRG et FCD) fait l'objet de nombreux travaux de recherche, à la connaissance de l'auteur, aucun ne traite du cas particulier de leur combinaison suivant le concept du SNA, démontrant par là même le caractère innovant de cette étude. En effet, le fait que les véhicules guidés soient les mêmes que ceux qui fournissent l'information dynamique implique des répercussions non triviales sur les performances du système comme le montrera cette étude. Une simple addition des particularités des deux applications pour évaluer les performances du SNA serait erronée, car elle ne prendrait pas en compte leurs interactions mutuelles.

Le concept du SNA, de par son indépendance de tout équipement lié à l'infrastructure, semble attirer l'attention de compagnies privées, notamment, les constructeurs automobiles. En effet, une flotte de véhicules équipée du SNA peut s'apparenter à un club d'usagers exclusifs avec toutes les applications économiques que cela implique. La récente sortie du service InterNavi Premium Club de Honda<sup>16</sup>, dévoilé au salon de l'automobile de Tokyo en novembre 2003 - qui est clairement une première ébauche de SNA – en est un parfait exemple.

Dans l'optique d'une promotion de l'acquisition des temps de parcours par FCD en Suisse, l'idée de la combiner directement avec le SNDM paraît pertinente. Il s'agit toutefois de mesurer les conséquences qui pourraient être liées au fait que les receveurs d'informations et les fournisseurs sont les mêmes. Pour ce faire, l'évaluation des performances du SNDM dans sa version purement routière (première partie du chapitre 8) se fera en intégrant le concept du SNA.

#### **7.1.4 Autres techniques d'acquisition directe**

##### **7.1.4.1 Reconnaissances de plaques numérogiques**

Les systèmes de contrôle de vitesse par radar de la dernière génération comportent un module de reconnaissance automatique des plaques numérogiques. Ce système permet d'automatiser le traitement de l'effraction sans intervention humaine, réduisant ainsi le risque, constaté en France, de "disparition" de photos. En repérant un véhicule par cette caméra intelligente à l'entrée et à la sortie d'un tronçon l'on peut en déduire son temps de parcours et en déduire l'état de congestion. Un très faible nombre de véhicules identifiés est néces-

---

<sup>16</sup> Honda's Press Release, September 18, 2003.

saire pour avoir une vision correcte de la situation, comme l'a démontré le taux d'équipement en FCD.

Il pourrait également être envisagé de traiter les données des portiques de contrôle de la taxe poids lourds (RPLP)<sup>17</sup> qui ont été récemment installés sur le réseau national.

Le LAVOC se propose de lancer prochainement une étude faisant appel à cette reconnaissance automatique pour établir une matrice origine/destination sur une portion restreinte d'un territoire (échangeur autoroutier, quartier urbain, etc.).

## 7.2 Transports publics

En principe, les entreprises de transport s'occupent de l'acquisition des données qui les intéressent pour leur gestion du service. Il est souhaitable que les entreprises utilisent les standards disponibles pour que l'acquisition et la transmission de données soit compatible avec celui des autres entreprises, afin de pouvoir recueillir et traiter les données nécessaires dans une centrale régionale, voire nationale.

En fait, beaucoup des informations nécessaires sont déjà recueillies aujourd'hui, mais pas toutes sont utilisées pour l'information du voyageur. Des informations intéressantes en temps-réel sont proposées par les CFF : les retards actuels sont affichés dans l'horaire en ligne par internet<sup>18</sup>. Pour les voyageurs utilisant souvent les mêmes trains, une alarme par SMS les informe des retards. Il est également possible de demander des informations actualisées par rapport à un horaire personnalisé au format JAVA (sur téléphone portable, par exemple). Les transports publics lausannois (TL) proposent sur leur site internet l'état actuel de l'exploitation du réseau pour chacune des lignes<sup>19</sup>.

En principe, il existe une multitude d'informations dynamiques dans le domaine des transports publics. Ces informations sont utilisées dans un cadre local par l'entreprise concernée et sont souvent disponibles aux clients par différentes sources de communication. Ce qui manque à ce jour est la mise en réseau de toutes ces informations, afin de pouvoir les intégrer dans un système d'information multimodal régional.

Dans ce chapitre sont présentés différents moyens d'acquisition de données dans le cadre des transports publics.

### 7.2.1 Positionnement des véhicules et temps de parcours

Dans le cas idéal, le système d'acquisition des données mesure la position exacte de chaque véhicule par positionnement toutes les 10 à 30 secondes. Une unité de communication

---

<sup>17</sup> Redevance Poids Lourds liée aux Prestations

<sup>18</sup> <http://www.sbb.ch>

<sup>19</sup> [http://www.t-l.ch/actualite/corps\\_actualite\\_reseau\\_base.htm](http://www.t-l.ch/actualite/corps_actualite_reseau_base.htm)

transmet cette position à la centrale de gestion. Ainsi, les temps de parcours entre les stations peuvent être mesurés de manière assez détaillée. Les moyens les plus répandus pour le positionnement d'un véhicule sont les systèmes à balises et le positionnement par satellite.

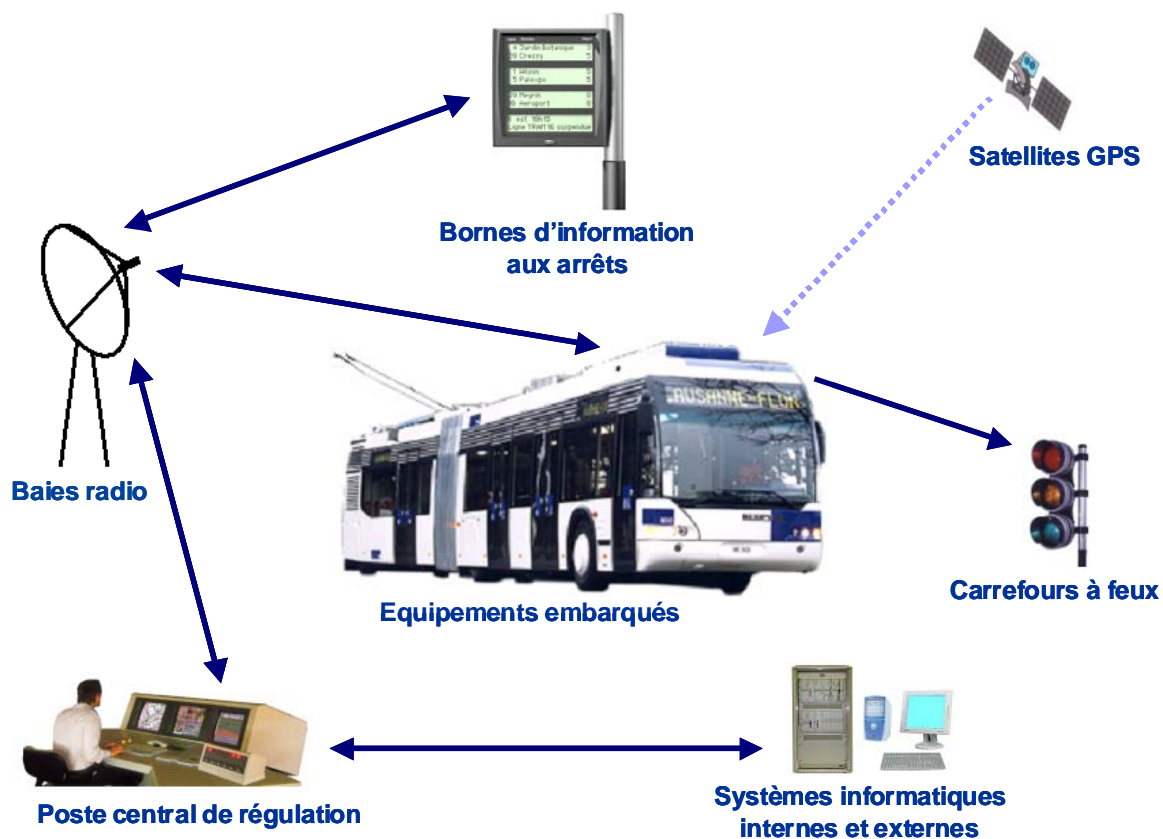
### **7.2.1.1 Balises**

Dans le premier cas, la partie importante des installations est fixée aux abords des routes. Il s'agit de balises actives qui détectent le passage aux points fixes d'un véhicule équipé d'un récepteur. Ce dernier permet d'identifier le véhicule, ainsi que la course qu'il est en train d'effectuer. Cette solution est très pratique pour faire des « annonces » de passage à certains endroits, comme les feux de circulation avec priorité pour les bus ou bien l'aiguillage des trolleybus. Par contre, ces installations, dispersées dans le réseau entier, demandent une maintenance délocalisée sur le terrain. En plus, en cas de changement de parcours (course spéciale, travaux, panne, etc.), l'entreprise ne dispose pas forcément de balises nécessaires pour suivre leurs véhicules.

Comme ces systèmes ne donnent des informations qu'au passage aux balises, le gestionnaire ne connaît pas la situation de l'exploitation entre les balises. Un véhicule pris dans la congestion ou arrêté pour une raison inconnue n'est pas détecté comme tel tout de suite. Pour pouvoir calculer le temps de parcours, le système doit prendre des hypothèses simplificatrices et peut utiliser soit le temps de parcours en flux libre (théorique selon l'horaire) ou celui du véhicule précédent. Selon la fréquence de la course et la densité des balises, cette procédure n'est pas satisfaisante pour donner un résultat fiable pour le temps de parcours.

### **7.2.1.2 Positionnement par satellite**

Le deuxième cas du positionnement utilise des capteurs satellites à bord des véhicules et transmet des informations diverses à la centrale soit par radio soit par le réseau GSM/GPRS. Ainsi, chaque véhicule devient un véhicule flottant (FCD, voir aussi § 7.1.3) de l'entreprise de transport. Le positionnement ne nécessite donc pas d'infrastructure aux abords de la route. Seule la transmission des données, si elle est effectuée par un réseau de communication propre à l'entreprise, nécessite des installations fixes. La figure suivante montre l'exemple du système d'aide à l'exploitation des transports publics de la région lausannoise (TL).



**Figure 37 : Exemple d'un système d'aide à l'exploitation**  
(Source : Transports publics de la région lausannoise)

La position des véhicules est déterminée à chaque intervalle de transmission de données. Si ce dernier est très élevé (de l'ordre de 15 à 30 secondes), ce système peut déterminer les temps de parcours instantanés et des éventuels retards d'une manière assez fiable. L'exploitant connaît ainsi l'état de son réseau à tout instant. Comme toute la technologie du positionnement et l'émetteur de données se trouvent dans les véhicules, ces informations peuvent être obtenues même en cas de changement de parcours ou pour des courses spéciales.

Un tel système de positionnement par satellite facilite non seulement la gestion de la flotte et de l'horaire, mais sert également de source d'information fiable pour renseigner les voyageurs.

### 7.2.2 Détection du type de véhicule

Il a déjà été mentionné que la connaissance du type de véhicule peut être très utile aux personnes handicapées et âgées, aux parents avec une poussette, ainsi qu'aux voyageurs transportant des bagages lourds et encombrants. Dans des systèmes de gestion récents, l'identification du véhicule se fait en général déjà à la sortie du dépôt, c'est-à-dire qu'un véhicule est assigné une série de courses qu'il doit effectuer le long de la journée. Par le positionnement, le gestionnaire connaît parfaitement et en tout temps où se trouve chaque véhicule.

### **7.2.3 Mesure du taux d'occupation**

Tout comme les congestions sur la route, une occupation élevée d'un véhicule de transports publics diminue le confort des voyageurs. Ceci est davantage le cas dès qu'il n'y a plus de place assise à disposition. La connaissance de ce paramètre peut donc intéresser certains groupes de voyageurs, comme les personnes âgées et handicapées.

Il est également important pour l'entreprise de transport, le gestionnaire du réseau et les décideurs de disposer de statistiques fiables du nombre de voyageurs transportés (avec billet ou abonnement).

Néanmoins, la mesure du taux d'occupation est plutôt difficile, surtout dans le cadre d'un transport local, en raison des montées et descentes fréquentes aux arrêts. Différents systèmes sont utilisés pour mesurer ce paramètre et on peut distinguer deux principes différents : la détection des entrées et des sorties, ou la détection de la présence des voyageurs dans le véhicule.

#### **7.2.3.1 Détection des mouvements**

Pour ce premier principe, l'entreprise de transports doit installer des détecteurs sur les portes de chaque véhicule. Ces détecteurs mesurent les passages dans les deux directions, afin de connaître le nombre de voyageurs entrés et sortis. Les types et le fonctionnement de ces détecteurs sont comparables à ceux utilisés pour le transport individuel (c.f. § 7.1.2.1). Leur fiabilité, par contre, est sensiblement inférieure, car premièrement, les voyageurs ne suivent pas des voies prédéfinies et deuxièmement, il peut avoir des personnes qui entrent et sortent à la même porte en même temps. Les technologies les plus répandues à ce jour se basent sur l'infrarouge, mais une détection par vidéo est également imaginable, au vu de l'évolution des méthodes de suivi du mouvement aléatoire des piétons. Il reste à analyser si ces caméras pourraient également servir à des fins d'observation de l'intérieur des véhicules.

Les CFF SA pensent équiper au moins 30 % de leurs véhicules de détecteurs infrarouges au niveau des portes, afin d'augmenter la fiabilité des données statistiques d'occupation de leurs trains [59].



**Figure 38 : Système de comptage par détecteurs infrarouges (Source : CFF SA [60])**

En principe, il serait également possible d'installer ces détecteurs de manière fixe aux arrêts. Ceci diminuerait le nombre de détecteurs nécessaires, mais certaines contraintes doivent être examinées : position de l'arrêt, conditions de luminosité, etc.

### **7.2.3.2 Détection de la présence des voyageurs**

Pour ce deuxième principe, des techniques d'acquisition directes et indirectes sont possibles. L'acquisition directe peut être effectuée par une reconnaissance vidéo de l'intérieur des véhicules. Ces caméras peuvent également servir à l'observation. Il est à craindre que lors d'une grande affluence de voyageurs, la qualité de la mesure diminue fortement.

La mesure de la variation du poids du véhicule est une possibilité d'acquisition indirecte et donne une indication sur l'occupation du véhicule. Ces détecteurs de poids devraient soit être installés au niveau des essieux soit au niveau des arrêts de bus par des balances automatiques dans la chaussée (WIM – « Weigh In Motion »).

### **7.2.3.3 La billettique automatique – Le projet EasyRide [61]**

La billettique automatique permet les deux principes de mesure du taux d'occupation. Dans le cadre du projet « EasyRide », différentes entreprises de transports ont testé la détection aux portes, ainsi que celle à l'intérieur des véhicules. Pour ce faire, les voyageurs étaient munis d'une carte magnétique qui repérait l'arrêt d'entrée et celui de sortie. La facturation des déplacements pourrait ainsi être effectuée de manière automatique sur une base mensuelle. Malgré des résultats encourageants, le projet de la détection automatique (« EasyAccess ») a été bloqué pour une durée indéterminée pour des questions de rentabilité et de manque de développement. Pour l'instant, les entreprises de transport continuent en direction d'un billet électronique (« EasyTicket »), qui est payé et contrôlé de manière traditionnelle, couplé à des distributeurs de billets standardisés.

#### **7.2.4 Traitement et distribution des données**

Le cas idéal d'un système de navigation multimodale dynamique consiste en une centralisation complète des données. Pour ce faire, les entreprises de transport doivent transmettre les informations de l'état d'exploitation – souvent déjà disponibles aujourd'hui – à cette centrale, qui les stocke et crée les profils historiques et statistiques nécessaires pour le SNDM. En complément des données recueillies sur les véhicules individuels, ces données sont à la base d'une gestion "intelligente" du trafic.

## 8 Evaluation des performances du système de navigation dynamique multimodal

### 8.1 La microsimulation comme outil d'évaluation

La simulation de trafic est un outil adapté pour l'évaluation des performances des systèmes de navigation routiers et, dans une moindre mesure, multimodaux. Elle peut en effet prendre en compte un réseau complexe et un trafic réaliste. Ce paragraphe explique les raisons de choix du microsimulateur AIMSUN pour cette étude et propose une brève description du modèle de réseau utilisé.

#### 8.1.1 Pourquoi la microsimulation ?

Les différents outils de simulation de trafic peuvent être regroupés en trois catégories<sup>20</sup>:

- **Les macrosimulateurs**

Statiques (demande et offre invariables dans le temps), ils modélisent le trafic comme étant un flux homogène caractérisé par des variables telles que le débit, la vitesse ou la densité du flux. L'écoulement de ces flux est régi par des lois simples, notamment celle de la conservation de la masse, celle définissant la vitesse comme étant le rapport du débit sur la densité et celle reliant le débit à la densité suivant des valeurs expérimentales. L'affectation du trafic se fait en respectant l'hypothèse de l'équilibre statique de Wardrop [62].

- **Les mésosimulateurs**

Ces simulateurs sont de type dynamique. Le paramètre "temps" est donc pris en compte. La représentation du trafic se base sur une description individuelle des véhicules mais dont les règles de progression s'appliquent à des "paquets" de véhicules. L'écoulement de ces paquets est régi par des lois similaires à celles des modèles macroscopiques.

- **Les microsimulateurs**

Comme ceux de la catégorie précédente, les simulateurs microscopiques sont dynamiques et représentent les véhicules de manière individuelle. Par contre, l'écoulement du trafic est cette fois régi par des lois comportementales mettant en relation les véhicules entre eux et les véhicules avec l'infrastructure. Il s'agit principalement des modèles de poursuite (car following) et de changement de voies (lane changing).

---

<sup>20</sup> Une description des modèles d'affectation propres aux différents types de simulateur est traitée au § 8.2

La présente étude le guidage des véhicules (ou utilisateurs) équipés doit être modélisé de manière réaliste tout comme le système d'acquisition de données dynamique par véhicules flottants. Pour ce faire, l'outil de simulation doit posséder les caractéristiques suivantes:

- représenter chaque véhicule de manière individuelle
- représenter les lignes de transport public
- modéliser la discontinuité des flux liée à la présence de feux de circulation
- mettre en évidence les différences de temps de parcours expérimentés par chaque véhicule (transport individuel et public)
- permettre d'attribuer un itinéraire différent à chaque véhicule
- avoir la possibilité de modifier les itinéraires en cours de route

Il s'avère donc que les simulateurs microscopiques sont les mieux à même de modéliser les éléments nécessaires à cette étude.

### 8.1.2 Pourquoi AIMSUN ?

Il existe une multitude de logiciel de microsimulation, la plupart ayant été développés à l'origine dans le milieu académique. C'est notamment le cas de AIMSUN [63] dont la genèse est liée aux travaux réalisés par l'Université Polytechnique de Catalogne à Barcelone dans le cadre de projet de recherche européen. Ce logiciel de simulation est actuellement commercialisé par la société Transport Simulation Systems<sup>21</sup>, toujours à Barcelone.

Cet outil a été sélectionné pour les raisons suivantes:

- En tant que produit commercial, il propose une interface soignée permettant une édition rapide et précise du réseau à modéliser.
- L'API<sup>22</sup> proposée permet une interaction complète et "on-line" entre une application externe et le simulateur. Cet élément est fondamental pour permettre de modéliser l'utilisation d'un SNDM.
- Les éléments du modèle d'affectation du trafic peuvent aisément être modifiés par l'utilisateur, permettant ainsi d'évaluer d'autres solutions que celles par défaut.
- Les chercheurs du LAVOC ont une connaissance approfondie de cet outil depuis plusieurs années favorisant ainsi un travail rapide et efficace.
- Des rapports privilégiés entre le LAVOC et les développeurs d'AIMSUN permettent certaines adaptations du logiciel aux besoins de l'étude.

---

<sup>21</sup> [www.aimsun.com](http://www.aimsun.com)

<sup>22</sup> Application Programming Interface

### 8.1.3 Le modèle de Lausanne

Afin que l'évaluation proposée dans ce chapitre ne se limite pas à une approche purement théorique, un modèle représentant avec suffisamment de réalisme un réseau existant est utilisé pour développer et valider les méthodes proposées. Comme le montre les chapitre 3 et 7, la plupart des études déjà réalisées sur les thèmes de la navigation dynamique et du FCD sont basées sur des réseaux de type autoroutier ou grands axes périurbains mais rarement sur des réseaux urbains. Afin de garder une approche générique, un réseau mélangeant ces trois types est donc retenu pour cette étude. Une attention particulière sera toutefois portée sur la partie purement urbaine du réseau.

Notre choix s'est rapidement porté sur le réseau de l'agglomération lausannoise, dont un modèle avait déjà été partiellement développé dans le cadre d'un mandat attribué par le service des routes nationales du canton de Vaud au LAVOC et au bureau Robert-Grandpierre & Rapp S.A. Ce choix a également été motivé par une connaissance étendue de la topographie du réseau modélisé mais surtout des conditions de trafic y régnant. Elle s'est avérée particulièrement utile lors de la phase de calibration du modèle et dans l'analyse des itinéraires choisis par les véhicules simulés.

La construction de ce modèle à grande échelle a été réalisée en deux étapes. Dans un premier temps, un réseau se limitant à la zone dite du "**centre-ville**" a été modélisé puis calibré. Il a été utilisé pour les travaux liés aux modèles d'estimation de temps de parcours par FCD qui sont décrits au § 7.1.3. L'extension du réseau centre-ville à l'ensemble de la région lausannoise a été réalisée ensuite. Ce modèle complet, appelé "**agglomération**", est utilisé spécifiquement pour les travaux de ce chapitre, soit l'évaluation des performances du SNDM. Les caractéristiques principales de ces deux modèles sont résumées dans le Tableau 10 alors que leurs limites géographiques sont représentées à la Figure 39.

Une description plus détaillée de la construction et de la calibration de ces deux modèles est disponible en annexe (§ 11.2)

	Centre-ville	Agglomération
Sections	1'351	16'006
Polysections	524	4'131
Taille de la matrice OD	80 x 80	292 x 292
Noeuds	241	1613
Carrefours à feux	49	148
Trafic de pointe [véh/h]	16'437	61'594
Heures simulées	5 (15h00 - 20h00)	3 (16h30 – 18h30)

**Tableau 10 : Caractéristiques de bases des deux modèles de Lausanne**

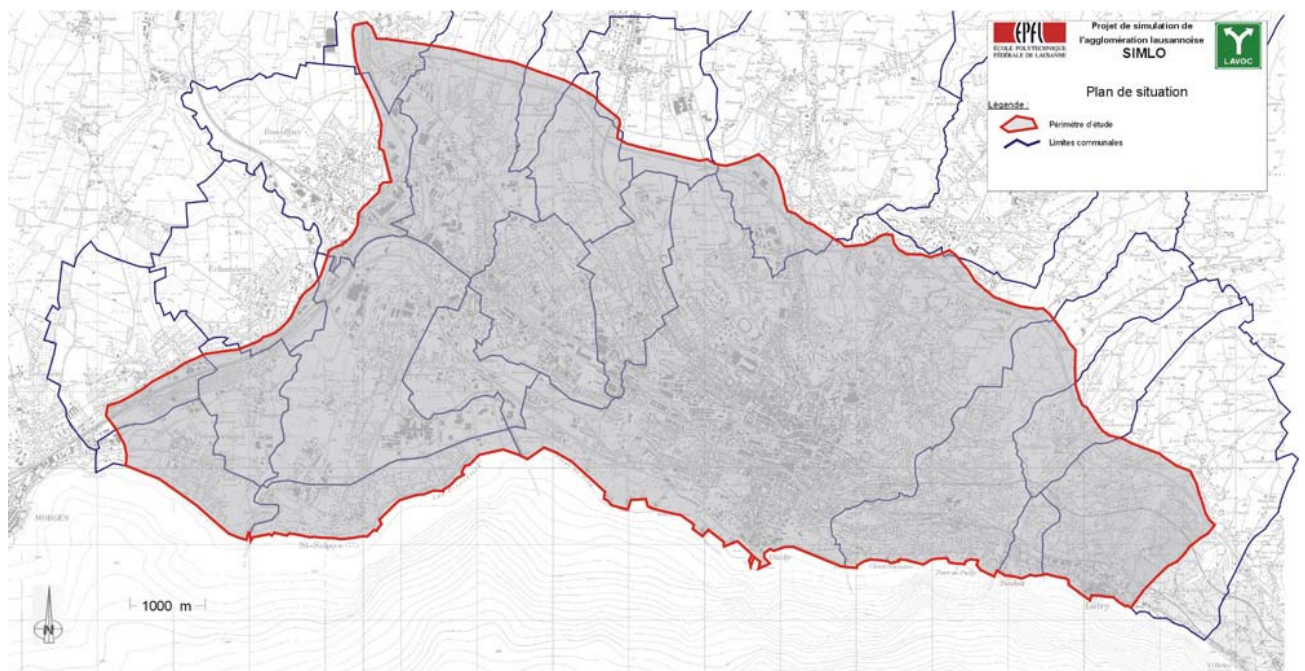
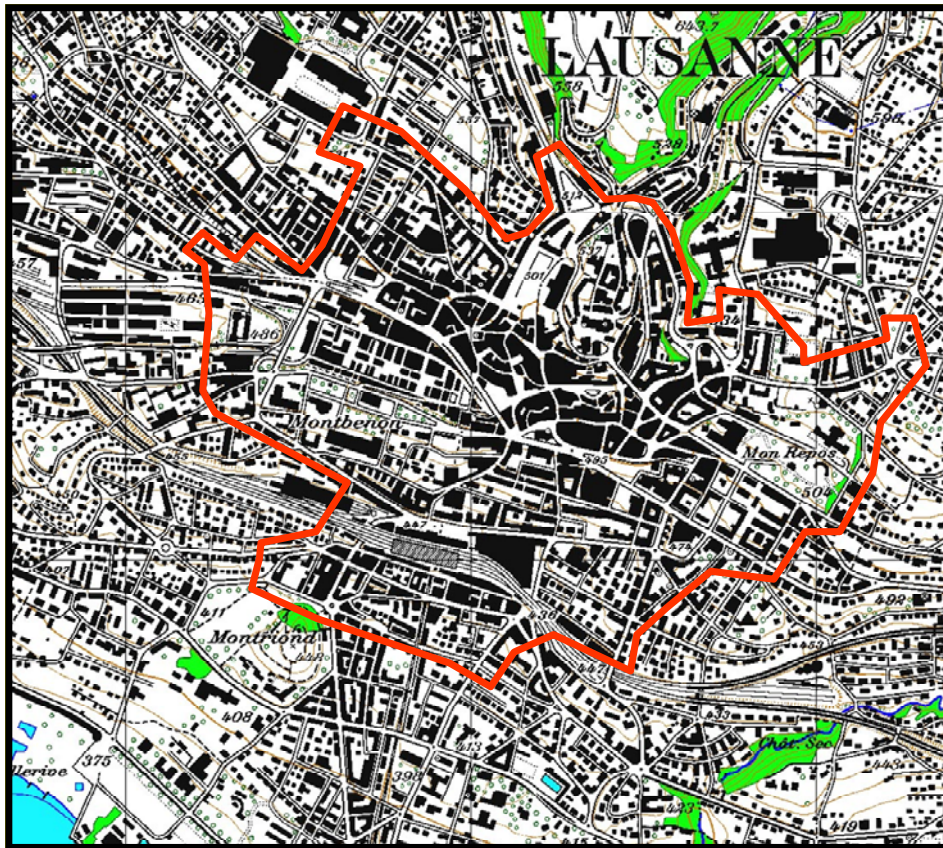


Figure 39 : Limites géographiques du modèle "centre-ville" (en haut) et "agglomération" (en bas)

## 8.2 Modèle d'affectation du trafic pour les véhicules non guidés

### 8.2.1 Remarques introductives

Cette partie de l'étude traite des véhicules n'étant pas équipés du SNA. Contrairement aux véhicules équipés, leur affectation sur le réseau est entièrement gérée par le simulateur AIMSUN. L'un des objectifs fondamentaux de cette étude est de comparer les performances des véhicules équipés aux non équipés. Les performances de ces derniers étant dépendantes du modèle d'affectation qui leur est appliqué, il est donc primordial de s'assurer que celui-ci représente de manière acceptable le comportement réel des usagers. Il devra, en outre, satisfaire une série de conditions propres aux objectifs de la présente étude.

Après un passage en revue des principaux modèles d'affectation de trafic proposés dans la littérature, un regard critique est porté sur les modèles habituellement utilisés dans la microsimulation. Le modèle proposé par défaut dans AIMSUN est analysé et ses limitations face aux nécessités de l'évaluation du SNA sont relevées. Une approche alternative, fondée sur la différenciation en catégories d'usagers et sur l'utilisation d'une connaissance historique des temps de parcours, sera alors proposée. Son application au cas particulier d'AIMSUN sera ensuite décrite avec une mise en évidence des difficultés techniques qu'elle entraîne.

### 8.2.2 Etat des connaissances

L'affectation de trafic consiste à définir la répartition des flux sur les différents itinéraires possibles en tenant compte de la demande entre chaque origine et destination. La chaîne de processus cachée derrière le terme générique d'affectation de trafic est illustrée à la Figure 40. Elle comprend la détermination du coût des arcs du réseau (CF) sur la base des temps de parcours, de l'algorithme de calcul des chemins les plus courts (SPA) et du modèle de choix de route qui distribue la demande entre les différents itinéraires (Route Choice, abrégé RC).

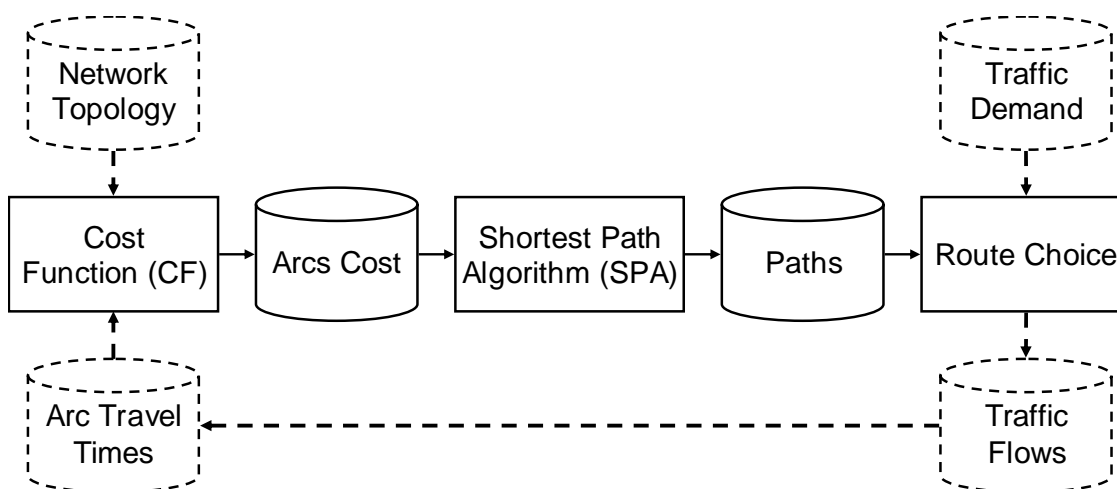


Figure 40 : L'entier de la chaîne de traitement d'un modèle d'affectation de trafic

Cette affectation est dite statique (Static Traffic Assignment, abrégé STA) ou dynamique (Dynamic Traffic Assignment, abrégé DTA). Dans le premier cas, la demande et l'offre sont considérées comme invariables dans le temps, la demande étant définie par une seule matrice Origines – Destinations (OD). Dans le second cas, la variabilité temporelle de la demande est prise en compte généralement par la détermination de plusieurs matrices OD, une par période de temps (discrétisation) durant laquelle la demande est supposée cette fois invariante. La variabilité de l'offre est représentée par une modification du coût des arcs au court du temps (également par discrétisation)

Suite aux nombreuses recherches ayant porté sur le thème du STA, plusieurs modèles ont ainsi été proposés. Certains articles (Sheffi [64] et Patriksson [65]) proposent une revue des modèles existant. Parmi ces modèles, celui de l'équilibre, proposé par Wardrop [62] est sans aucun doute le plus usité. Il se base sur le principe suivant: "The journey times on all routes used are equal and less than those which would be experienced by a single vehicle on any unused route", en d'autres termes "The average journey time is minimum". De manière concrète, cet équilibre s'obtient par convergence suite à un processus itératif d'affectation. Le modèle de STA se justifie dans le cadre d'étude à long terme ou pour de la planification.

Le problème inverse, soit l'estimation de la matrice OD à partir de mesures de flux de trafic, est également résolu par l'utilisation de modèles statiques, généralement de type macroscopique (comme le modèle EMME/2, voir annexe 11.2). Dans ce cas, les débits mesurés sur le terrain sont les données du problème et la matrice OD le résultat. Le nombre de points de mesures étant généralement inférieur à celui des paires OD, le problème est sous déterminé. Pour obtenir la convergence, d'autres contraintes doivent être fournies au modèle. On utilisera par exemple une matrice OD de base (tirée d'un recensement) et on cherchera la matrice OD qui respecte les conditions d'équilibre tout en se rapprochant le plus de celle de base.

Lorsque la demande est considérée comme variable dans le temps, ce qui est le cas par exemple pour les simulateurs de type microscopique ([20], [66] et [67]) ou mésoscopique [68], des modèles d'affectation de type dynamique sont nécessaires. Derrière le concept du DTA se cache une large panoplie de problèmes dont la littérature est riche d'exemples à l'image des travaux de Peeta [69] et Ziliaskopoulos [70]. Avec un tel concept, les flux de trafic (et donc le coût des arcs) deviennent également variables et les itinéraires minimisant les coûts de chaque paire OD doivent être régulièrement actualisés.

Pour simplifier, on peut dire que la majorité des modèles proposent une discrétisation du temps en différentes périodes durant lesquelles les conditions de trafic sont considérées comme stables, entraînant ainsi une affectation temporairement invariante.

Comme l'explique l'ouvrage du CERTU sur la simulation de trafic [71], il faut alors différencier deux types d'affectation dynamique :

l'affectation prédictive

l'affectation réactive

L'affectation prédictive se fonde sur l'hypothèse d'une certaine régularité quotidienne des conditions de trafic: les temps de parcours expérimentés un jour à une heure donnée fournissent une prédiction raisonnable des temps de parcours le jour suivant à la même heure.

Cette affectation est par conséquent itérative et cherche à atteindre une situation stable (similaire d'un jour à l'autre), une sorte d'équilibre dynamique (bien que la combinaison de ces deux termes puisse paraître paradoxale). Cette démarche est notamment celle appliquée par le simulateur microscopique VISSIM [72].

L'affectation réactive se base uniquement sur les temps de parcours expérimentés sur le réseau durant les périodes précédant l'affectation. L'itinéraire des véhicules est donc attribué sur la base des conditions observées. Ils peuvent en quelques sortes être considérés comme « guidés ». Cette approche est celle proposée par le simulateur AIMSUN. Si elle présente l'avantage de ne pas impliquer de travail itératif préalable, elle demande un certain doigté dans la calibration de ses paramètres pour éviter des instabilités ou oscillations des flux de trafic appelées fréquemment *flip-flop*.

### 8.2.3 Le DTA dans AIMSUN

Ce paragraphe décrit de manière synthétique le modèle de DTA habituellement utilisé dans AIMSUN [73]. Cependant, l'interface très ouverte du logiciel permet à son utilisateur de le modifier selon ses besoins, ce qui a permis l'utilisation concrète du modèle proposé au § 8.2.5.

#### 8.2.3.1 La fonction de coût

Le coût des arcs est recalculé à intervalles réguliers, appelés « cycles ». La fonction de coût utilisée prend comme principal input le temps de parcours moyen de l'arc. Cette statistique porte soit sur les mesures effectuées lors du dernier cycle ( $\tau-1$ ), soit sur plusieurs cycles passés (Number of Intervals). Le deuxième input est la capacité théorique de l'arc. Celle-ci ne joue aucun rôle sur l'écoulement du trafic sur l'arc et ne sert qu'à représenter un niveau hiérarchique. Il faut préciser que, dans AIMSUN, un arc est considéré comme étant une poly-section plus l'un de ses mouvements tournant à son extrémité (identique à une définition *out* telle que décrite au § 7.1.3.2).

Le coût de l'arc  $a$  au cycle  $\tau$ ,  $Cost_{a,\tau}$ , est alors donné par :

$$Cost_{a,\tau} = ALT_{a,\tau-1} \cdot [1 + \varphi \cdot (1 - \frac{Capacity_a}{Capacity_{max}})] \quad \text{Equ. 28}$$

Où:

$Capacity_{max}$  est la capacité de l'arc le plus important hiérarchiquement

$Capacity_a$  est la capacité de l'arc  $a$

$\varphi$  est le facteur de capacité, un paramètre à calibrer

De manière simplifiée, plus ce dernier est grand plus les véhicules circuleront sur les grands axes et éviteront les petites rues.

### 8.2.3.2 Le modèle de choix de route

Avant l'application proprement dite du modèle de choix de route, un set d'itinéraires doit être déterminé. AIMSUN puise dans les arbres d'itinéraires en mémoire pour trouver une série d'itinéraires différents reliant l'origine et la destination en question. Ils sont alors classés selon leur coût, ces coûts étant calculés en utilisant les dernières valeurs de coûts d'arcs disponibles. La taille maximale d'itinéraires pris en considération dans ce set est limitée par l'utilisateur. Le dernier itinéraire calculé en fait par ailleurs forcément partie puisqu'il est le premier du classement.

AIMSUN propose ensuite différents modèles de choix de route. Ces modèles déterminent la proportion de la demande en trafic qui sera envoyée sur chaque itinéraire du lot. Les plus usités sont le Logit et le C-Logit, le deuxième - proposé par Cascetta [74] - étant une extension du premier et pénalisant les itinéraires ayant une plus ou moins grande partie en commun.

Avec le modèle C-Logit, la probabilité  $P_k$  d'utiliser l'itinéraire  $k$  appartenant au lot d'itinéraire  $K_i$  est :

$$P_k = \frac{e^{\theta(V_k - CFA_k)}}{\sum_{j \in K_i} e^{\theta(V_j - CFA_j)}} \quad \text{Equ. 29}$$

où  $\theta$  est un facteur d'échelle (à calibrer) alors que le CFA, appelé « commonality factor » considère le degré de chevauchement des itinéraires. Il est défini par :

$$CFA_k = \beta \cdot \ln \sum_{j \in K_i} \left( \frac{L_{jk}}{L_j^{1/2} \cdot L_k^{1/2}} \right)^\gamma \quad \text{Equ. 30}$$

où  $L_{jk}$  est la longueur de la partie commune aux itinéraires  $j$  et  $k$ .  $\beta$  et  $\gamma$ , dont l'influence sur le modèle ne sera pas décrite ici, sont également des paramètres à calibrer. Par expérience, on les fixe généralement à respectivement 0.15 et 1.00.

## 8.2.4 Limitations des modèles classiques d'affectation de trafic dynamique

Face aux besoins qu'implique l'estimation des performances du SNDM, force est de constater que les modèles d'affectation classiques décrits ci-dessus présentent certaines limitations dont les principales sont les suivantes :

### 8.2.4.1 Affectation réactive

Si une affectation de type réactive offre des résultats tout à fait satisfaisants pour la majorité des études par microsimulation, son utilisation pour l'évaluation d'application ATIS et ATMS est plus discutable. En effet, la connaissance des récentes conditions de trafic régnant sur le réseau qu'ont les véhicules simulés permet à ceux-ci de réagir plus ou moins rapidement aux fluctuations propres au jour considéré. Dans la réalité, les automobilistes possèdent plu-

tôt une connaissance générique d'un jour type et ne perçoivent que très localement (visuellement) les conditions particulières du jour. L'affectation réactive peut donc s'avérer trop optimale par rapport à la réalité, les véhicules s'adaptant de manière trop prononcée aux particularités du jour.

Cette limitation est plus marquée encore lorsqu'un événement non récurrent intervient et modifie l'offre d'une manière non prévisible. Dans ce cas, la réactualisation des coûts des arcs permet, à plus ou moins brève échéance, aux véhicules simulés d'éviter la région perturbée par l'incident. Dans la réalité, une telle réactivité ne pourrait être obtenue que par des moyens d'informations trafic. Il ne s'agit donc pas d'un comportement de véhicules non informés. Certes, les automobilistes ayant une certaine expérience pourront essayer d'éviter une zone congestionnée si, visuellement, les conditions à l'approche de cette zone leur semblent anormales. Cela n'est toutefois pas comparable à la possibilité d'adopter un meilleur itinéraire dès son point d'origine, endroit où généralement rien ne laisse présager visuellement la présence de perturbations. L'utilité des ATIS et ATMS se justifiant principalement dans ce genre de cas, la prise en compte de cette limitation est donc primordiale.

Finalement, l'utilisation de l'affectation réactive pour les grands réseaux présente une limitation supplémentaire. En effet, si les temps de parcours entre les pairs d'origine destination sont nettement plus grands que la durée du cycle de recalcule des coûts, les conditions de trafic ayant entraîné le choix d'un itinéraire risquent d'être franchement différentes de celles que rencontreront les véhicules lors de leur trajet. Une stabilité des flux est dès lors plus difficile à obtenir. Pour pallier à ce problème il est courant d'accepter qu'une partie des véhicules puisse avoir accès aux coûts actualisés des arcs pendant leur trajet et ainsi pouvoir emprunter un nouvel itinéraire mieux adapté aux nouvelles conditions. Une telle approche fait évidemment croître la différence de connaissances entre les véhicules simulés et réels.

De manière générale, on peut conclure que l'affectation réactive n'est pas adaptée à la présente étude, car les capacités de réactions et d'adaptations aux conditions de trafic sont nettement supérieures à la réalité. L'utilisation d'une telle approche entraînerait forcément une sous-évaluation des performances du SNDM.

#### **8.2.4.2 Affectation prédictive**

Le processus d'apprentissage sur lequel repose l'approche prédictive semble plus conforme à la réalité. En effet, les véhicules ne sont affectés à des itinéraires que sur la base des conditions de trafic enregistrées les jours précédents. En ce sens, le niveau de connaissance des usagers est mieux modélisé. L'adaptation aux conditions particulières du jour étudié n'est pas possible. De plus, lorsqu'un incident intervient, les usagers continuent à choisir leur itinéraire comme s'il s'agissait d'un jour ordinaire, permettant ainsi d'obtenir une évolution du trafic plus conforme à la réalité. Il est vrai que l'impossibilité totale de réactions pourrait toutefois être jugée comme extrême.

Dans le cas du simulateur VISSIM [72], les coûts utilisés pour l'affectation du trafic durant la période  $\tau$  sont obtenus par une combinaison linéaire des coûts calculés durant la même période mais lors des deux itérations précédentes :

$$\text{Cost}_{a,\tau}^j = (1 - \alpha) \cdot \text{Cost}_{a,\tau}^{j-1} + \alpha \cdot \text{Cost}_{a,\tau}^{j-2} \quad \text{Equ. 31}$$

Bien que reposant à l'origine sur l'affectation réactive, AIMSUN propose également la possibilité d'une approche prédictive et itérative (Barcelo et Casas [75]). Dans ce cas, le coût des arcs à la période  $\tau$  de l'itération  $j$  est obtenu par une combinaison linéaire du coût de la période  $\tau$  de l'itération  $j-1$  avec celui calculé de manière habituelle, mais pour la période  $\tau+1$  cette fois-ci, de l'itération  $j-1$  (réactif) :

$$\text{IterCost}_{a,\tau}^j = (1 - \alpha) \cdot \text{IterCost}_{a,\tau}^{j-1} + \alpha \cdot \text{NormalCost}_{a,\tau+1}^{j-1} \quad \text{Equ. 32}$$

L'idée sous-jacente à cette approche est d'obtenir un apprentissage en combinant le coût espéré et le coût expérimenté.

Dans les deux cas, la "seed" (point de départ du générateur de nombres aléatoires) n'est pas modifiée d'une itération à l'autre. Une "seed" peut être considérée comme correspondant à un jour particulier. Ainsi, si la "seed" n'est pas changée, la demande est parfaitement identique d'une itération à l'autre. Il est donc faux de parler alors d'apprentissage basé sur la connaissance des jours précédents. En effet, il s'agit plutôt d'un processus d'apprentissage d'un jour en particulier. Le parallèle avec la réalité est alors difficile à établir car l'idée d'apprendre un jour particulier paraît dénué de sens, ce jour n'existant par essence qu'une seule fois ! Un processus itératif avec changement de "seed" serait donc plus réaliste mais devrait alors être abordé d'une manière différente.

Par conséquent, ces approches supposent une nouvelle fois une connaissance trop précise des conditions particulières du jour analysé et ne remplissent pas les conditions nécessaires à leur utilisation dans le cadre de l'évaluation d'un SNDM

### **8.2.4.3 Connaissance du réseau**

De manière générale, tous les outils de simulation mettent à disposition des usagers du réseau l'entier des routes codées. Les calculs d'itinéraires se font donc en prenant en compte l'ensemble des arcs du réseau. Dans la réalité, et en particulier dans le cas des grandes agglomérations, la connaissance du réseau par les usagers est plus limitée. Elle varie également en fonction de la catégorie d'utilisateur (voir paragraphe suivant). L'un des avantages des systèmes de navigation (qu'ils soient dynamiques ou non), et donc du SNDM, est la mise à disposition pour son utilisateur de l'entier du réseau. Si les véhicules non-équipés possèdent la même connaissance du réseau – comme c'est le cas dans une simulation - il est évident que les performances du SNDM risquent de se voir sous-évaluées lors d'une comparaison entre les deux types d'utilisateurs.

Certains simulateurs proposent de pénaliser les arcs à faible capacité (donc de faible niveau hiérarchique) en pondérant leur temps de parcours. C'est le cas notamment d'AIMSUN, comme expliqué au § 8.2.3.1. Cela n'en reste pas pour autant une approche globale et non ciblée pour laquelle la connaissance, même pondérée, du réseau est totale.

Une alternative réaliste n'est pas facile à trouver, d'autant plus que la connaissance réelle du réseau par un usager varie dans l'espace : elle sera nettement meilleure dans les zones autour de son lieu de travail et de son domicile que pour le reste du réseau. Une solution sera proposée au § 8.2.5

### **8.2.4.4 Catégories d'utilisateurs**

Comme cela a déjà été mis en évidence, le choix d'un itinéraire est très variable d'un usager à l'autre. Au-delà des considérations comportementales, cette variabilité est principalement due à la différence de connaissances des conditions de trafic et topologique du réseau. Appliquer un même modèle d'affectation de trafic à l'ensemble des véhicules simulés ne correspond donc pas à la réalité et une décomposition en catégories d'utilisateurs est donc nécessaire. De plus, une comparaison des performances des véhicules équipés du SNDM avec celles de plusieurs catégories d'utilisateurs apporterait des enseignements plus pertinents. La problématique des types d'utilisateurs ici soulevée n'est pas une limitation des modèles en soi, certains simulateurs (comme AIMSUN par exemple) permettant en effet de différencier la CF et le RC par types de véhicules. Il s'agit plutôt d'une remarque sur une non-utilisation régulièrement constatée lors de ce type d'étude des possibilités offertes par les simulateurs.

## **8.2.5 Approche basée sur l'utilisation d'un profil historique et des catégories d'utilisateurs**

Le présent paragraphe propose une série de modifications ou de compléments aux approches décrites ci-dessus, ceci dans le but de réduire ou de supprimer l'impact des limitations mises en évidence concernant le réalisme des modèles de simulation. L'approche ainsi proposée se base sur une affectation de type prédictive à apprentissage itératif, jugé plus adéquat que la réactive. Les véhicules ne disposent alors que d'une connaissance historique

des conditions de trafic, la méthode utilisée pour obtenir ce profil historique différant par contre de celle décrite plus haut.

Avant de décrire cette méthode (§ 8.2.5.2), une décomposition en trois catégories d'usagers est préalablement proposée. Elle décrit quelles sont les différences de connaissances entre ces usagers et comment elles sont prises en considération.

### **8.2.5.1 Les catégories d'usagers**

La motivation d'une décomposition de la demande en catégories d'usagers a été abordée au § 8.2.4.4. Si l'idée de base semble difficilement discutable, sa réalisation concrète est plus difficile. Concernant la modélisation des comportements, ils peuvent être obtenus par une définition adéquate des fonctions de coûts (CF) pour chaque type de véhicule. Le présent paragraphe se limite à une description textuelle de leurs caractéristiques. Une présentation détaillée de ces CF sera présentée dans le cas concret de l'application avec AIMSUN (§ 8.2.6).

Le problème majeur d'une telle approche tient avant tout du manque de connaissance quant à la proportion qu'occupe chacune de ces catégories dans la demande totale. Les recherches à ce niveau sont très limitées, les moyens techniques pour mesurer ces proportions n'ayant pas encore été identifiés. Il s'agit à n'en pas douter d'un domaine de recherche à développer dans le futur.

#### **Les "touristes"**

Les usagers appartenant à cette catégorie sont considérés comme des "visiteurs" du réseau. N'étant aucunement habitués aux conditions de trafic y régnant, ils ne peuvent que se baser sur la visualisation d'une carte ou des panneaux indicateurs pour choisir leur itinéraire.

Ils font alors l'hypothèse d'une vitesse moyenne de type *Free Flow* sur tous les arcs. Ils n'ont donc aucune connaissance du profil historique. Leur faible connaissance de la topologie du réseau les pousse à rester sur les grands axes. Les routes de faible niveau hiérarchie ne sont alors utilisées que pour rallier les axes principaux depuis leur origine ou pour accéder à leur destination.

#### **Les "experts"**

Ce type d'usagers est l'opposé de la catégorie décrite précédemment. Il s'agit d'usagers parfaitement habitués au réseau et aux conditions de trafic y régnant.

Ils ont donc un accès total aux profils des temps de parcours historiques et à la totalité des arcs du réseau. Seules des considérations relatives au confort de conduite pénalisera (faiblement) l'utilisation des petites rues au profit des grands axes, la minimisation des temps de parcours restant leur objectif principal.

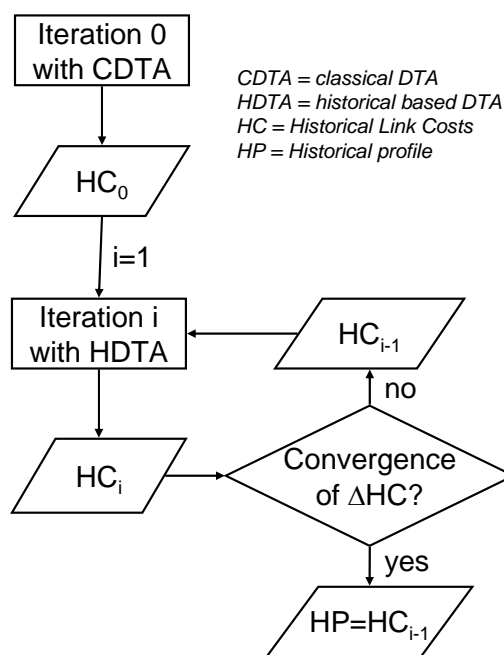
## Les "standards"

Les usagers "standards", ou normaux, ont un niveau de connaissance se situant entre celui des experts et des touristes. S'ils ont une bonne notion des conditions de trafic régnant régulièrement sur le réseau, contrairement aux touristes, cette connaissance est toutefois incomplète ou approximative. Des erreurs dans l'évaluation des situations sont donc fréquentes.

Leur niveau de connaissance de la topologie du réseau n'atteint pas celui des usagers experts et on leur prête une réticence plus importante à utiliser des petites rues ne permettant pas de sortir d'une origine ou d'atteindre une destination. Contrairement aux deux premières catégories, les différences de niveau de connaissance entre les véhicules de la même catégorie sont nettement plus marquées. La difficulté majeure liée à la modélisation de cette catégorie est de fournir une fonction de coût permettant de quantifier le niveau variable de connaissance du profil historique.

### 8.2.5.2 L'élaboration du profil historique

Comme expliqué précédemment, un processus itératif sans changement de "seed" ne permet pas d'obtenir une connaissance historique d'un jour "type" mais plutôt d'un jour particulier. L'approche présentée ici propose d'obtenir le profil historique d'un jour "type". Il est illustré par la Figure 41.



**Figure 41 : Processus itératif d'obtention du profil historique**

Dans un premier temps, N réplifications (ou run de simulation) sont effectuées, chacune ayant une "seed" différente. Le modèle d'affectation utilisé pour ces premières simulations peut être de type réactif ou, plus difficilement, de type prédictif à "seed" fixe. Une moyenne des coûts des arcs calculés pour les N réplifications est alors réalisée. Ces coûts moyens (HC) sont ensuite utilisés comme inputs pour les N réplifications de l'itération suivante. Les "seeds"

de ces N nouvelles répliques sont différentes de celles des répliques de l'itération précédente. Ainsi le coût d'un arc a pour la période  $\tau$ , la réplique j et l'itération i sera :

$$\text{Cost}_{i,a,\tau}^j = \text{HC}_{i-1,a,\tau} \quad \text{avec} \quad j \in N \quad \text{Equ. 33}$$

Si les fonctions de coûts habituels sont utilisées lors de la première série de N répliques, elles sont substituées par les CF par type de véhicules lors des itérations suivantes.

A la fin de chaque itération, la différence entre les coûts  $\text{HC}_i$  et  $\text{HC}_{i-1}$  est calculée comme suit :

$$\Delta \text{HC}_i = \sqrt{\frac{\sum_{a \in A} \sum_{\tau \in P} (\text{HC}_{i-1,a,\tau} - \text{HC}_{i,a,\tau})^2}{A \cdot P}} \quad \text{Equ. 34}$$

où A et P sont respectivement le nombre d'arcs et le nombre de périodes.

Ce processus d'apprentissage permet une diminution plus ou moins régulière de cette différence au fil des itérations avant de se stabiliser vers une valeur proche de zéro. Une telle stabilisation équivaut à dire que les temps de parcours moyens  $\text{HC}_{i-1}$  utilisés comme connaissance pour l'affectation du trafic pour les N jours simulés sont similaires aux temps de parcours expérimentés et moyennés sur ces N jours. Le profil historique ainsi obtenu est donc représentatif des conditions de trafic régnant, en moyenne, lors d'un jour "type" et non un jour particulier.

## 8.2.6 Application dans le cas d'AIMSUN

### 8.2.6.1 Fonctions de coût (CF)

Comme indiqué précédemment, AIMSUN permet à son utilisateur de proposer ses propres fonctions de coût, qui plus est, de les différencier par types de véhicules et par types d'arc. Cette fonctionnalité a ainsi permis de décrire les fonctions de coût génériques suivantes pour chaque catégorie d'usagers :

#### Les touristes

Pour cette catégorie, la fonction de coût est égale au FLT (voir § 0) multiplié par le terme de pondération de capacité pour lequel un  $\varphi_t=10$  a été choisi pour favoriser fortement l'usage des routes à haut niveau hiérarchique :

$$\text{Cost}_{a,\tau} = \frac{L_a}{FS} \cdot [1 + \varphi_t \cdot (1 - \frac{\text{Capacity}_a}{\text{Capacity}_{\max}})] \quad \text{Equ. 35}$$

Pour les mouvements tournant entrant sur une section de capacité faible (les "street 30" du modèle "centre-ville") et provenant d'une section d'un niveau hiérarchique supérieure, ce coût est multiplié par un facteur 100 (ou plus grand). Ceci permet de limiter strictement

l'usage de ces petites routes à leur stricte nécessité (accès à la destination). En d'autre mot, le transit y devient d'un coût prohibitif.

### Les experts

La fonction de coûts des véhicules experts est la valeur du profil historique multiplié par le terme de pondération de capacité. Dans ce cas, un  $\varphi_e=2$  a été choisi de manière à ne refléter que la baisse de confort induite par l'utilisation des petites routes.

$$\text{Cost}_{a,\tau} = \text{HC}_{a,\tau} \cdot \left[1 + \varphi_e \cdot \left(1 - \frac{\text{Capacity}_a}{\text{Capacity}_{\max}}\right)\right] \quad \text{Equ. 36}$$

### Les standards

Pour les usagers standards, une expression similaire à celle de la fonction de coût des experts est utilisée. Le coût provenant du profil historique est toutefois multiplié par un paramètre aléatoire  $\sigma$  extrait d'une distribution uniforme bornée entre  $1-\beta$  et  $1+\beta$ . Ce paramètre sert à modéliser l'erreur d'appréciation des temps de parcours historiques propres à cette catégorie d'usagers.

$$\text{Cost}_{a,\tau} = \sigma \cdot \text{HC}_{a,\tau} \cdot \left[1 + \varphi_s \cdot \left(1 - \frac{\text{Capacity}_a}{\text{Capacity}_{\max}}\right)\right] \quad \text{avec } \sigma \in [1-\beta, 1+\beta] \quad \text{Equ. 37}$$

Le paramètre  $\varphi_s$  a été fixé à 4 de manière à pénaliser d'une manière modérée l'utilisation des routes de faible niveau hiérarchique.

La valeur du paramètre  $\beta$  permet de quantifier l'amplitude de cette erreur d'appréciation. Dans le cas particulier de cette étude, il a été fixé arbitrairement à 0.2, une erreur comprise entre -20% et +20% étant donc systématiquement appliquée à la valeur réelle du profil historique.

#### 8.2.6.2 Test de convergence

Une application concrète de ce modèle d'affectation de trafic pour le réseau « centre-ville » de Lausanne a été effectuée. Vu l'absence de donnée permettant d'effectuer une décomposition de la demande en trois catégories sur des bases chiffrées, le choix arbitraire suivant a été opéré :

- touristes : 20%
- experts : 20%
- standards : 60%

Une fois les fonctions de coûts modifiées et la demande ainsi définie, le processus itératif a été initié. De nombreuses tentatives ont alors été menées - en variant les "seeds" - sans toutefois parvenir à stabiliser complètement le processus: une convergence n'a pas pu être atteinte. Si les deux (voir trois dans certains cas) premières itérations ont généralement per-

mis une diminution du  $\Delta HC$  et engendré des conditions de trafic jugées réalistes, les suivantes se sont caractérisées par une saturation partielle voir complète du réseau. L'apparition fréquente de « grid-lock<sup>23</sup> » a été notamment observée. L'utilisation des coûts enregistrés lors de ces itérations n'était donc plus possible pour les itérations suivantes.

Une série de modifications des différents paramètres spécifiques à l'affectation de trafic a été réalisée sans pour autant pouvoir améliorer de manière notable la situation. L'impossibilité d'obtenir une convergence totale pour le réseau modélisé peut avoir différentes origines, combinables entre elles :

**1)** Le manque d'informations permettant de déterminer de manière objective les différents paramètres propres au modèle proposé (la proportion d'utilisateur par catégorie, les coefficients  $\varphi$ , l'amplitude d'erreur d'appréciation  $\beta$  pour les usagers standards,...) a impliqué une série de choix se basant uniquement sur une approche intuitive de l'auteur.

**2)** Le réseau du centre-ville présente une densité élevée d'arcs relativement courts qui ne permettent pas le stockage de nombreux véhicules. Lorsque la différence entre la capacité d'un de ces arcs et le volume de véhicules désirant l'emprunter est notable, la file d'attente induite se propage rapidement sur les arcs amonts. Une telle situation implique une gêne dans la réalisation d'autres itinéraires, n'empruntant pas forcément l'arc en question. De plus, un nombre important de ces arcs ne présente qu'une seule voie avec de multiples possibilités de mouvements tournant à son extrémité: le blocage de l'un de ces mouvements par la saturation d'un arc aval a donc pour conséquence l'impossibilité de réaliser tout autre mouvement tournant. Ces caractéristiques, propres au modèle du centre-ville, font que ce réseau ne peut supporter de manière que très limitée des flux de trafic non réaliste avant d'être saturé. Or, il est fort probable que le processus itératif qui lui est appliqué induit - par moment - de tels flux, expliquant par là même les blocages constatés du réseau. L'existence de tels flux pendant un court moment peut tout à fait engendrer des conséquences à long terme.

**3)** Une troisième explication, partiellement liée à la précédente, concerne la variabilité de la demande d'un jour à l'autre, modélisée par le changement de "seed". En effet, si cette variabilité est trop importante, le décalage entre la demande d'un jour particulier et les coûts du profil historique pourrait être à l'origine des fortes différences entre l'offre et la demande, créant la saturation du réseau telle qu'expliquée au point précédent. Une analyse de cette variabilité en la comparant à celle réellement mesurable sur le terrain permettrait de justifier ou non cette explication.

---

<sup>23</sup> Chaîne de véhicules arrêtés sur une suite d'arcs formant une boucle fermée

### **8.3 Evaluation des performances de la navigation dynamique purement routière (cas du SNA)**

Cette première évaluation du SNDM traite de la comparaison entre les performances des véhicules équipés de ce système et celles des véhicules non équipés. Comme indiqué au § 7.1.3.4, le couplage Du SNDM et du FCD à bord des même véhicules pourrait s'avérer comme étant un outil de développement pour améliorer la récolte de temps de parcours en Suisse. Partant de ce fait, les auteurs se sont donc proposés d'analyser ce cas particulier du SNA plutôt que celui d'une totale indépendance entre les FCD et le SNDM. Il faut également rappeler ici que le modèle AIMSUN simulant le déplacement des véhicules et non des personnes, une évaluation globale et multimodale n'est pas réalisable. A titre de complément à cette évaluation focalisée sur l'aspect transport individuel, le § 8.4 mettra toutefois en évidence, par des exemples concrets, l'utilité d'une approche multimodale.

Cette comparaison se base sur l'utilisation d'une série d'indicateurs relatifs aux temps de parcours, aux distances parcourues et à l'utilisation des différents niveaux hiérarchiques du réseau. Ce chapitre met également en évidence les conséquences du fait que les véhicules guidés et fournissant les données trafic soient les mêmes. Ces différents enseignements sont évidemment nuancés en fonction du taux de véhicules équipés.

Dans un premier temps, la structure de la demande (matrice OD) ainsi que les paramètres du SNA sont décrits pour chaque taux d'équipement évalué. Une définition des indicateurs de performance utilisés est ensuite fournie. Les mesures de ces indicateurs pour les quatre catégories d'usagers (les équipés et les trois non-équipés) sont alors présentées. Ces mesures sont obtenues pour deux scénarii différents: le premier traite du cas où les conditions de trafic sont "habituelles" alors que le second propose une situation "inhabituelle" reflétant les conditions de trafic induites par l'occurrence d'un incident au centre-ville.

#### **8.3.1 Structure de la demande et paramètres du SNA**

Comme au § 7.1.3, onze taux d'équipements différents sont traités. Pour chacun d'eux, il faut déterminer une structure de demande (proportions de chaque catégorie d'usagers) et les paramètres du SNA. Ces derniers sont directement déduits des enseignements du § 7.1.3.3 et, plus particulièrement, du Tableau 8.

ER (SNA)	Standards [‰]	Experts [‰]	Touristes [‰]	Substitution / Combinaison	AP [S]
0	600	200	200	CN+NNH	1800
1	600	200	199	CN+NNH	900
2	600	200	198	CN+NNH	900
5	600	200	195	CN+NNH	900
10	600	195	195	CN+NNH	900
20	600	190	190	CN+NNH	360
50	600	180	170	CN+H	360
100	550	180	170	NNH	360
200	500	150	150	NNH	360
500	300	100	100	H	180
1000	-	-	-	-	180

**Tableau 11 : Structure de la demande (proportions de catégorie d'utilisateurs) et paramètres du SNA en fonction de l'ER**

Le Tableau 11 présente ces différents éléments. Les trois premières colonnes contiennent les proportions, en ‰, des trois catégories d'utilisateurs de véhicules non guidés. Comme signalé au § 8.2.5.1, le choix - certes arbitraire - de ces valeurs se base sur une perception de la réalité par l'auteur, aucune donnée mesurée ne permettant de déduire ces proportions.

La 4<sup>ème</sup> colonne indique les méthodes - de substitution et/ou combinées - qui sont appliquées, alors que la dernière montre les durées de périodes d'agrégation utilisées. Ces durées ne sont pas identiques à celles du Tableau 8, ce qui s'explique par le fait que, les calculs d'itinéraires se faisant par l'intermédiaire du simulateur AIMSUN, la réactualisation des temps de parcours pour les véhicules équipés doit se faire en même temps que celles des coûts des arcs pour le DTA des véhicules non équipés (voir § 8.2.3). La calibration du modèle "centre-ville" impliquant une fréquence de calcul du DTA de 180 secondes, l'AP du SNA doit être égale à cette valeur ou à un multiple de cette valeur. Cette limitation d'ordre technique n'a finalement que peu d'influence sur le SNA, une valeur d'AP très proche de celle déterminée comme idéale ayant pu être fixée pour chaque ER.

Finalement, ce tableau ne précise pas le type d'arcs choisis. En effet, la définition d'arcs utilisée par AIMSUN pour le calcul des itinéraires ne pouvant pas être modifiée, elle a dû être utilisée pour toutes les valeurs d'ER. Toutefois, cette définition étant de type *out*, elle convient aux cas d'ER allant de 5 à 50 ‰ (voir Tableau 8). Pour les valeurs d'ER légèrement supérieures ou inférieures, le passage à une définition *out* n'entraîne pas de perte de performance inacceptable. Seule une différence notable est constatée pour les ER supé-

rieurs à 200 ‰, ER pour lesquelles une définition *in-out* serait plus appropriée. Cette différence devra être prise en compte dans l'interprétation des résultats.

### **8.3.2 Indicateurs de performance**

Afin d'obtenir une évaluation chiffrée des performances des véhicules équipés du SNA et de l'ensemble des catégories d'usagers, une série d'indicateurs doit être définies. Leur choix dépend des enseignements que l'on désire extraire de cette évaluation. De ce fait trois catégories ont été retenues.

#### **8.3.2.1 Temps de parcours**

Les indicateurs relatifs aux temps de parcours sont évidemment les plus importants car c'est principalement dans ce domaine qu'un système tel que le SNA devrait apporter un gain à ses utilisateurs. Idéalement, la mesure du temps mis par un véhicule pour rallier une origine à une destination à une heure donnée semble un indicateur pertinent pour comparer les différentes catégories d'usagers. Une telle mesure serait toutefois trop variable d'une paire OD à l'autre et serait fortement dépendante de l'heure choisie.

Une approche plus générique est donc souhaitable. C'est pourquoi c'est le choix du temps moyen passé sur le réseau par les véhicules de chacune des catégories qui a été retenu. Etant donné que l'affectation d'un véhicule à une catégorie d'usagers se fait de manière purement aléatoire à son entrée sur le réseau, il est justifié de penser que la distribution des véhicules d'une même catégorie entre les paires OD de la matrice est similaire pour chaque catégorie. Cette affirmation n'est cependant vraie que si un nombre suffisant de répliques (runs) est effectué, minimisant par la même la composante stochastique du simulateur. Par conséquent, le temps moyen passé sur le réseau (qui peut être assimilé à un temps de parcours moyen) est calculé sur la base de vingt répliques pour des ER plus grand ou égal à 10 ‰ et sur quarante répliques pour des ER inférieurs. L'augmentation du nombre de répliques dans ce deuxième cas se justifie par la grande variabilité des performances des véhicules équipés lorsque leur proportion est très faible.

Pour différencier les performances en fonction de l'heure, une discrétisation du temps simulé en périodes statistiques de quinze minutes est réalisée. Un temps de parcours moyen étant alors calculé pour chacune de ces périodes.

### **8.3.2.2 Distances**

La distance parcourue par les véhicules peut également être un indicateur intéressant. D'abord parce qu'à titre individuelle, elle influence la consommation d'essence et donc de dépense pour le propriétaire du véhicule, ensuite parce qu'à un niveau global elle influence le niveau de pollution du réseau.

Comme pour les temps de parcours, la distance moyenne parcourue par les véhicules sur le réseau peut être considérée comme représentative si un nombre suffisant de réplique est effectué. De même, un indicateur permettant d'analyser l'évolution temporelle de cette moyenne de distance parcourue est souhaité.

### **8.3.2.3 Type de routes utilisées**

Ce troisième indicateur répond à une demande d'ordre plus politique et social. En effet, la distribution des flux de trafic entre les différents niveaux hiérarchiques du réseau routier ne permet pas seulement de tirer des enseignements sur la pertinence des modèles d'affectation choisis. Elle offre également la possibilité de mesurer l'influence de certains paramètres - comme la catégorie d'usagers ou le taux d'équipement - sur la fréquentation des routes de dessertes (zones 30 km/h, zones résidentielles,...).

Dans cette optique, deux indicateurs différents ont été utilisés: le premier montre comment la distance moyenne parcourue par les véhicules se distribue entre les différents types de routes alors que le second indique le nombre total de kilomètres parcourus sur chaque type de routes.

Pour le modèle "centre-ville" (comme indiqué au § 11.2.1), le réseau est décomposé en quatre types de routes:

- les "arterials" (artères)
- les "urban roads" (routes principales)
- les "streets" (rues)
- les "streets 30" (zones 30 km/h)

### 8.3.3 Scénario habituel

Ce premier scénario traite du cas où les conditions de trafic sont semblables à un jour "type": aucun incident ne vient perturber les flux de trafic. Comme indiqué ci-dessus, les résultats obtenus concernent des séries de 20 ou 40 répliquions.

#### 8.3.3.1 Analyse des temps de parcours

##### Constatations générales

Les temps de parcours moyen mesurés pour chaque ER et chaque catégorie d'usagers sont présentés à la Figure 42.

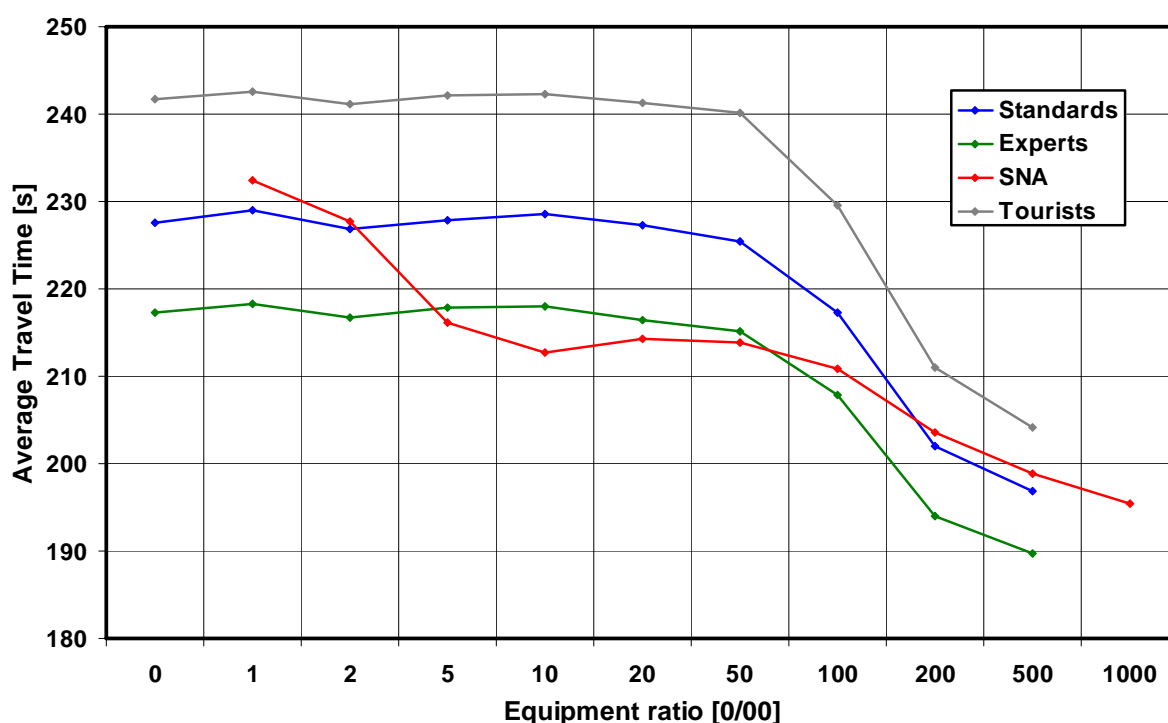


Figure 42 : Temps de parcours moyen par catégorie d'utilisateur et par taux d'équipement

Ce graphique permet de constater que la différence de connaissances entre les différentes catégories d'utilisateurs, proposées par le modèle d'affectation décrit au § 8.2.5, implique bien une différence de performance. Ainsi, lorsqu'aucun véhicule guidé (SNA) n'est présent sur le réseau, les experts mettent en moyenne 24 secondes de moins que les touristes pour traverser le réseau, ce qui représente une différence relative de l'ordre de 10%. Les performances des usagers standards se trouvent à peu près à mi-chemin entre les deux autres catégories.

### *Taux d'équipement faible (1 à 10 ‰)*

Concernant les performances des véhicules équipés, ces résultats confirment un des enseignements obtenus lors de l'analyse paramétrique: ils montrent qu'avec un ER de seulement 1 ‰, le temps de parcours des véhicules guidés (SNA) est sensiblement meilleur que celui des touristes (-4%) alors qu'à partir de 2 ‰, il est déjà au niveau des usagers standards.

Un des enseignements de ce graphique est que, déjà avec un taux d'équipement de 5 ‰, les véhicules équipés du SNA mettent moins de temps que les usagers experts pour effectuer leur trajet. Il faut rappeler que dans des conditions de trafic habituelles, seule une bonne connaissance des conditions particulières du jour permet d'obtenir des meilleurs résultats que ceux enregistrés par les usagers experts. Cette différence devient évidente lorsque le taux atteint les 10 ‰.

### *Taux d'équipement moyen (10 à 100 ‰)*

Pour des ER supérieurs à 10 ‰ et jusqu'à 100 ‰, une stagnation des performances des véhicules guidés est observée. L'hypothèse la plus probable pour expliquer ce phénomène est que, jusqu'ici, ces véhicules avaient tendance à utiliser des itinéraires moins "conventionnelles" que ceux des autres usagers, en empruntant notamment ce que l'on appelle communément des "raccourcis". Le problème est qu'à partir d'un certain taux de véhicules guidés, leur trop grande concentration sur ce type d'itinéraires implique une gêne mutuelle qui ne permet plus d'exploiter pleinement leurs avantages. Parallèlement à cette stagnation, on constate une faible – mais visible - diminution des temps de parcours des autres catégories d'usagers. Il s'agit d'une conséquence directe de l'hypothèse émise ci-dessus: plus le nombre de véhicules ayant tendance à délaissier les itinéraires "conventionnels" est important, plus les conditions de trafic sur ces itinéraires permettront de les parcourir rapidement.

### *Taux d'équipement élevé (100 à 1000 ‰)*

A partir de 100 ‰, la forte présence de véhicules équipés se concrétise par une baisse marquée des temps de parcours globaux ce qui représente un résultat très positif en soi. Par contre, il est, à première vue, surprenant de constater que les temps de parcours des véhicules guidés redeviennent supérieurs à ceux des experts, voir des standards. Ce constat doit être nuancé en rappelant qu'une définition d'arcs *out* n'est pas optimale pour des taux d'équipements élevés.

Un deuxième élément est à prendre en compte: ces taux d'équipements élevés induisent une excellente connaissance des conditions de trafic actuelles et pousse ainsi les véhicules guidés à constamment réadapter leurs itinéraires pour chercher à gagner du temps. Comme ils sont nombreux à réagir ainsi, une certaine inertie d'oscillation entre les itinéraires est créée. Il s'agit du phénomène de *flip flop* déjà rencontré pour l'affectation de trafic réactive (très proche du problème traité ici). Ce phénomène peut être visualisé sur l'interface graphique de AIMSUN où, pour une paire d'OD choisie, l'itinéraire optimal des véhicules guidés change presque à chaque réactualisation. Les trajets ainsi effectués - passant sans cesse d'un itinéraire optimal à l'autre - ne s'avèrent finalement pas optimaux. C'est face à ce type

de situation que des outils tels que le TDSPA (Time Dependent Shortest Path Algorithm) et la prévision anticipative pourrait amener une amélioration sensible des performances du SNA. Ecartée pour ces faibles apports au niveau de la qualité d'estimation de temps de parcours, l'utilisation de moyennes mobiles – décrites au § 7.1.3.2 – pourrait également permettre de réduire ce phénomène de *flip flop*. L'utilisation de ces outils pour améliorer les performances du SNA pour un taux d'équipements élevé constitue un axe de recherche à approfondir.

On terminera l'analyse de cette figure en faisant remarquer que si les valeurs de gains de temps observés peuvent sembler dérisoires (de l'ordre de la dizaine de secondes), il faut les relativiser en prenant en considération la faible taille du réseau "centre-ville".

### Evolution dans le temps

L'étude de l'évolution dans le temps des temps de parcours moyens apporte des enseignements supplémentaires. La Figure 43 présente cette évolution pour le cas d'un taux d'équipement de 50 ‰.

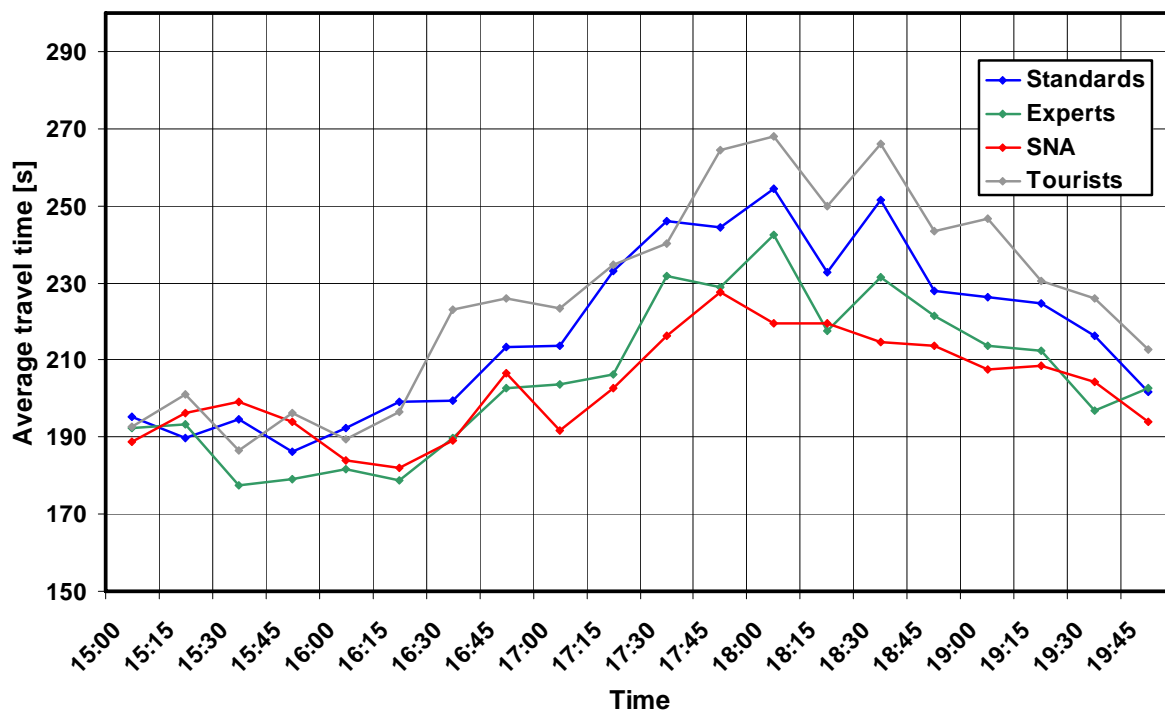


Figure 43 : Evolution des temps de parcours moyens de chaque catégorie d'usagers pour un ER de 50 ‰

Cette figure montre que c'est principalement durant l'heure de pointe que les véhicules équipés du SNA gagnent du temps par rapport aux autres usagers. Cela s'explique par le fait que, pour cette période de la journée, les conditions de trafic sont plus variables d'un jour à l'autre que pour des périodes moins chargées. Par conséquent, l'apport d'informations sur les temps de parcours enregistrés le jour même permet un choix d'itinéraire plus pertinent durant l'heure de pointe alors que cet apport est moins valorisé pendant les heures creuses.

On constate également que le SNA présente de mauvaises performances durant les premières périodes statistiques. En début de simulation, le potentiel des réseaux de neurones ne peut être utilisé au maximum étant donné qu'ils ne disposent pas des valeurs passées nécessaires (il faudrait 3 AP en arrière). Il s'agit donc ici d'un effet de bord du modèle qui ne correspond pas la réalité.

### 8.3.3.2 Analyse des distances parcourues

L'analyse des distances parcourues permet de confirmer certaines explications préalablement proposées. Les résultats sont illustrés par la Figure 44.

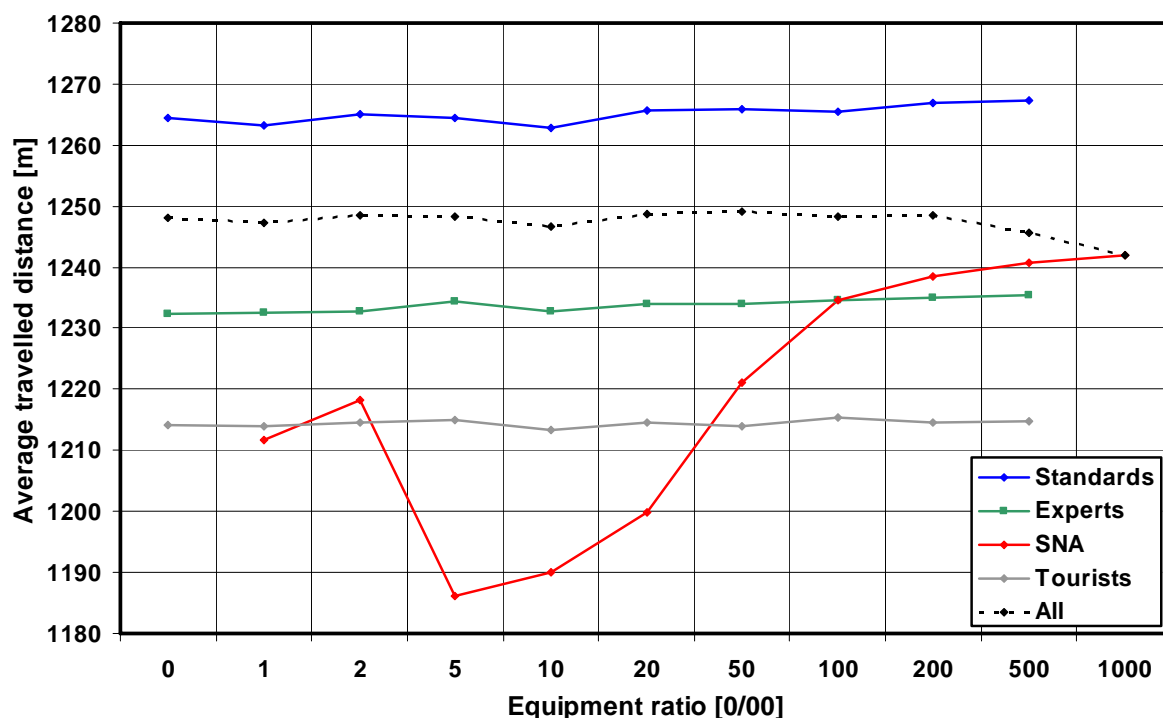


Figure 44 : Distance moyenne parcourue par catégorie d'utilisateur et par taux d'équipement

Les véhicules non guidés parcourant le moins de distance sont les touristes. Ces usagers choisissent l'itinéraire le plus direct, sans prendre en considération les conditions de trafic, ce que prouvent leurs temps de parcours élevés (Figure 42). Les erreurs d'appréciations du profil historique des usagers standards les conduisent à parcourir des trajets trop longs en comparaison de ceux des experts. Ces derniers ont donc trouvé le juste milieu.

L'évolution de la distance parcourue par les véhicules équipés du SNA confirme les explications données précédemment:

### Taux d'équipement faible (1 à 10 ‰)

Pour des ER de 1 ou 2 ‰, le niveau de connaissance limité des conditions de trafic implique que les itinéraires des véhicules équipés ont une longueur similaire à ceux des touristes. Lorsque l'ER atteint les 5 à 10 ‰, la distance parcourue est alors la plus faible, ce qui confirme l'explication selon laquelle les véhicules équipés emprunteraient des "raccourcis" pour gagner du temps.

### Taux d'équipement moyen (10 à 100 ‰)

Les ER compris entre 10 à 100 ‰ correspondent à une phase de stabilisation des temps de parcours qui, en termes de distances parcourues, correspond à une phase d'augmentation. Cette observation souligne que la gêne mutuelle croissante des véhicules équipés les conduit à utiliser d'autres itinéraires, plus longs cette fois. Cette augmentation des distances parcourues qui compense la meilleure qualité de l'estimation des temps de parcours explique donc la stagnation de ces derniers.

### Taux d'équipement élevé (100 à 1000 ‰)

Pour des ER dépassant les 100 ‰, les distances parcourues n'évoluent plus beaucoup. On peut en conclure que les oscillations observées lors de l'analyse des temps de parcours se faisant entre des itinéraires de longueurs semblables, le passage de l'un à l'autre n'entraînant aucune augmentation de la longueur du trajet finalement réalisé.

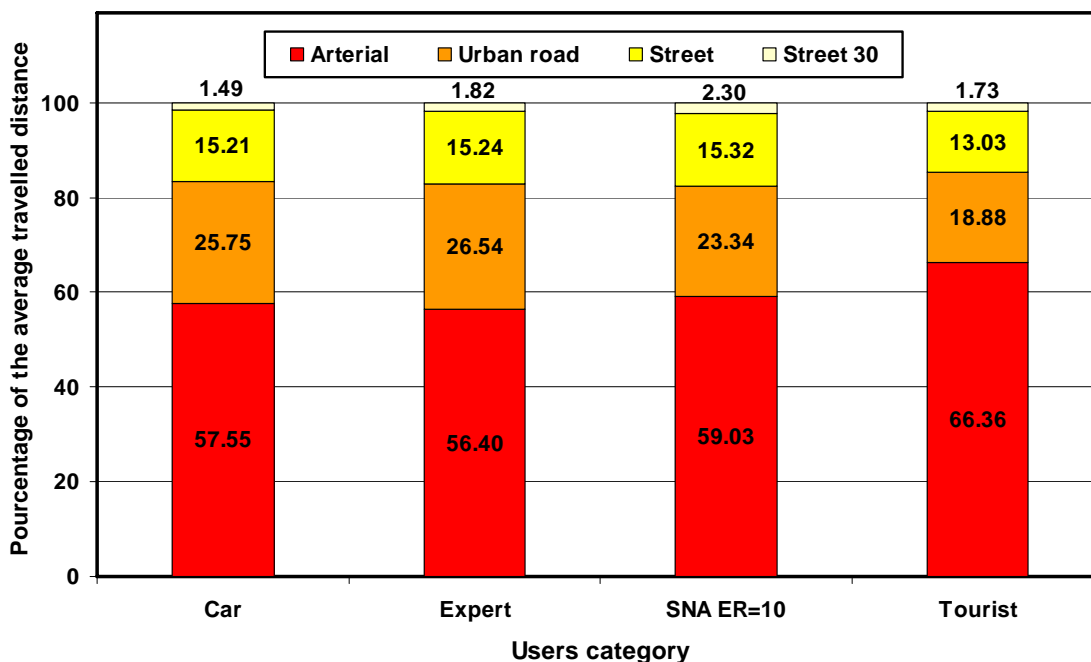
#### 8.3.3.3 Analyse des types de routes utilisés

Le Tableau 12 présente les quatre types de routes en termes de proportion de la longueur totale du réseau et de proportion des distances parcourues. Il permet de constater que le taux d'utilisation des routes de niveau hiérarchique élevé (Arterial et Urban Road) est nettement supérieur à la proportion du réseau qu'elles représentent. Le constat inverse est également fait pour les routes à faible niveau hiérarchique. Sans grandes surprises, ces résultats permettent de confirmer le bon fonctionnement du modèle de simulation

	Proportion de la longueur totale du réseau [%]	Proportion des distances parcourues [%]
Arterial	42.46	59.00
Urban Road	15.96	24.57
Street	32.58	14.80
Street 30	8.98	1.61

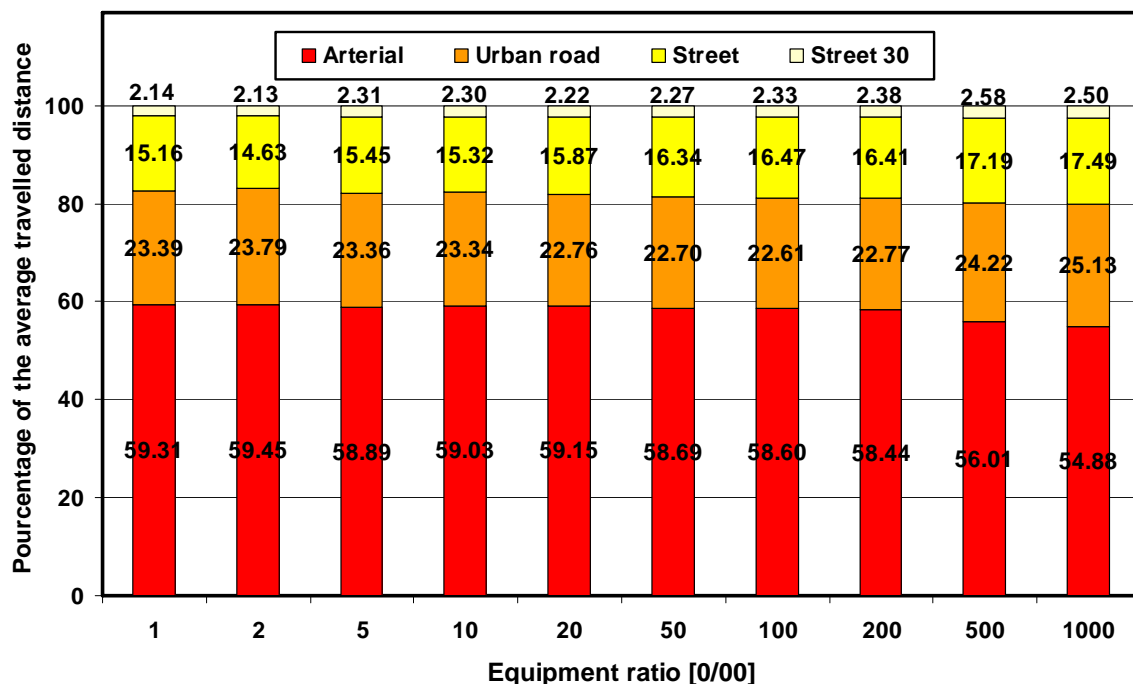
**Tableau 12 : Vue globale du niveau d'utilisation des types de routes (ER=10)**

La comparaison par catégories d'usagers de cette distribution des distances parcourues sur les différents types de routes est plus intéressante. Ces proportions sont représentées à la Figure 45 pour le cas d'une demande en trafic avec un taux de véhicules équipés du SNA de 10 ‰.



**Figure 45 : Distributions de la distance parcourue entre les types de routes en fonction de la catégorie d'usagers**

Les différences qui existent entre les catégories d'usagers sont faibles : seuls les touristes se démarquent un peu avec une utilisation plus importante des "arterials" au détriment des trois autres catégories et notamment des "urban roads". Ce résultat est tout à fait conforme aux attentes.



**Figure 46 : Distributions de la distance parcourue par les véhicules équipés du SNA entre les types de routes pour différentes valeurs d'ER**

Les véhicules équipés du SNA (ER=10 dans ce cas) présentent la particularité d'une utilisation sensiblement plus élevée des "street 30" en comparaison des autres usagers. De manière générale, ces chiffres montrent cependant que ces usagers n'utilisent pas de manière exagérée (2,3 %) les routes à faible capacité dans le but de gagner du temps par rapport aux autres usagers.

On pourrait néanmoins se demander comment cette distribution évolue pour les véhicules équipés en fonction du taux d'équipement, ce qu'illustre la Figure 46.

Celle-ci montre des faibles variations d'utilisation des différents types de routes. On note toutefois que plus l'ER est grand, plus un transfert des "arterials" vers les trois autres catégories s'opère. Concernant l'utilisation des "street 30", elle passe rapidement de 2.14 à 2.30 % avant de stagner jusqu'à un ER de 200 ‰. Au-delà, cette proportion augmente jusqu'à 2.50 %.

D'un point de vue politique et social, l'indicateur le plus important est le taux d'augmentation de la fréquentation des routes "street 30" en fonction de l'ER. Les valeurs de cet indicateur, illustrées à la Figure 47, montrent qu'aucune augmentation notable n'est à attendre en dessous d'un taux d'équipement de 50 ‰.

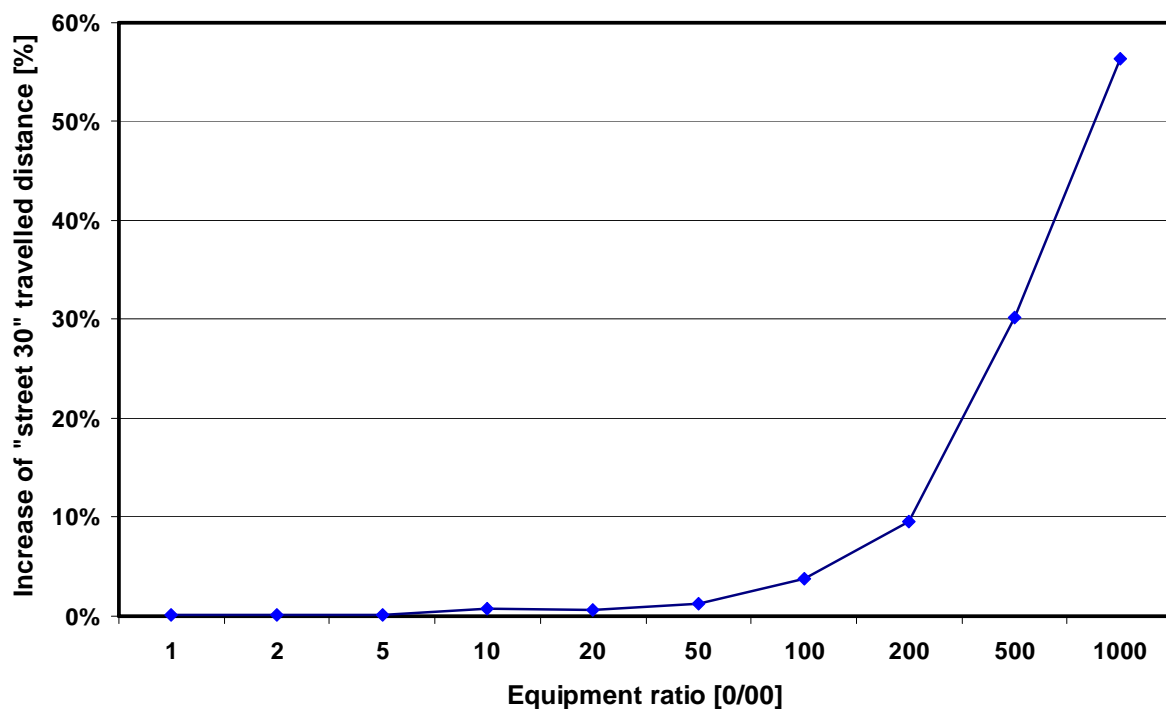


Figure 47 : Augmentation, en pourcent, du nombre de kilomètres parcourus sur les routes de type "street 30"

#### 8.3.4 Scénario avec incident

Ce deuxième scénario traite du cas où un incident perturbe l'écoulement "habituel" du trafic sur le réseau. Le but de cet exercice est d'évaluer les réactions des véhicules équipés dans une situation de trafic "inhabituel". Les paramètres du SNA sont identiques au cas précédent.

Cet incident est modélisé en coupant la circulation sur un axe important du réseau centre-ville entre 17h00 et 17h15. S'agissant du début de l'heure de pointe, les conséquences de cette coupure se font ressentir durant plus de deux heures, créant ainsi une longue période où les temps de parcours d'arcs diffèrent nettement de ceux du profil historique. L'emplacement de cette coupure à la rue centrale à Lausanne, sous le pont Bessières, est marqué d'un cercle rouge sur la Figure 48.

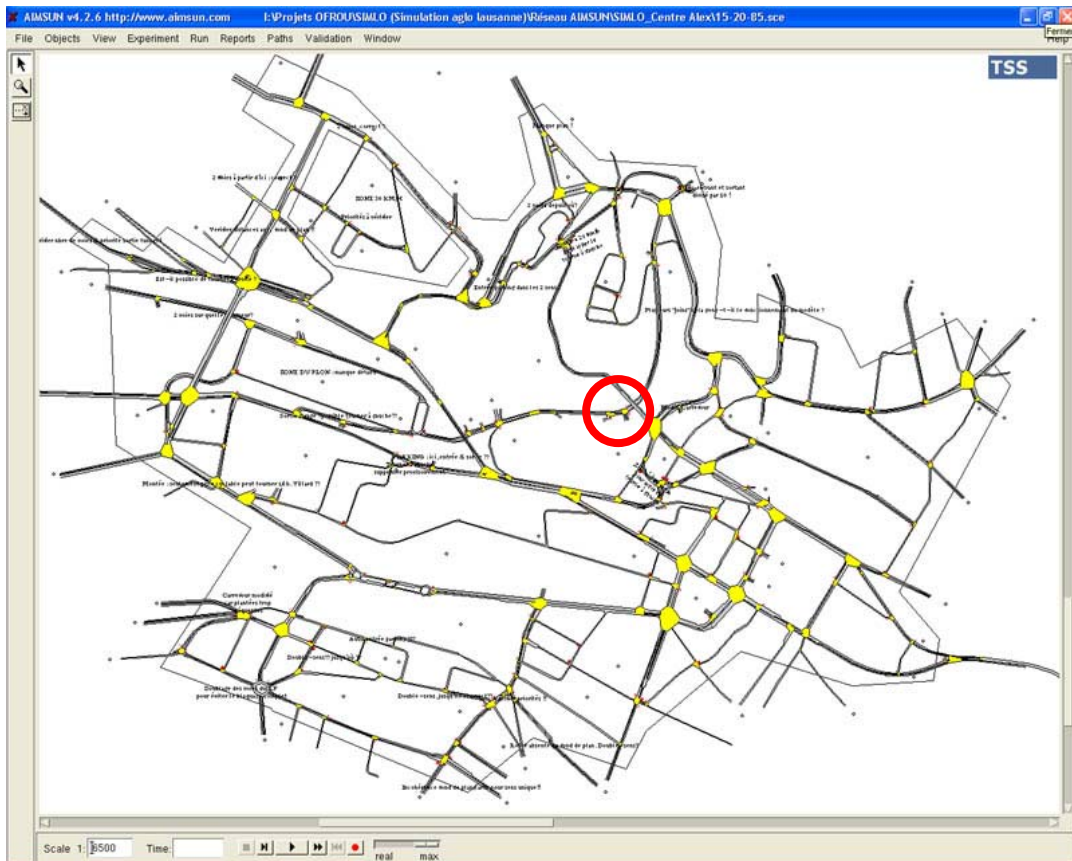


Figure 48 : Emplacement de l'incident (cercle rouge) sur le réseau "centre-ville" de Lausanne

#### 8.3.4.1 Valeur d'alarme

L'un des problèmes majeur de l'acquisition des temps de parcours par FCD est le cas du véhicule bloqué dans une congestion et ne pouvant atteindre la fin de l'arc dans un temps raisonnable. Le § 7.1.3.2 a présenté une solution pour y remédier: l'utilisation de valeurs d'alarmes. Dans le cas retenu ici, la technique suivante est appliquée: si un véhicule reste bloqué sur un arc durant plus de 180 secondes alors que le temps historique pour le parcourir (EHLT) est inférieur à cette durée, il émet un signal d'alarme de niveau 1 au MTS. Ce dernier affecte alors à l'arc en question une valeur de 180 secondes pour l'ELT. Si, au terme d'une deuxième période de 180 secondes, le véhicule n'est toujours pas sorti de l'arc, il envoie un signal d'alarme de niveau 2. Le MTS affecte alors une valeur de  $2 \times 180 = 360$  secondes à l'ELT, et ainsi de suite. Si plusieurs véhicules envoient des messages depuis le même arc, c'est la valeur d'alarme la plus haute qui est utilisée.

L'effet de ces messages envoyés au MTS est illustré par la Figure 49. Elle montre l'évolution des ELT estimés par le SNA (en rose) pour l'arc sur lequel se produit l'incident.

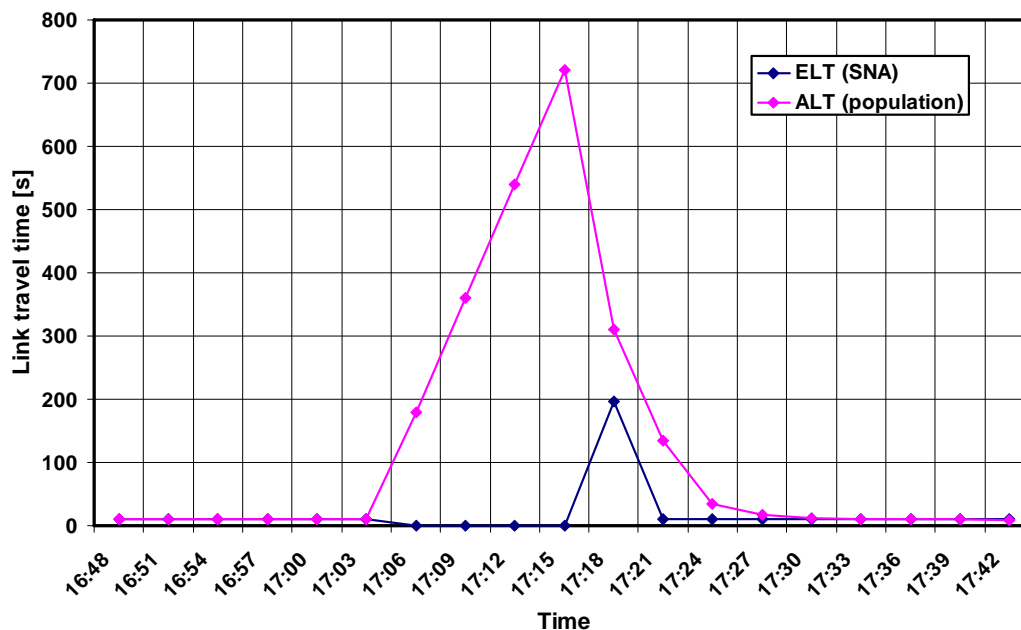


Figure 49 : Temps de parcours d'arc estimé par le SNA (échantillon) et mesuré par AIMSUN (population) lors de l'occurrence d'un incident

#### 8.3.4.2 Analyse des temps de parcours

La période durant laquelle la situation du trafic diffère d'une situation habituelle varie d'une simulation à l'autre et surtout d'un taux d'équipement à l'autre. Par conséquent, comparer des mesures de temps de parcours moyennées sur toute la période de simulation n'apporte pas une vision objective de l'apport du SNA. Une analyse prenant en compte l'évolution de la situation en cours de simulation paraît donc plus appropriée.

#### Evolution dans le temps

A titre d'exemple, la Figure 50 présente les moyennes obtenues sur 20 simulations pour un taux d'équipement de 100 %.

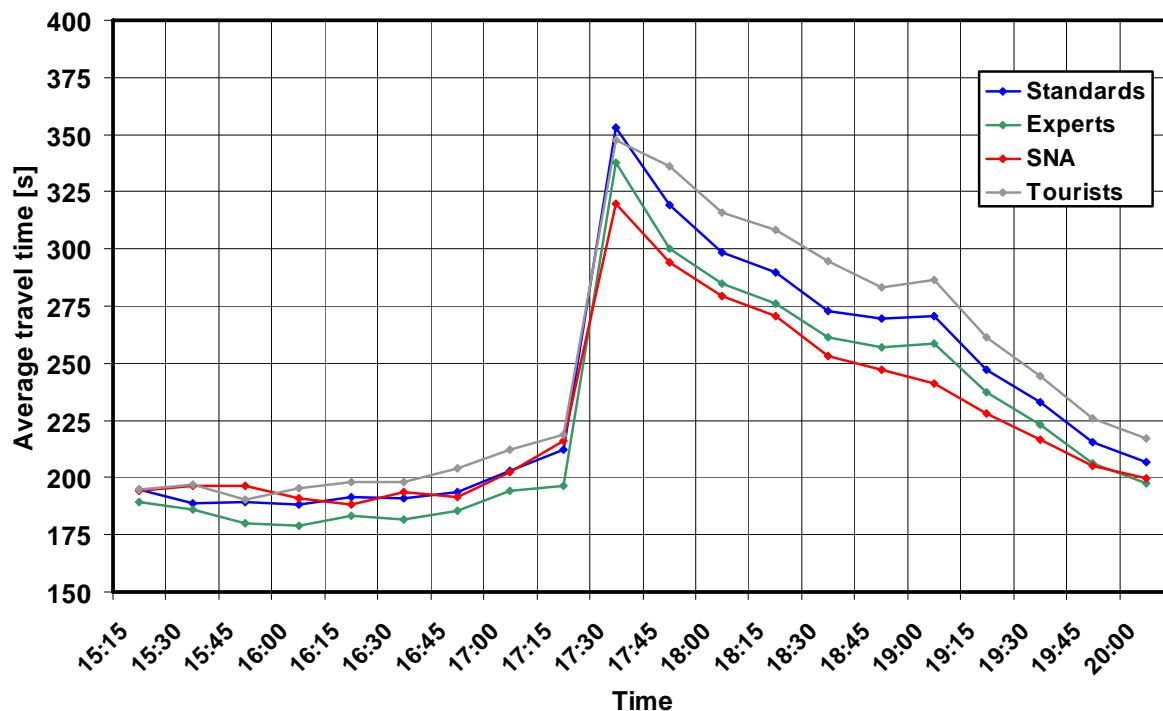


Figure 50 : Evolution des temps de parcours moyens des quatre catégories d'utilisateur dans le cas d'un incident survenant à 17h00 (ER=100%)

On observe nettement les répercussions liées à la coupure de la rue Centrale entre 17h00 et 17h15. Les statistiques portent sur les mesures de temps de parcours des véhicules au moment où ils sortent du réseau, ce qui explique le décalage entre l'heure de l'incident et le pic des temps de parcours (17h30).

Jusqu'au moment de l'incident, soit dans des conditions "habituelles" de trafic, les temps de parcours des véhicules équipés sont similaires à ceux des usagers standards. Ce constat change pour la période qui suit l'incident: ce sont alors les véhicules équipés du SNA qui gèrent le mieux les nouvelles conditions auxquelles ils sont soumis. Leurs temps de parcours sont systématiquement inférieurs à ceux des usagers experts. La Figure 42 montrait que pour un taux d'équipement de 100%, les performances des véhicules équipés étaient moins bonnes que celles des usagers experts. On peut par conséquent déduire que l'apport du SNA est plus grand en cas d'incident que dans des situations "habituelles" de trafic.

On note encore que pour la dernière période statistique de la simulation, le temps de parcours des experts est à nouveau le plus faible, ce qui laisse penser que la situation est redevenue "habituelle".

### Distances parcourues

L'étude des distances parcourues permet de mieux comprendre comment les véhicules équipés du SNA ont réagi à l'apparition de nouvelles conditions de trafic. Ces distances sont représentées à la Figure 51.

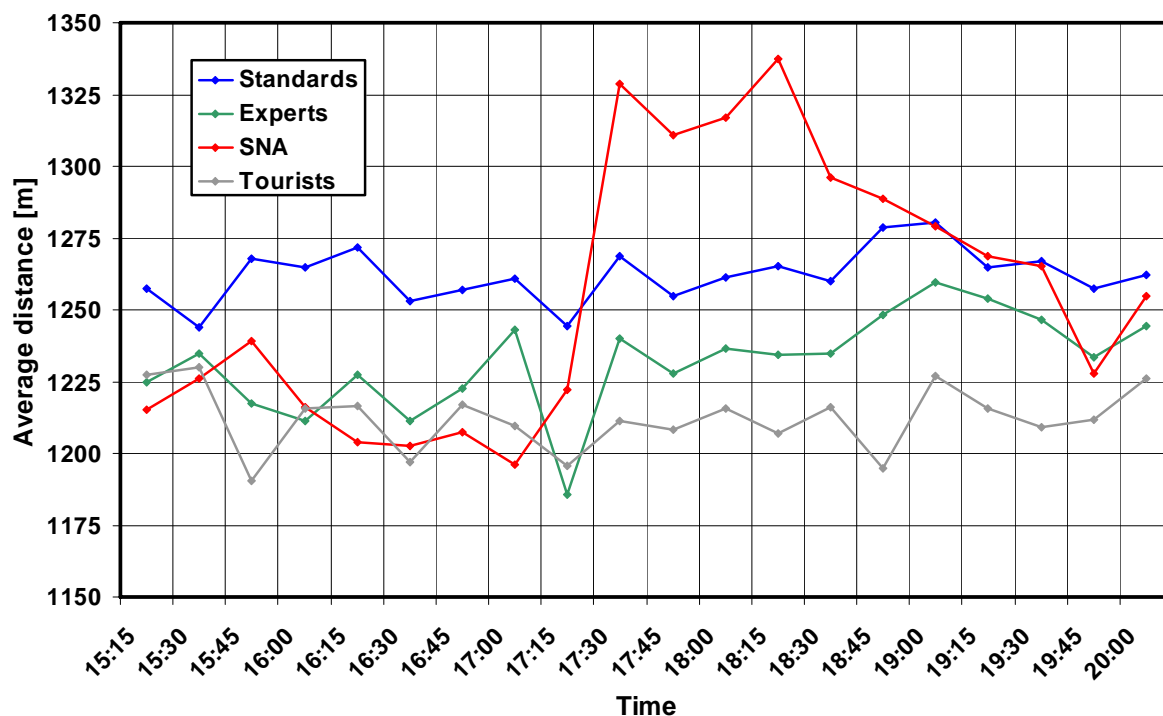


Figure 51 : Evolution des distances parcourues pour les quatre catégories d'utilisateur et dans le cas d'un incident survenant à 17h00 (ER=100‰)

Jusqu'au moment de l'incident, la forme de ces quatre courbes est conforme à une situation "habituelle". Passé 17h00, seuls les véhicules équipés du SNA changent leurs comportements. Une nette augmentation des distances qu'ils parcourent est alors constatée. Cette augmentation illustre le fait que les véhicules équipés, informés de la présence d'une zone perturbée au centre du réseau, choisissent des itinéraires leur permettant de contourner la zone incriminée, même si ces itinéraires sont plus longs que ceux qui auraient été empruntés en condition "habituelles". Ils sont en revanche plus rapides (voir Figure 50).

L'hypothèse d'un retour à une situation "habituelle" en fin de simulation est confirmée par les valeurs des distances parcourues par les véhicules équipés. Celles-ci sont en effet à nouveau conformes à des conditions de trafic habituelles pour les périodes statistiques de 19h45 et 20h00.

### Les limites de performance du SNA

Comme plusieurs fois mentionnés dans cette étude, la particularité du SNA est que les véhicules guidés sont également ceux qui mesurent les conditions de trafic (via les temps de parcours). Cette caractéristique joue un rôle important dans le cas d'une situation "inhabituelle" telle qu'enregistrée ici.

Pour illustrer les inconvénients liés à cette particularité – qui est d'ailleurs d'autant plus marquée que le taux d'équipement est faible- l'observation d'une simulation (et non d'une moyenne sur 20 runs) pour un taux d'équipement de 10‰ est présentée à la Figure 52.

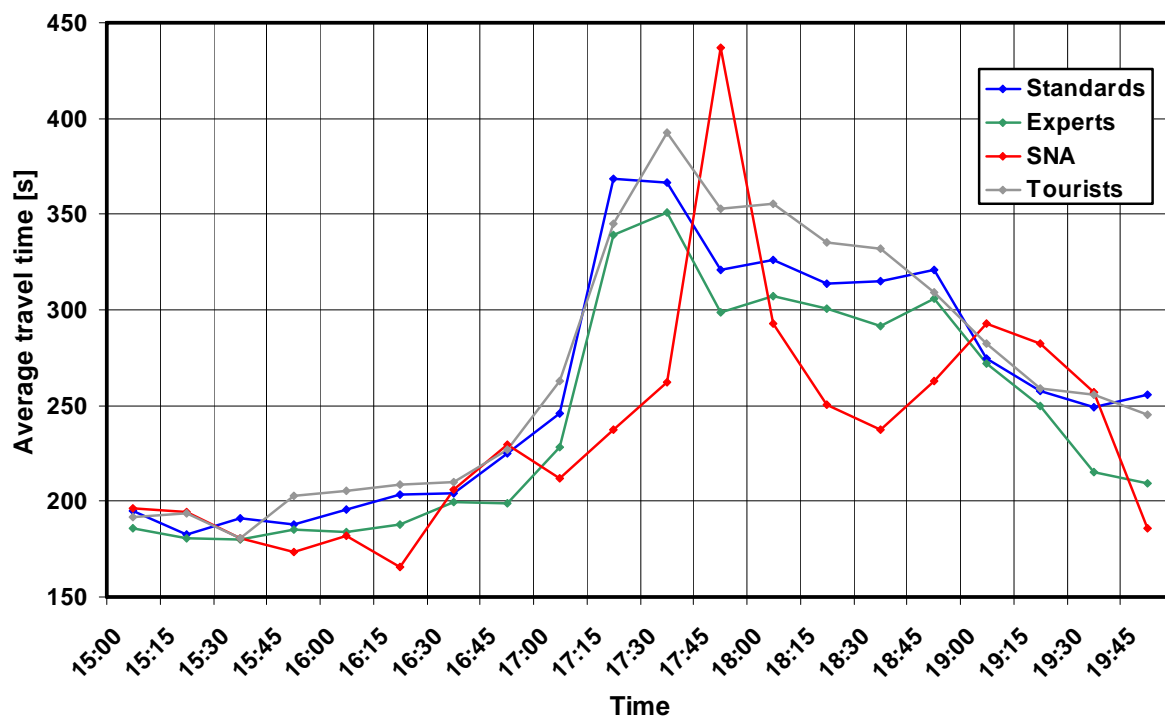


Figure 52 : Evolution des temps de parcours moyens des quatre catégories d'utilisateur dans le cas d'un incident survenant à 17h00 (ER=10 ‰)

Les résultats de cette simulation montrent que les véhicules équipés du SNA réagissent, dans un premier, très bien aux nouvelles conditions de trafic induites par l'incident de la rue Centrale. En effet, les mesures enregistrées à 17h15 et 17h30 montrent un gain de temps important pour ces véhicules. Elles sont par contre immédiatement suivies d'une mesure - à 17h45 - dénotant une importante perte de temps.

Ce constat laisse supposer que le SNA n'a pas réalisé une bonne estimation des temps de parcours, entraînant par là même un guidage des véhicules non adaptés aux conditions réelles de trafic. Ce manque de précision vient du fait que les véhicules équipés, évitant la zone perturbée pour gagner du temps, fréquentent nettement moins les arcs congestionnés. Le taux des véhicules mesurant des temps de parcours dans cette zone devenant plus faible que le taux d'équipement, la qualité de l'estimation est alors diminuée. Ce fait est logiquement accentué pour de faible ER. Cela peut se traduire concrètement par deux phénomènes, se combinant généralement en présence d'un nombre élevé d'arcs congestionnés :

Ne recevant plus de temps de parcours ni de message d'alarmes pour certains arcs, le SNA applique les méthodes de substitution habituelles. Si ces dernières ramènent trop rapidement les valeurs d'ELT vers des valeurs "habituelles", le SNA va recommencer à proposer aux véhicules équipés des itinéraires empruntant ces arcs. Au cas où le niveau de congestion de ces arcs n'a pas réellement diminué, une perte de temps pour les véhicules équipés s'en suivra.

A l'inverse, si les méthodes de substitutions mettent trop de temps à ramener les valeurs d'ELT à la normale, le SNA va continuer à guider les véhicules équipés sur des itinéraires de contournement, alors même que les itinéraires "habituels" sont redevenus plus performants.

L'observation visuelle - durant la simulation - des conditions de trafic sur le réseau porte à croire que se sont avant tout des phénomènes du premier type qui ont conduit au pic de 17h45 (Figure 52). A défaut de leur faire gagner du temps, le renvoi d'une partie des véhicules guidés dans les zones congestionnées a permis d'obtenir une réactualisation des valeurs de temps de parcours. Il s'en suit une redirection des véhicules équipés sur les itinéraires de contournement, visible par une nouvelle baisse de temps de parcours sur la Figure 52. L'apparition d'une nouvelle hausse (certes moins marquée) enregistrée à 19h00 semble montrer que ce phénomène est cyclique.

Il est nécessaire de préciser que ces observations peuvent radicalement changer d'une simulation à l'autre. En effet, pour un faible taux d'équipement, le nombre et l'emplacement des arcs sur lesquelles circulent des véhicules équipés devient très variable. Le comportement du SNA dans les périodes suivant l'incident dépendant fortement de la situation des véhicules équipés sur le réseau, les résultats peuvent donc grandement varier d'un jour (run) à l'autre.

Une meilleure complémentarité entre les méthodes de substitution et la technique des valeurs d'alarmes - afin de diminuer l'effet de ces phénomènes – mériterait certainement de faire l'objet de recherches complémentaires. Il faut toutefois admettre qu'il s'agit belle et bien là d'une limitation des performances du SNA. Seul l'apport additionnel de données trafic provenant de détecteurs - comme les boucles inductives - permettrait de diminuer nettement ces effets négatifs. Il ne s'agirait plus alors d'un système auto-alimenté...

### 8.3.5 Synthèse

Ce premier élément d'évaluation a permis d'évaluer les performances attendues de l'utilisation du SNA, autant pour les véhicules équipés que pour la totalité du trafic. Pour ce faire, il s'appuie sur les résultats de simulations effectués sur le réseau "centre-ville" de Lausanne.

Dans un premier temps, le cas où les conditions de trafic sont similaires à un jour "type" est abordé. Il permet de montrer qu'avec un taux d'équipement de seulement 1 à 2 ‰ les temps de parcours expérimentés par les véhicules équipés sont déjà similaires à ceux des usagers standards. Lorsque ce taux atteint les 10 ‰ le gain de temps par rapport aux autres usagers est alors maximal. Les distances plus faibles parcourues par les véhicules équipés laissent à penser qu'ils empruntent des "raccourcis" pour éviter certains points d'attente le long des itinéraires conventionnels. Une augmentation de ce taux d'équipement implique cependant une trop forte concentration de véhicules guidés sur ces "raccourcis" entraînant une stagnation de leur gain de temps. Enfin, pour des taux d'équipement supérieurs à 100 ‰, des phénomènes de *flip flop* apparaissent alors dans le choix d'itinéraires des véhicules équipés les empêchant d'atteindre des performances idéales. Il est également important de noter que l'augmentation du taux d'équipement implique de manière systématique une diminution des temps de parcours globaux, cet effet se faisant sentir à partir d'un taux de 10 à 20 ‰. On notera pour finir que les différences de temps enregistrées se sont avérées faibles en raison de la taille limitée du réseau "centre-ville". Ces enseignements devraient donc être confirmés par l'étude d'un réseau plus large comme celui de l'ensemble de l'agglomération de Lausanne.

Après une description du fonctionnement pratique de la technique des valeurs d'alarme, l'analyse d'un cas avec incident a été réalisée. Pour ce faire, le blocage d'un axe central durant quinze minutes a été simulé. Les performances des véhicules équipés du SNA se sont montrées meilleures - en comparaison des autres usagers - que dans le scénario d'un jour "habituel". Leurs capacités à réagir aux nouvelles conditions de trafic ont été mises en évidence par l'étude des distances parcourues. Dès l'occurrence de l'incident, les véhicules équipés empruntent en effet des itinéraires permettant de contourner la zone congestionnée, augmentant certes les distances parcourues mais leur permettant de gagner du temps.

Dans ce cas de figure, une limite aux performances du SNA a été mise en évidence. Le report du trafic des véhicules équipés sur des itinéraires n'empruntant plus la zone congestionnée peut, surtout si le taux d'équipement est faible, entraîner un manque de réactualisation des temps de parcours dans cette zone. Suivant le comportement des méthodes de substitution alors appliquées, les véhicules guidés peuvent se voir redirigés dans cette zone alors même que la situation ne s'y est pas améliorée. Il s'agit ici clairement d'une conséquence de la combinaison, à bord des mêmes véhicules, du guidage dynamique et de la récolte de données.

## 8.4 Mise en évidence de l'utilité de la navigation dynamique multimodale

A l'aide du réseau de l'agglomération lausannoise, quelques parcours typiques ont été analysés, afin de montrer la variabilité des temps de parcours pour différents moyens de transport. Les scénarios sont décrits, illustrés et commentés dans la suite de ce chapitre, avant de tirer des conclusions sur l'utilité de la navigation dynamique multimodale.

Pour le modèle de Lausanne, seule la pointe du soir est modélisée, entre 16h et 20h. Cette période modélisée est découpée en tranches de mesure de 15 minutes. Comme les données de l'heure de pointe du matin ne sont pas disponibles, il n'a pas été possible de traiter la problématique des trajets aller-retour de manière complète.

### 8.4.1 Cas 1 : EPFL – Centre-ville

Dans ce premier cas, nous analysons différents itinéraires entre l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, qui se situe au sud-ouest de la ville de Lausanne, et le centre-ville (Figure 53). Au niveau des transports publics, il existe un métro léger en site propre, qui a une fréquence de 5 min pendant l'heure de pointe. En voiture, quatre itinéraires, qui se recouvrent partiellement, ont été choisis pour la comparaison. Un parking-relais intermédiaire permet une considération multimodale.

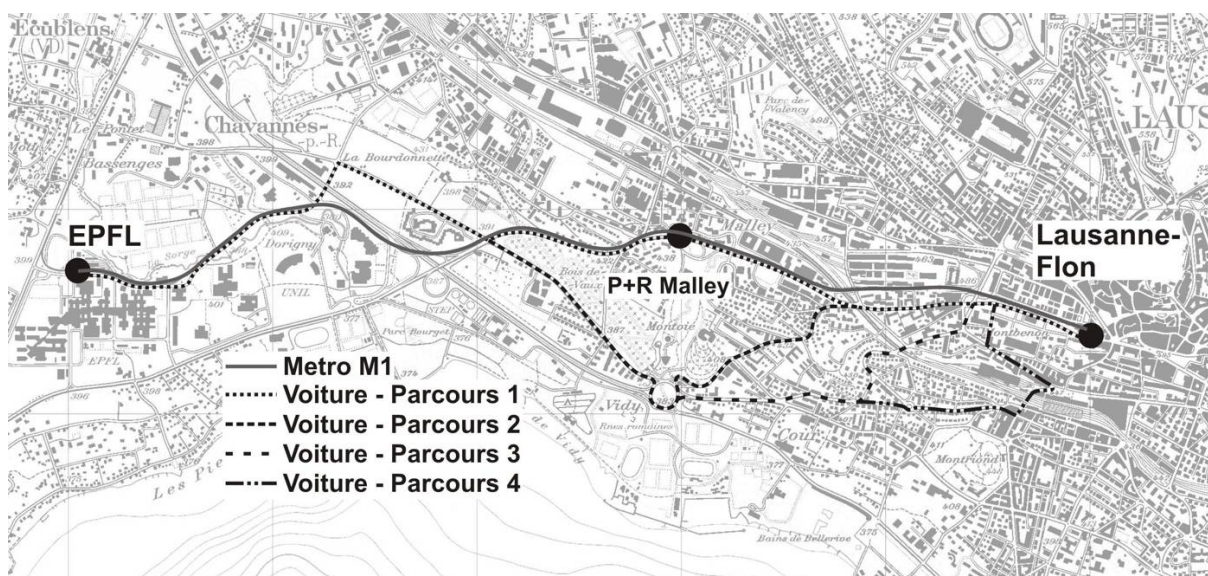


Figure 53 : Itinéraires entre l'EPFL et le centre-ville

Les hypothèses suivantes sont considérées pour les déplacements :

Le temps de parcours des transports publics est de 13 minutes entre l'EPFL et Lausanne-Flon, respectivement 6 minutes entre Malley et Lausanne-Flon. La variabilité du temps de parcours du métro est négligée, car ce dernier circule en site propre.

Le point et le moment de départ sont les mêmes pour les modes voiture et métro. En effet, le temps nécessaire pour se rendre au parking ou à l'arrêt du métro, y compris l'attente du prochain service (on part du principe que l'horaire est connu et le temps d'attente est minimisé), est tout à fait semblable.

L'itinéraire multimodal suit le parcours 1 de la voiture jusqu'au parking-relais à Malley. Le changement de mode prend 5 minutes, dont la moitié pour stationner le véhicule et l'autre moitié pour attendre le métro (moitié de la fréquence).

Les résultats des simulations (Moyenne sur 5 répliques) sont résumés dans la figure suivante :

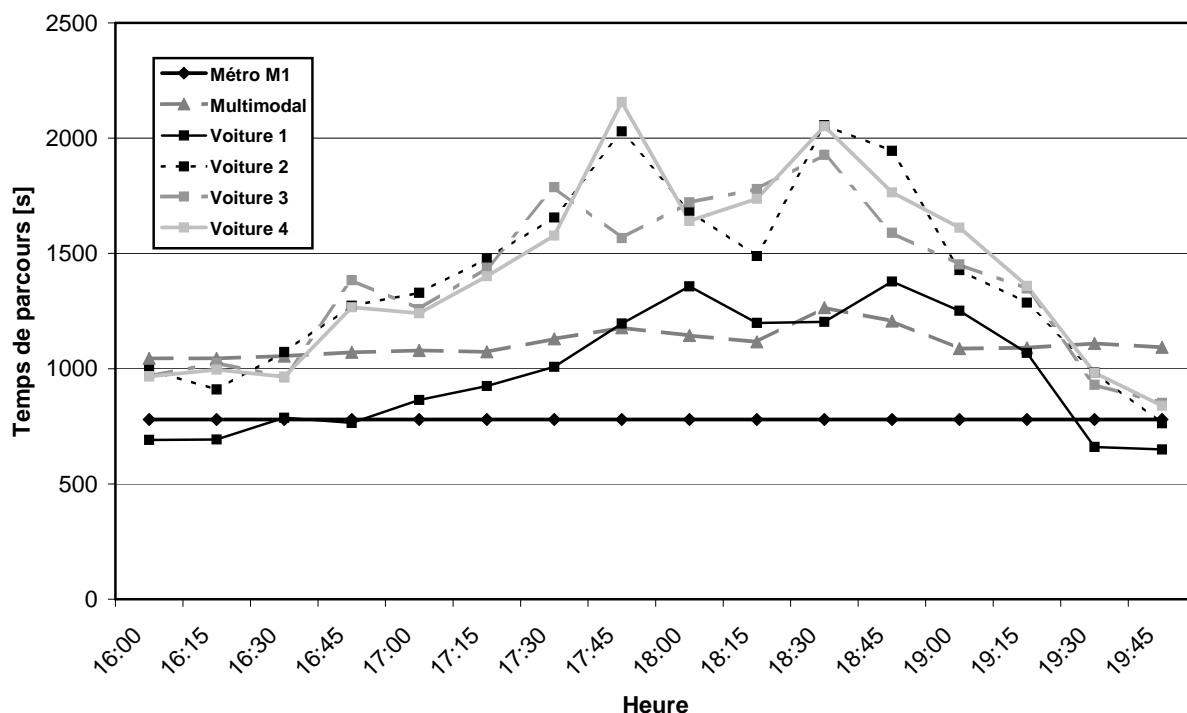


Figure 54 : Temps de parcours pour les itinéraires entre l'EPFL et le centre-ville

Durant la journée, le parcours n° 1 en voiture est l'itinéraire préférable au niveau du temps de parcours. La durée mesurée correspond aux informations données par un système de navigation statique (11 min). A l'approche de l'heure de pointe, le temps de parcours en voiture augmente pour atteindre une valeur deux fois plus élevée qu'en circulation libre.

Le métro, circulant en site propre, est très compétitif vis-à-vis de la voiture et constitue le mode le plus avantageux pendant l'heure de pointe. Malgré une « perte » de temps importante au niveau du parking-relais, l'itinéraire multimodal peut être avantageux par rapport à la voiture, car les problèmes de congestion se trouvent principalement en centre-ville et on peut les éviter en utilisant les transports publics uniquement sur une partie du trajet.

Le graphique suivant, qui montre le temps de parcours entre Lausanne-Flon et Malley (direction inverse qu'auparavant), confirme le niveau de congestion élevé pendant l'heure de pointe. Le temps de parcours du métro est majoré de 2,5 minutes, afin de tenir compte du temps d'attente moyen. S'il est admis que le temps pour chercher la voiture stationnée est le

même au centre-ville que sur le parking-relais et qu'à partir de Malley, la solution du changement de mode est avantageuse pendant l'heure de pointe pour sortir de la ville. Si l'on admet que l'état de la circulation est semblable à l'heure de pointe du matin, dans ce cas l'utilisation du parking-relais devrait être proposée à l'utilisateur du SNDM.

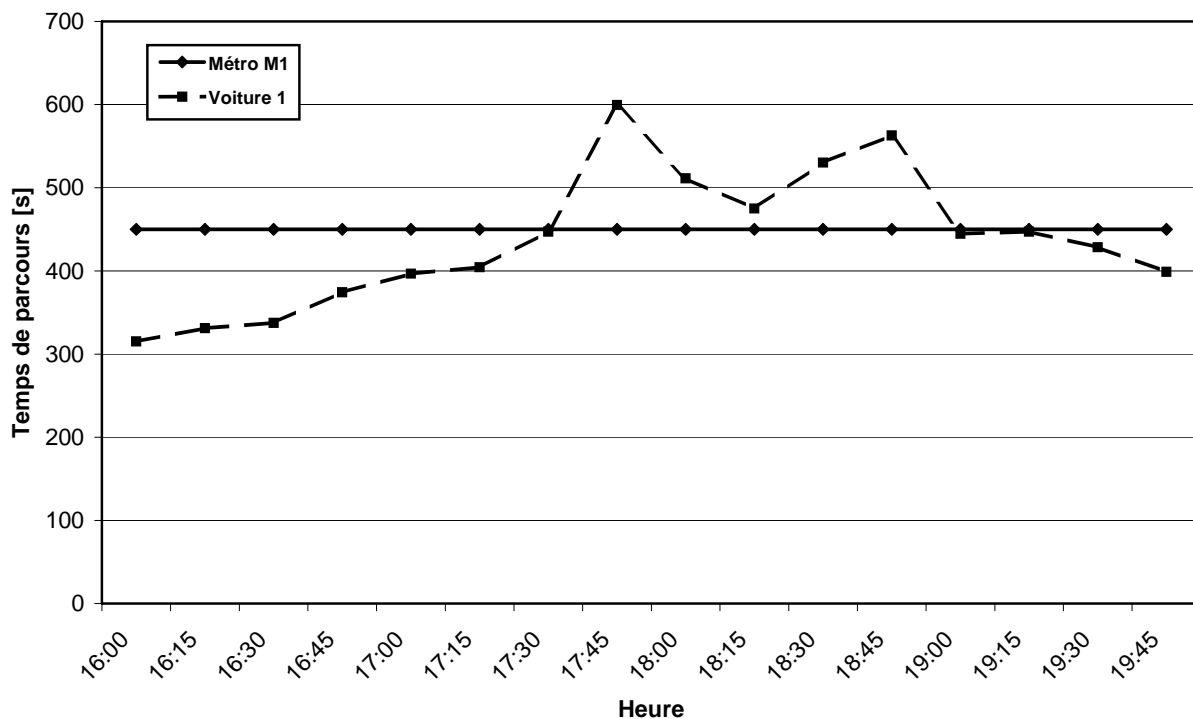


Figure 55 : Temps de parcours entre le centre-ville et le parking-relais à Malley

### 8.4.2 Cas 2 : Lutry – Centre-ville

Lutry est une commune de l'agglomération lausannoise qui se trouve au sud-est de la ville principale. La ligne de bus n° 9, qui assure la liaison entre les deux communes avec une fréquence de 6 minutes, circule sur l'axe routier principal avec des voies réservées par endroit (Figure 56). Afin de tenir compte du temps nécessaire pour stationner la voiture au centre-ville, le temps de parcours de la voiture mesuré dans le modèle est majoré de 2 minutes. Selon le calcul statique, la voiture devrait effectuer ce parcours en 10 minutes. L'horaire du bus prévoit 18 minutes pendant l'heure de pointe.

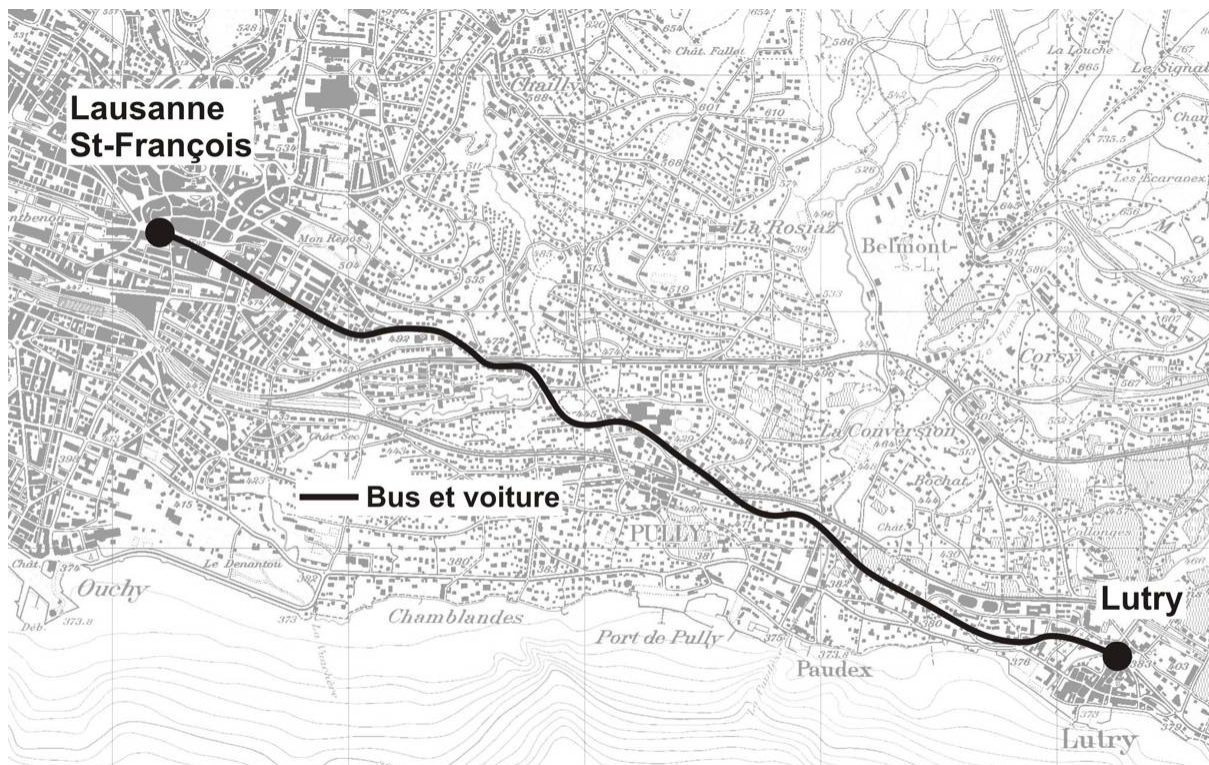
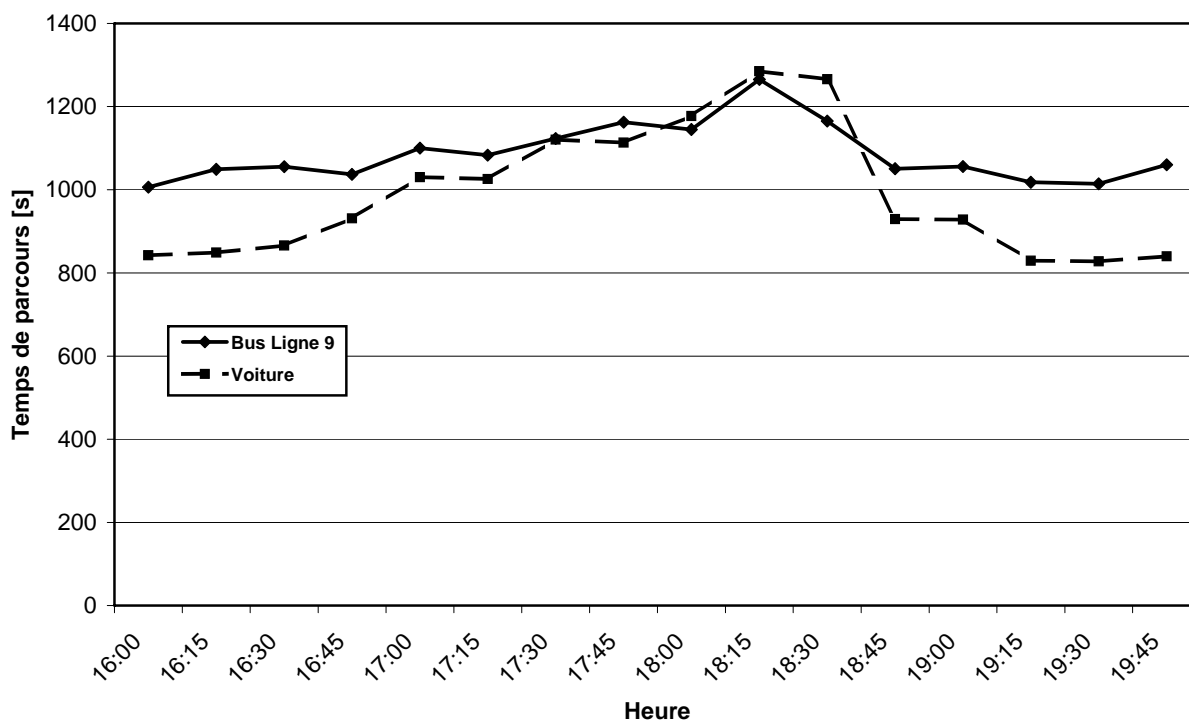


Figure 56 : Itinéraire entre Lutry et le centre-ville de Lausanne

La figure suivante montre les résultats issus de la simulation :



**Figure 57 : Temps de parcours entre Lutry et le centre-ville de Lausanne**

Dans ce deuxième cas, la différence entre les deux modes pendant l'heure de pointe est quasiment nulle. Le bus ne circule pas entièrement en site propre et doit passer plusieurs carrefours, tout comme les voitures. Par contre, la variabilité du temps de parcours est tout de même inférieure, ce qui indique une meilleure fiabilité de l'information.

On constate également que le temps de parcours indiqué par le système de navigation statique est trop optimiste. Même en circulation libre, les voitures dans le modèle sont ralenties par rapport au calculateur de temps de parcours statique.

### 8.4.3 Cas 3 : Lausanne-Vennes – Place de la Riponne

Ce troisième cas décrit l'axe majeur au nord-est de la ville de Lausanne. A Lausanne-Vennes se trouve une jonction avec l'autoroute A9, ainsi qu'un parking-relais depuis lequel on peut rejoindre le centre-ville à l'aide des lignes de bus 5 et 45. A la place de la Riponne se situe un des grands parkings couverts de la ville de Lausanne. Selon les informations statiques, ce trajet dure environ 9 minutes en voiture et 15 minutes en bus.

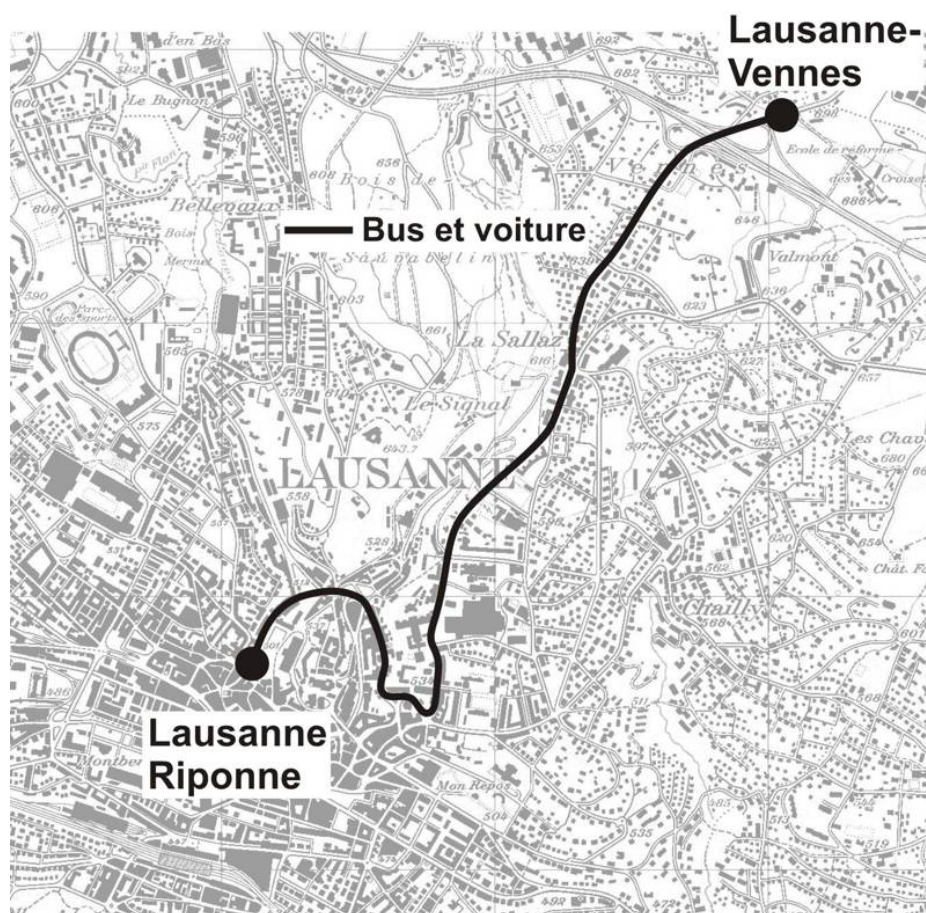


Figure 58 : Itinéraire entre Lausanne-Vennes et la place de la Riponne

Le temps nécessaire pour stationner la voiture est comparable pour les deux parkings de Lausanne-Vennes et la Riponne, avec plutôt un avantage pour le parking-relais, car il est plus petit et une place libre se trouve plus facilement. Il s'y rajoute, par contre, le temps d'attente au prochain bus, qui circule avec une fréquence de six minutes environ. La figure suivante montre les temps de parcours mesurés dans le modèle pour les voitures et les bus entre Lausanne-Vennes et la place de la Riponne.

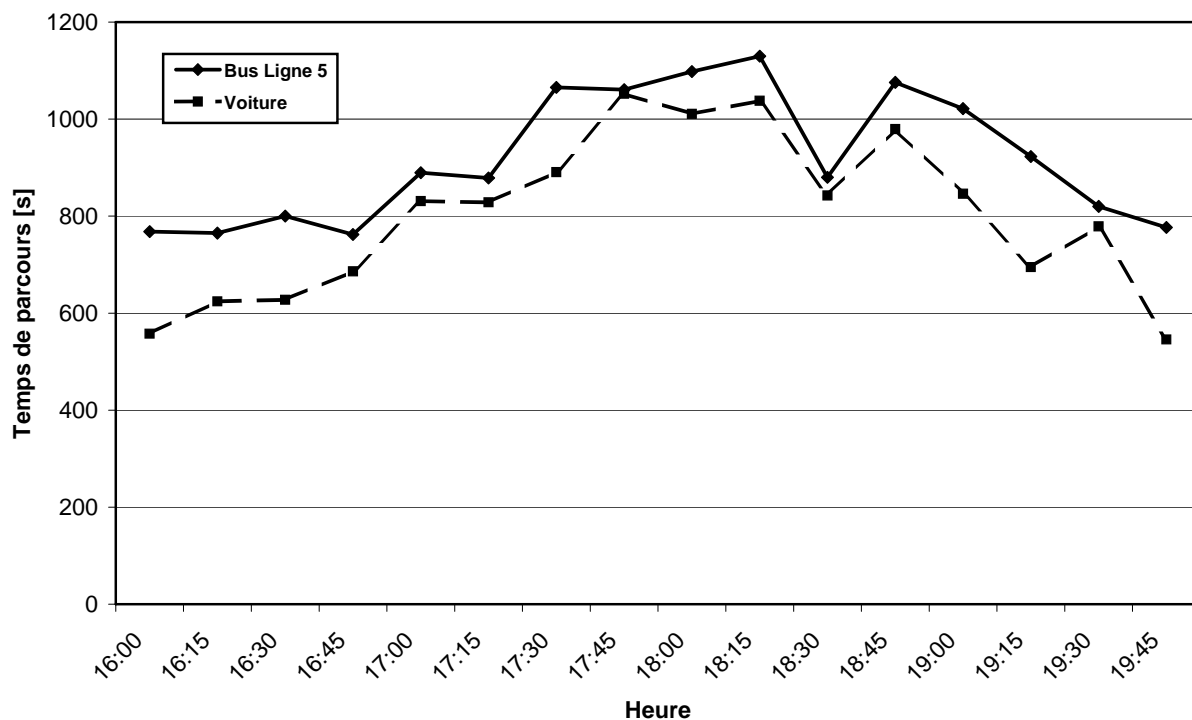


Figure 59 : Temps de parcours entre Lausanne-Vennes et la place de la Riponne

Le manque de voies réservées pour les bus fait que les retards sont fréquents sur cet axe et les temps de parcours sont comparables entre les deux modes à l'heure de pointe. Ceci malgré le fait que le bus doit effectuer plusieurs arrêts, afin d'assurer son service.

## 8.5 Synthèse des résultats

L'application du concept de Système de Navigation Dynamique Multimodal au cas concret du modèle de la ville de Lausanne par l'intermédiaire de la simulation microscopique a permis de tirer certains enseignements quant aux performances pouvant être attendues d'un tel système.

Dans un premier temps, l'aspect purement routier du SNDM a été analysé. L'objectif de cette partie était de mettre en évidence les gains – en termes de temps de parcours – potentiel des utilisateurs du système en comparaison à des usagers non équipés du SNDM. Ces derniers ont été décomposés en trois catégories, chacune ayant un niveau de connaissance du réseau différent. Les auteurs ont choisi d'utiliser, dans le cadre de cette analyse spécifique, la technique du FCD (Floating Car Data) pour la récolte dynamique des temps de parcours d'arc. De plus, le concept du Système de Navigation Auto-alimenté semblant particulièrement intéressant, il a été décidé de l'appliquer de manière à en connaître les limites.

Cette analyse a montré que pour un taux d'équipement inférieur à 0.5 % les performances des véhicules équipés étaient semblables à ceux d'usagers habituels du réseau. Pour un taux compris entre 0.5 % et 5 %, le gain est maximal, les temps de parcours enregistrés étant inférieurs à ceux des usagers experts. Toutefois, au-delà de ce taux de 5 % les performances des véhicules équipés du SNA reviennent à un niveau moyen. Ceci s'explique par le fait que trop de véhicules sont informés de l'état réel du trafic, essaient de contourner les zones congestionnées et se ralentissent mutuellement. Une prise en compte anticipée de la réaction des véhicules équipés devrait donc être fournie avant de leur transmettre l'information de trafic. Cette technique est appelée communément l'"Anticipatory Route Guidance". On notera toutefois que sans même utiliser une telle approche, le niveau de performance général du trafic tient à s'améliorer et offre donc des perspectives encourageantes.

Dans un second temps, la possibilité d'intégrer les lignes de transport public dans le modèle de simulation a été utilisée pour mettre en évidence l'utilité de l'approche multimodale du SNDM. Il faut néanmoins rappeler ici que le logiciel AIMSUN simule le déplacement des véhicules et non des personnes. Il n'était donc pas possible de réaliser une analyse de gain global comme dans le cas purement routier.

Plusieurs cas de trajet allant du centre ville vers la banlieue, ou inversement, ont été analysés. Des solutions entièrement voiture, entièrement transports publics ou encore (lorsque cela était possible) multimodales ont été comparées pour le même trajet. Ces quelques exemples ont permis de montrer clairement qu'en fonction de l'heure à laquelle était effectué le déplacement, le temps de parcours minimal était obtenu avec des modes différents. Il a été également démontré que sur certains axes pénétrants, desservis par des lignes de bus avec peu de secteurs à voies réservées, les retards affectant les voitures n'encourageait pas forcément les usagers à prendre le bus, ce dernier étant également ralenti par les mauvaises conditions de trafic. Finalement, un exemple concret de trajet multimodal a illustré l'importance d'un calcul aller et retour.

## 9 Conclusions

Cette étude a permis d'aborder la problématique d'un système de navigation dynamique multimodal (SNDM) dans le contexte particulier des réseaux de transport en Suisse.

Dans un premier temps, une analyse bibliographique a permis de passer en revue les projets pratique et théorique d'application du concept de SNDM. Elle a servi de base de repère pour une description détaillée du fonctionnement de ce système et des éléments qui le composent. A ce stade, diverses propositions pour contribuer à l'amélioration des performances d'un tel outil ont été décrites. Il s'agit notamment d'une approche du calcul de l'itinéraire optimal prenant en compte le trajet aller et retour. Les gains théoriques d'une telle application ont alors été démontrés. Des considérations sont faites sur le sujet très sensible du calcul du coût généralisé d'un trajet mono ou multimodal. Elle a été placée sous le point de vue spécifique de l'utilisateur et non de la communauté en général. Entre autres résultats, des suggestions quant au calibrage personnalisé de la fonction de coût généralisé ont été proposées. Cette première partie de l'étude se termine par une description des besoins concrets en données du SNDM.

Un bilan des systèmes d'informations aux usagers existant en Suisse, et plus particulièrement sur les données aujourd'hui disponibles est réalisé. Il permet de relever, pour le domaine routier, la forte prépondérance d'informations de types événementiels ou qualitatives face aux informations quantitatives. Il en ressort également qu'hormis les données transmises par la gendarmerie ou les usagers (par téléphone portable), la grande majorité des informations provient des boucles inductives, qu'il s'agisse de station de comptage ou de boucle pour la gestion des carrefours à feux. En comparaison avec les besoins en données du SNDM définis antérieurement, l'étude met en évidence que, même si les systèmes de récolte de données des transports publics sont encore largement perfectibles, c'est avant tout au niveau routier que des efforts restent à faire. Il s'agit notamment de trouver des solutions pour obtenir des temps de parcours réactualisés sur les grands axes interurbains (principalement les autoroutes) et dans les agglomérations.

Dans cette optique, la troisième partie de l'étude propose, d'approfondir deux types de méthodes d'estimation de temps de parcours particulièrement applicable au cas de la Suisse. Il s'agissait d'abord d'exploiter au maximum les données provenant des boucles inductives mais il a toutefois été démontré que la densité actuelle de ces dernières n'était pas suffisante pour obtenir une prédiction d'estimation de temps de parcours acceptable. L'opportunité d'utiliser d'autres types de détecteurs est suggérée pour augmenter cette densité. La technique de mesure directe basée sur le Floating Car Data (FCD) est décrite. Une analyse de l'état de l'art dans ce domaine a permis aux auteurs de proposer une série d'améliorations dont l'apport a été démontré par l'utilisation d'un modèle de simulation. De la superposition du SNDM et du FCD est apparu le concept de système de navigation auto-alimenté (SNA) dont le potentiel paraît très intéressant.

Finalement, une évaluation partielle des performances du SNDM a été réalisée sur la base d'un modèle de l'agglomération lausannoise élaboré à l'aide du microsimulateur AIMSUN. Dans un premier temps, une approche purement routière a été abordée. Le choix de la tech-

nique d'acquisition des données dynamique s'est porté sur celle du FCD et plus particulièrement sur le concept du SNA. Les performances de ce dernier se sont montrées comparable à celles d'un utilisateur habituel du réseau pour un taux d'équipement inférieur à 0.5 % alors qu'elle surpasse celle d'un utilisateur expert pour un taux de 0.5 à 5 %. Au-delà de ce taux, un retour à des performances moyennes est constaté, trop de véhicules ayant connaissance des conditions réelles de trafic. Il faut noter qu'une amélioration générale (totalité du trafic) des performances est toutefois constatée.

La deuxième partie de l'évaluation concerne la comparaison du choix modal pour différents trajets reliant la banlieue au centre de la ville ou vice-versa. Elle permet de démontrer qu'en fonction de l'heure à laquelle est effectué le déplacement, le temps de parcours minimal est obtenu avec des modes différents. Enfin, un exemple concret de trajet multimodal a illustré l'importance d'un calcul prenant en compte l'aller et retour, validant ainsi la démonstration théorique proposée plutôt dans l'étude.

## 10 Bibliographie

- [1] Raymann, L, Kloth, T., Baud, O. et Fankhauser, S (2004). **Auswirkungen von Personal Travel Assistance (PTA) auf das Verkehrsverhalten**, Ernst Basler + Partner AG, Zürich. 1062. 118 p.
- [2] Zijderhand, F. (1995). **SOCRATES - Applications and Architecture**, *Philips Journal of Research*, 48: pp.
- [3] Boyce, D.E., Kirson, A.M. et Schofer, J.L. (1994). **ADVANCE - The Illinois dynamic navigation and route guidance demonstration program**, *Advanced technology for road transport: IVHS and ATT*, p.
- [4] Saricks, C.L., Schofer, J.L., Sööt, S. et Belella, P.A. (1997). **Evaluating Effectiveness of Real-Time Advanced Traveler Information System Using a Small Test Vehicle Fleet**, *Transportation Research Record 1588*, pp. 41-48
- [5] Schofer, J.L., Koffelman, F.S. et Charlton, W.A. (1997). **Perspectives on Driver Preferences for Dynamic Route Guidance Systems**, *Transportation Research Record 1588*, pp. 26-31
- [6] De Leuw et Cather (1996). **ADVANCE Insights and Achievement Compendium**, *Internal documentation*.
- [7] Hadj-Alouane, A., Hadj-Alouane, N., Juma, O., Sarathy, G. et al. (1996). **The Ali-Scout route guidance simulation**, *FAST-TRAC phase IIB deliverable*, University of Michigan, p.
- [8] Catling, I. et McQueen, B. (1991). **Road Transport Informatics in Europe - Major Programs and Demonstrations**, *IEEE Vehicular Technology Society*, pp. 132-140
- [9] König, W., Günther, C. et Kusch, B. (1997). **The operation of a dynamic route guidance system - experiences from the dynamic traffic guidance system Berlin**. dans *Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Transport Systems*, Berlin.
- [10] Bonsall, P. et Joint, M. (1991). **Driver Compliance with Route Guidance Advice: The Evidence and Its Implications**, *Society of Automotive Engineers*, pp. 47-59
- [11] Larima, P. (1997). **VERDI - From field trial to deployment**. dans *Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Transport Systems*, Berlin.
- [12] Mammano, F. (1996). **TravTek Operation Test Evaluation: Final Report**, US Federal Highway Administration, FHWA-RD-96-037. p.
- [13] Van Aerde, M. et Hesham, R. (1995). **TravTek Evaluation Modelling Study**, US Federal Highway Administration, FHWA-RD-95-090. p.
- [14] Miles, J. et Walker, J. (1999). **The Well Timed Study: West European Local Legal Arrangements For Transport Information Management And Exchange Of Data**, *ANIMATE Project*, European Commission DG XIII C6, p.
- [15] Maindard, L. (1997). **VISIONAUTE - Launching of the First Broadcast Urban Traffic Information Service in Europe**. dans *Proceedings of the 4th World Congress on Intelligent Transport Systems*, Berlin.
- [16] Mahmassani, H.S., Hu, T.-Y., Jayakrishnan, R., Cohen, M. et al. (1993). **A Simulation-Based Framework for the Analysis of Traffic Networks Operating with Real-**

- Time Information**, California PATH Working Paper UCB-ITS-PRR 93-25, ISSN 1055-1425. p.
- [17] Abdulhai, B., Sheu, J.-B. et Recker, W. (1999). **Simulation of ITS on the Irvine FOT Area Using 'Paramics 1.5' Scalable Microscopic Traffic Simulator, Phase I: Model Calibration and Validation**, California PATH Research Report UCB-ITS-PWP-99-7, p.
- [18] Ben Akiva, M., Bierlaire, M., Kotsopoulos, H. et Mishalani, R. (1998). **Integrated Simulation framework for evaluating dynamic management systems**. dans *Proceedings of the 1st World Congress on Application of Transport Telematics and Intelligent Transportation Systems*,
- [19] Barcelo, J. et Ferrer, J.-L. (1995). **A simulation study of an area of Dublin using the AIMSUN2 simulator**, Department of statistics and Operation Research, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona. p.
- [20] Mahmassani, H.S., Hu, T.-Y., Peeta, S. et Ziliaskopoulos, A. (1994). **Development and testing of dynamic traffic assignment and simulation procedures for ATIS/ATMS applications**, US Federal Highway Administration, DTFH61-90-R-00074-FG. p.
- [21] Sanwal, K. et Walrand, J. (1995). **Vehicles as Probe**, California PATH Working Paper UCB-ITS-PWP-95-11, ISSN 1055-1417. p.
- [22] Khattak, A.J., Al-Deek, H. et Thananjeyan, P. (1998). **A Combined Traveller Behavior and System Performance Model with Advanced Traveller Information Systems**, *Transportation Research*, 32A, no.7: pp. 479-493
- [23] Levinson, D., Gillen, D. et Chang, E. (1999). **Assessing the Benefits and Costs of Intelligent Transportation Systems: The Value of Advanced Traveler Information Systems**, California PATH, UCB-ITS-PRR-90-20. p.
- [24] Lappin, J. (2000). **Advanced Traveller Information Systems: What do ITS Customers want?**, US DOT Research and special programs administration, p.
- [25] Wunderlich, K.E. (1996). **An Assessment of Pre-Trip and en route ATIS Benefits in a Simulated Regional Urban Network**. dans *Proceedings of the 3rd World Congress on Intelligent Transport Systems*, Orlando.
- [26] Sengupta, R. et Hongola, B. (1998). **Estimating ATIS Benefits for the Smart Corridor**, California PATH, UCB-ITS-PRR-98-30. p.
- [27] Adler, J.L., Blue, V.J. et Wu, T.L. (1999). **Assessing Network and Driver Benefits From Bi-Objective In Vehicle Route Guidance**. dans *Proceedings of the 78th TRB Annual Meeting*, TRB
- [28] Jayakrishnan, R., Tsai, W., Oh, J.-S. et Adler, J.L. (1999). **Event-Based ATIS: Practical Implementation and Evaluation of Optimized Strategies (Part I)**, California PATH, UCB-ITS-PWP-99-7. p.
- [29] Jayakrishnan, R., Tsai, W., Oh, J.-S. et Adler, J.L. (2001). **Event-Based ATIS: Practical Implementation and Evaluation of Optimized Strategies (Part I)**, California PATH, UCB-ITS-PWP-2001-1. p.
- [30] Arnet, Holzinger et Zwiauer (1999). **Vision einer flächendeckenden Fahrplanauskunft für die Schweiz - Eine Machbarkeitsstudie**, Aarproject AG, Zürich. 31 p.
- [31] Schulz (1999). **Multi-modal Information and Traffic Management Systems on Trans-European Networks (INFOTEN) - Final Report**, European Union, Bruxelles. 38 p.

- [32] Hall, Yim, Pfeifle et Weissenberger (1995). ***TravInfo Evaluation: Institutional element Phase 1 results***, California PATH, p.
- [33] Yim (2000). ***TravInfo Field Operational Test Evaluation: Information Service Providers Customer Survey***, California PATH, p.
- [34] Yim (2001). ***TravInfo Evaluation: Traveler Response Element Broad Area Study - Phase 2 Results Analysis of Wave 2 Survey***, California PATH, p.
- [35] Yim (2001). ***TravInfo Evaluation: Traveler Response Element - TravInfo 817-1717 Caller Study - Phase 2 Results***, California PATH, p.
- [36] Wolinetz, Khattak et Yim (2001). ***TravInfo Evaluation: Traveler Response Element Willingness to Pay for Traveler Information - Analysis of Wave 2 Survey***, California PATH, p.
- [37] Yim et Miller (2000). ***Evaluation on TravInfo Field Operational Test***, California PATH, p.
- [38] Miller et Tsao (1999). ***Assessing Opportunities for Intelligent Transportation Systems in California's Passenger Intermodal Operations and Services - Review of the Literature***, California PATH, p.
- [39] Flamm, M. (2003). ***Comprendre le Choix Modal - Les déterminants des Pratiques Modales et des Représentations Individuelles des Moyens de Transport***, Section d'Architecture, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne. 307 p.
- [40] Pallottino, S. et Scutellà, M. G. (1998). ***Shortest Path Algorithms in Transportation Models: Classical and innovative Aspects***, *Equilibrium and Advanced Transportation Modelling*, Marcotte, P. et Nguyen, S. Kluwer, 245-281 p.
- [41] Ziliaskopoulos, A. et Wardell, W. (2000). ***An Intermodal Optimum Path Algorithm for Multimodal Networks with Dynamic Arc Travel Times and Switching Delays***, *European Journal of Operational Research*, 125: pp. 486-502
- [42] Leitsch, B. (2002). ***A Public-Private Partnership for Mobility - Traffic Management Center Berlin***. dans *Proceedings of the 9th Congress on Intelligent Transport Systems*, Chicago.
- [43] Egeler, C. (2002). ***TRANS 3 - Introduction and Operation of a Multimodal Travel Information Service for Transport***. dans *Proceedings of the Swiss Transport Research Conference (STRC 2002)*, Ascona.
- [44] Radin, S. (2002). ***U.S. Transit Websites Status and Potential***. dans *Proceedings of the 9th Congress on Intelligent Transport Systems*, Chicago.
- [45] Vithen, C. (2002). ***Nordic Environmental Focused Multimodal Travel Planning System for Transport of Persons***. dans *Proceedings of the 9th Congress on Intelligent Transport Systems*, Chicago.
- [46] Esters, D. (2002). ***DOM - Der Orientierte Mensch -- The Requirements and Development of Mobility Orientated Internet Services***. dans *Proceedings of the 9th Congress on Intelligent Transport Systems*, Chicago.
- [47] Adler et Blue (1998). ***Toward the Design of Intelligent Traveler Information Systems***, *Transportation Research Part C*, 6: pp. 157 - 172
- [48] Neuherz, Patz, Pischner et Keller (2000). ***User Acceptance and Impacts of New Multimodal Traffic Information Services in Bayerninfo***. dans *Proceedings of the ITS World Congress*, Torino.
- [49] Hayes, Mentz et Parker (2000). ***Multimodal Metropolitan Trip Planner Trials In The Intercept Project***. dans *Proceedings of the ITS World Congress*, Torino.

- [50] Cortés, Cristián E., Lavanya, Riju, Oh, J.-S. et Jayakrishnan, R. (2001). **A general purpose methodology for link travel time estimation using multiple detection of traffic**, Institute of Transportation Studies, University of California, Irvine. UCI-ITS-WP-01-6. p.
- [51] Boyce, D., Hicks, J. et Sen, A. K. (1991). **In-vehicle navigation system requirements for monitoring link travel times in dynamic route guidance system**. dans *Proceedings of the 70th Annual Meeting of the TRB*, Washington D.C.
- [52] Jovanis, P.P. et Srinivasan, K. (1997). **Estimating the number of probe vehicles required for effective monitoring of network travel conditions**, *Transportation Research Record*, 1537: pp. 15-22
- [53] Sen, A., Thakuriah, P., Zhu, X. et Karr, A. (1997). **Frequency of probe reports and variance of travel time estimates**, *Journal of Transportation Engineering*, 123: pp. 290-297
- [54] Sen, A., Soot, S., Ligas, J. et Tian, X. (1997). **Arterial Link Travel Time Estimation: Probes, Detectors and Assignment-type Models**. dans *Proceedings of the 76th Annual meeting of the TRB*, Washington D.C.
- [55] Hellinga, Bruce et Fu, Liping (1999). **Assessing the expected accuracy of probe vehicle travel time report**, *Journal of Transportation Engineering*, 125: pp. 524-530
- [56] Sen, A. (1996). **ADVANCE Evaluation: Frequency of probe reports**, Urban Transportation Research, University of Illinois, Chicago. p.
- [57] Soot, S. et Condie, H. (1996). **ADVANCE Quality of Probe Reports**, Urban Transportation Research, University of Illinois, Chicago. p.
- [58] Westerman, M., Litjens, R. et Linnartz, J.-P. (1996). **Integration of Probe Vehicle and Induction Loop Data - Estimation of Travel Times and Automatic Incident Detection**, California PATH Research Report, UCB-ITS-PR-96-13. p.
- [59] CFF (2004). **Fragen und Antworten zu APFZ**, APFZ - Applikationsplattform im Fahrzeug, Bern. 2 p.
- [60] CFF (2004). **AFZ - Automatische Frequenzzählung**, APFZ - Applikationsplattform im Fahrzeug, Bern. 1 p.
- [61] CFF (divers). **EasyRide Newsletter**, pp.
- [62] Wardrop, J. G. (1952). **Some theoretical aspects of road traffic research**. dans *Proceedings of the Institute of Civil Engineers II, Part 1*,
- [63] Barcelo, J., Casas, J., Ferrer, J.L. et García, D. (1998). **Modelling Advanced Transport Telematic Applications with Microscopic Simulators: The Case of AIMSUN**. dans *Proceedings of the 10th European Simulation Symposium*, Society for Computer Simulation International
- [64] Sheffi, Y., 1985. **Urban Transportation Network: Equilibrium analysis with mathematical programming methods**. Vol. 1985, Cliffs, USA: Prentice-Hall.
- [65] Patriksson, M., 1994. **The traffic assignment problem, models and methods**. Vol. 1994, Utrecht, NL: VSP.
- [66] Yang, Q. et Koutsopoulos, H. (1997). **A microscopic traffic simulator for evaluation of dynamic traffic management systems**, *Transportation Research C*, 4: pp. 113-129
- [67] Barcelo, J., Casas, J., Ferrer, J.-L. et Garcia, D. (1998). **Modelling Advanced Transport Telematic Applications with Microscopic Simulators**. dans *Proceed-*

- ings of the 10th European Simulation Symposium*, Society for Computer Simulation International
- [68] Mahmassani, H.S., Chiu, Y., Huynh, N., Abdelghany, K. et al. **Technical report ST067-85-XIII: Dynasmart-X User's Manuel**, Center for transportation research, University of Texas, 80 p.
- [69] Peeta, S. (1994). **System optimal dynamic traffic assignment in congested networks with advanced information systems**, The University of Texas, Austin. p.
- [70] Peeta, S. et Ziliaskopoulos, A. (2001). **Foundations of dynamic traffic assignment: The past, the present and the future**, *Network and spatial Economics*, 1: pp. 233-266
- [71] Buisson, C. et Künkel, F., 2000. **Simulation du trafic routier**. Vol. 2000, Lyon: Collection du CERTU.
- [72] Hubschneider, H. (1984). **Mikroskopisches Simulationssystem für Individualverkehr und Öffentlichen Personennahverkehr**, *Schriftenreihe des Instituts für Verkehrswesen, Heft 26*, Universität (TH), Karlsruhe. p.
- [73] 2004. **AIMSUN 4.2, User Manual**. Vol. 2004, Transport Simulation Systems.
- [74] Cascetta, E., Nuzzolo, A., Russo, F. et Vietta, A. (1996). **A modified logit route choice model overcoming path overlapping problem - Specification and some calibration results for interurban networks**. dans *Proceedings of the 13th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, Lyon, France.
- [75] Barcelo, J. et Casas, J. (2004). **Methodological notes on the calibration and validation of microscopic traffic simulation models**. dans *Proceedings of the Transportation Research Board Conference*, Washington, D.C.
- [76] Shbaklo, S. et al. (1992). **Short-Time Travel Time Prediction**, ADVANCE Project Report, TRF-TT-01. p.
- [77] Chu, L., Yang, Z. et Oh, J.-S. (2001). **Development of a Synthetic Link Travel Time Prediction Model for ATMIS Applications**. dans *Proceedings of the Annual Meeting of the TRB*, Washington D.C.
- [78] Davis, G. A. et Nihan, N. L. (1991). **Non parametric regression and short-term freeway traffic forecasting**, *Journal of Transportation Engineering*, pp. 177-188
- [79] Oda, T. (1990). **An algorithm for prediction of travel time using vehicle sensor data**. dans *Proceedings of the 3rd International Conference on Road Control*, Institute of Electrical Engineers
- [80] Frascini, E. et Axhausen, K. (2001). **Day on day dependencies in travel time: result using ARIMA modelling**, IVT, ETHZ, Zurich. p.
- [81] Rice, John et Van Zwet, E. (2004). **A simple and effective method for predicting travel times on freeways**, *IEEE Transactions on ITS*, 5, No3: pp. P 200-207
- [82] Moorthy, C. K. et Ratcliffe, B. G. (1988). **Short term traffic forecasting using time series methods**, *Transportation Planning Technology*, 12: pp. 45-56
- [83] Van Lint, J.W.C. et Hoogendoorn, S.P. (2000). **Robust and adaptive travel time prediction with neural networks**, TRAIL Research School, Delft, p.
- [84] Park, Dongjoo et Rilett, Laurence R. (1998). **Forecasting Multiple-Period Freeway Link Travel Times Using Modular Neural Networks**. dans *Proceedings of the TRB*,
- [85] Dia, Hussein (2001). **An object-oriented neural network approach to short-term traffic forecasting**, *European Journal of Operational Research*, 131: pp. 253-261

- [86] Kisgyörgy, Lajos et Rilett, Laurence R. (2002). **Travel time prediction by advanced neural network**, *Periodica Polytechnica ser.civ.eng.*, 46: pp. 15-32
- [87] Palacharla, P. et Nelson, P. (1999). **Application of fuzzy logic and neural networks for dynamic travel time estimation**. dans *Proceedings of the International transactions in operational research*,
- [88] Rilett, Laurence R. et Park, Dongjoo (1999). **Direct forecasting of freeway corridor travel times using spectral basis neural networks**. dans *Proceedings of the TRB 78th*,
- [89] Okutani, Iwao et Stephanedes, Yorgos J. (1984). **Dynamic prediction of traffic volume through Kalman filtering theory**, *Transportation Research - B*, 18B: pp. 1-11
- [90] Young-Ihn, L. et Chan Young, C. (1998). **Development of link travel time prediction algorithm for urban expressway**. dans *Proceedings of the 5th World Congress on ITS*, Seoul.
- [91] Hall, Randolph W. (1996). **Route choice and advanced traveler information systems on a capacitated and dynamic network**, *Transportation Research - C*, 4: pp. 289-306
- [92] Engelson, L. (1997). **Self-fulfilling and Recursive Forecasts - an Analytical Perspective for Driver Information System**. dans *Proceedings of the 8th IATBR*, Austin, Texas.
- [93] Bottom, J., Ben Akiva, M., Bierlaire, M., Chabini, I. et al. (1999). **Investigation of route guidance generation issues by simulation with DynaMIT**. dans *Proceedings of the International symposium on transportation and traffic theory*, 14th,
- [94] Bishop, Christopher M., 1995. **Neural Networks for Pattern Recognition**. Vol. 1995, New York, NY, USA: Oxford University Press, Inc.
- [95] Haykin, Simon, 1999. **Neural networks: A comprehensive foundation**. Vol. 1999, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- [96] Dreyfus, Gérard, Martinez, J.-M. et Samuelides, M., 2002. **Réseaux de neurones: méthodologie et applications**. Vol. 2002, Paris: Editions Eyrolles.
- [97] Teodorovic, Dusan et Vukadinovic, Katarina, 1998. **Traffic Control and Transport Planning : A Fuzzy Sets and Neural Networks Approach**. Vol. 1998, Kluwer Academic Pub.

# 11 Annexes

## 11.1 Questionnaire transports publics

Le questionnaire suivant a été envoyé auprès quelques entreprises de transports publics en juillet 2003, afin de pouvoir se faire une idée sur l'état actuel et prévu au niveau de l'acquisition de données et de l'information des voyageurs. Comme les huit entreprises contactées se trouvent en Suisse orientale, ce questionnaire est en allemand :

Transportunternehmen: \_\_\_\_\_

Anzahl Fahrzeuge: \_\_\_\_\_

Kontaktperson: \_\_\_\_\_

### 1. Erhobene Daten

Welche Daten erhebt Ihr Unternehmen? Bitte geben Sie die Häufigkeit an, mit der die jeweiligen Daten erhoben werden (in Echtzeit, täglich, wöchentlich, monatlich, jährlich,...)

Kategorie	Daten	Häufigkeit
a) Flotte	Position der Fahrzeuge im Strassennetz	_____
	Technischer Zustand der Fahrzeuge	_____
b) Linie	Einhaltung des Fahrplans bzw. der Kadenz	_____
	Effektive Fahrzeit zwischen Haltestellen	_____
	Haltezeiten an den Haltestellen	_____
	Jeweiliger Fahrzeugtyp des Kurses	_____
c) Fahrzeug	Besetzungsgrad	_____
	Reparaturbedarf (Fahrgastraum, Fahrzeug-technik, etc.)	_____

2. Information des ÖV-Benutzers

a) Welche Informationen geben Sie an Ihre Kunden weiter?

---

---

---

---

b) Mit welchen Hilfsmitteln?

---

---

---

---

3. Wie sehen Sie die Zukunft der Benutzerinformation Ihres Unternehmens?

a) Welche Informationen werden Sie in Zukunft an Ihre Kunden weitergeben?

---

---

---

---

b) Mit welchen Hilfsmitteln?

---

---

---

---

c) Müssen Sie dazu andere Daten erheben, bzw. die Messhäufigkeit der bestehenden Daten erhöhen?

---

---

---

---

4. Verbesserung der Kundeninformation

a) Glauben Sie, dass die Verbesserung der Kundeninformation eine Zunahme der Frequenzen bewirken kann?

---

---

---

---

b) Welche Verbesserungen könnten sich finanziell lohnen?

---

---

---

---

5. Multimodale Verkehrsinformation

a) Glauben Sie, dass die Teilnahme Ihres Unternehmens an einer multimodalen Informationsplattform die Attraktivität Ihrer Dienstleistungen steigern könnte (z.B. im Zusammenhang mit Park&Ride, Car Sharing, etc.)? Könnte das Gegenteil, eine Abnahme der Attraktivität, der Fall sein?

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

b) Wie würden Sie dabei das Interesse der folgenden Informationen für den Kunden bewerten? (0 = unbedeutend, 1 = interessant, 2 = notwendig)

Kategorie	Information	Wichtigkeit		
		0	1	2
a) Zeit	Aktuelle Fahrzeit (in Echtzeit)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Verspätungen	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Wartezeit bis zum nächsten Fahrzeug	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
b) Komfort	Fahrzeugtyp	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Besetzungsgrad	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
c) Andere	Umsteige- und Verbindungsmöglichkeiten	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	Preisauskunft	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

6. Weitere Bemerkungen

---

---

---

---

---

---

---

---

---

---

Les entreprises suivantes ont reçu ce questionnaire. Il s'agit d'entreprises qui offrent des services dans des grandes agglomérations :

Basler Verkehrs-Betriebe  
Bernmobil  
BLS Lötschbergbahn AG  
Regionalverkehr Bern-Solothurn RBS  
Verkehrsbetriebe Luzern AG  
Verkehrsbetriebe St. Gallen  
Sihltal Zürich Uetliberg Bahn SZU  
Verkehrsbetriebe Zürich

Le tableau suivant résume les quatre réponses reçues de la part des entreprises suivantes :

Bernmobil  
BLS Lötschbergbahn AG  
Verkehrsbetriebe St. Gallen  
Verkehrsbetriebe Zürich

Pour des questions de confidentialité, les entreprises sont rendues anonymes :

Question	Entreprise 1	Entreprise 2	Entreprise 3	Entreprise 4
1 Données				
a Position	6 à 20 min	15 sec, à 30 m près	+/- quotidien	Temps réel
Etat technique		Bus : 15'000 km, tram : hebdomadaire	hebdomadaire	Temps réel
b Horaire / Cadence		15 sec	quotidien	Temps réel
Temps de parcours	1 à 2 min	15 sec	quotidien	Temps réel
Temps d'arrêt	30 sec	15 sec	quotidien	Temps réel
Type de véhicule		toujours connu	parfois	-
c Taux d'occupation		Comptages : 4/an à partir de 2004	25/an	Journalier
Besoin réparation	selon l'âge	quotidien	quotidien	
2 Info à l'utilisateur				
a Type d'info	<p>Horaire de poche, temps de départ par arrêt affiché (également disponible sur demande).</p> <p>Dans les véhicules : plan de ligne, annonces digitales lancées par chauffeur</p> <p>Annonces par centre de gestion dans véhicules ou à des arrêts importants</p>	<p>Heure de départ, n° de ligne et destination - annonces acoustiques - plan de la ligne avec tous ses arrêts - plan du réseau - demande d'arrêt dans le bus</p> <p>Changement d'exploitation / Perturbations aux arrêts</p>	<p>Horaires, retards, changements de service, composition des trains</p>	<p>Arrêts, prochain arrêt, infos spéciales (bouchon, accident, actualités, etc.). Prochain départ en temps réel, infos horaire</p>
b Moyens		<p>Anciens véhicules : bandes rétro-éclairées et haut-parleurs.</p> <p>Véhicules récents : moniteurs et annonces automatiques</p> <p>Annonces du centre de gestion - Moyens divers (journaux, internet, affiches, etc.)</p>	<p>Affiches, annonces, panneaux variables, infos par personnel, internet, horaires imprimés, plans de lignes</p>	<p>Panneaux variables, affiches, annonces vocales</p>
3 Futur				
a Informations	<p>Annonces automatiques, plus annonce optique du prochain arrêt, evt. heure de départ aux arrêts importants</p>	<p>Comme ci-dessus, plus : déviation temps de parcours, correspondances (assurés et non-assurés), perturbations de manière optique, double perception en général, plans des environs de l'arrêt</p>	<p>Comme ci-dessus, mais améliorer l'information en cas de perturbations</p>	<p>Données de l'horaire, demande d'horaire par SMS</p>
b Moyens		<p>Moniteurs, annonces automatiques</p>	<p>Comme ci-dessus</p>	<p>Voix, radio, internet, SMS, panneaux variables</p>

c	Données supplémentaires		Positionnement à 5 m près	Améliorer la communication entre les sources d'information, moderniser les outils, utiliser des technologies nouvelles	Non
4	Amélioration info				
a	Impact fréquences		Oui, mais pas rapidement. Clients occasionnels se sentent mieux et utilisent de plus en plus les TP. Manque d'info = barrière importante	L'information est un élément important pour le service et le marketing. Ainsi résultent des croissances de fréquence	Oui
b	Rentable ?	Systèmes simples qui indiquent les départs aux arrêts	L'investissement sur les prochaines années au niveau de l'information, système de gestion, comptages automatiques est rentable, car le service complet est optimisé		Optimisation des horaires
5	Info multimodale				
a	Plate-forme multimodale		Les expériences avec CarSharing et Park&Ride ont été positives et ont augmenté l'attractivité. Une centralisation des données au niveau national serait souhaitable, mais impossible dans les 10 ans à venir	Oui	L'attractivité des services augmenteraient dans un groupement régional
b	Importance pour le client				
	Temps de parcours actuel	0	1	1	2
	Retards	1	2	2	2
	Temps d'attente	1	2	2	2
	Type de véhicule	0	1 (Plancher bas et climatisation)	1	2
	Taux d'occupation	0	0	1	1
	Correspondances	1	2	2	2
	Prix	0	2 (Pas pendant le voyage)	1	0

## 11.2 Construction et calibration des réseaux de simulation

### 11.2.1 Le réseau "centre-ville"

Dans un premier temps, un réseau se limitant au centre-ville de Lausanne (voir Figure 60) a été réalisé puis calibré. Il est utilisé comme base pour le travail portant sur l'évaluation, l'amélioration et le développement des méthodes d'estimation et de prédiction de temps de parcours par FCD.

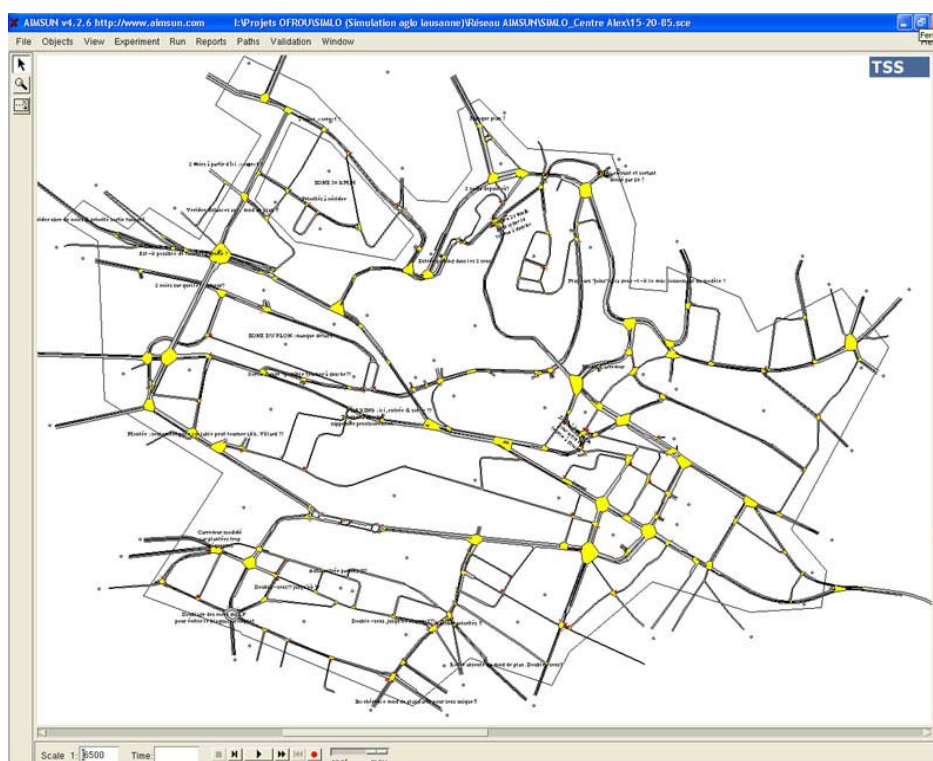


Figure 60 : Réseau du centre-ville

Toutes les routes autorisées à la circulation y sont représentées. La demande en trafic est déduite du modèle macroscopique EMME/2 de l'agglomération lausannoise, modèle tenu à jour par le bureau Robert-Grandpierre & Rapp. Le réseau AIMSUN du centre-ville étant moins étendu que le modèle EMME/2, une matrice origines – destinations (matrice OD) spécifique à la zone du centre-ville a été déterminée à l'aide d'un outil du logiciel EMME/2. Sa dimension est de 80 par 80 et son volume horaire total de 16'437 véhicules.

Malheureusement, il ne s'agit que d'une matrice horaire, celle de l'heure de pointe du soir. Une seule heure n'étant pas suffisante pour analyser de manière pertinente la dynamique des flux telle que nécessaire dans le cadre de cette étude, il a été décidé d'étendre la demande à une période de cinq heures centrée sur l'heure de pointe du soir. Pour ce faire, les données de compteurs fédéraux disposés sur quatre axes principaux du centre-ville ont pu être utilisées pour déterminer l'évolution de la demande durant la journée et, en particulier durant la période des cinq heures.

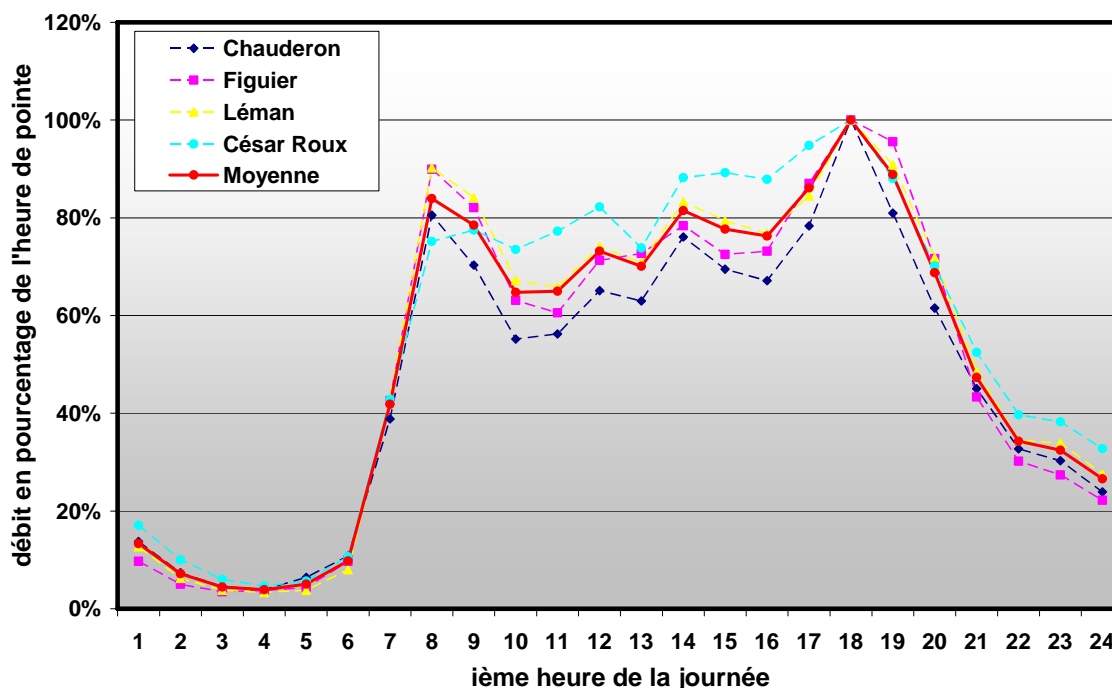


Figure 61 : Evolution journalière du volume de trafic au centre-ville (4 compteurs et la moyenne)

En se basant sur l'hypothèse simplificatrice que la "structure" de matrice OD durant les deux heures précédant et succédant l'heure de pointe est identique, la matrice de cinq heures est obtenue en multipliant la demande de chaque paire OD par le coefficient de volume global spécifique à chaque tranche horaire. Ces coefficients sont déterminés par l'évolution moyenne des quatre compteurs comme le montre la Figure 61.

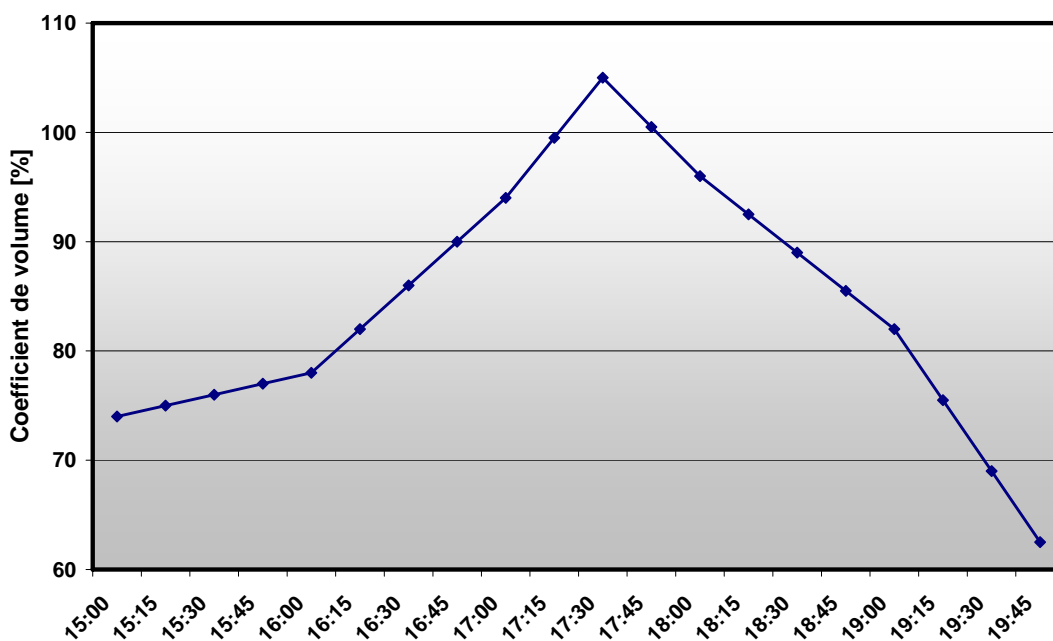


Figure 62 : Coefficient de volume adopté pour chaque tranche de demande de 15 minutes

Les premières simulations ayant montrés que la différence trop marquée entre les volumes de chaque tranche horaire entraînait des répercussions non réalistes sur l'affectation du trafic sur le réseau, il a donc été décidé de diviser chaque période en quatre tranches de quinze minutes. Les données des compteurs étant agrégées à l'heure, les coefficients de volume propre à chaque tranche ont été obtenus par interpolation. Les volumes de trafic illustrés à la Figure 62 sont ceux qui ont finalement été adoptés.

Le réseau est composé de 1351 sections regroupées en 524 polysections (dénomination spécifique à AIMSUN) et de 241 nœuds. Une hiérarchie à quatre niveaux a été adoptée pour classifier les polysections selon leur importance. Leurs caractéristiques sont résumées par le Tableau 13. A noter que le paramètre de capacité "AIMSUN" n'est utilisé que pour le calcul de la désutilité des itinéraires et ne représente en aucun cas une limitation physique de l'écoulement des flux de véhicules (voir §8.2.3.1). Pour les intersections équipées de signalisations lumineuses, des plans de feux fixes fournis par la ville de Lausanne ont été utilisés.

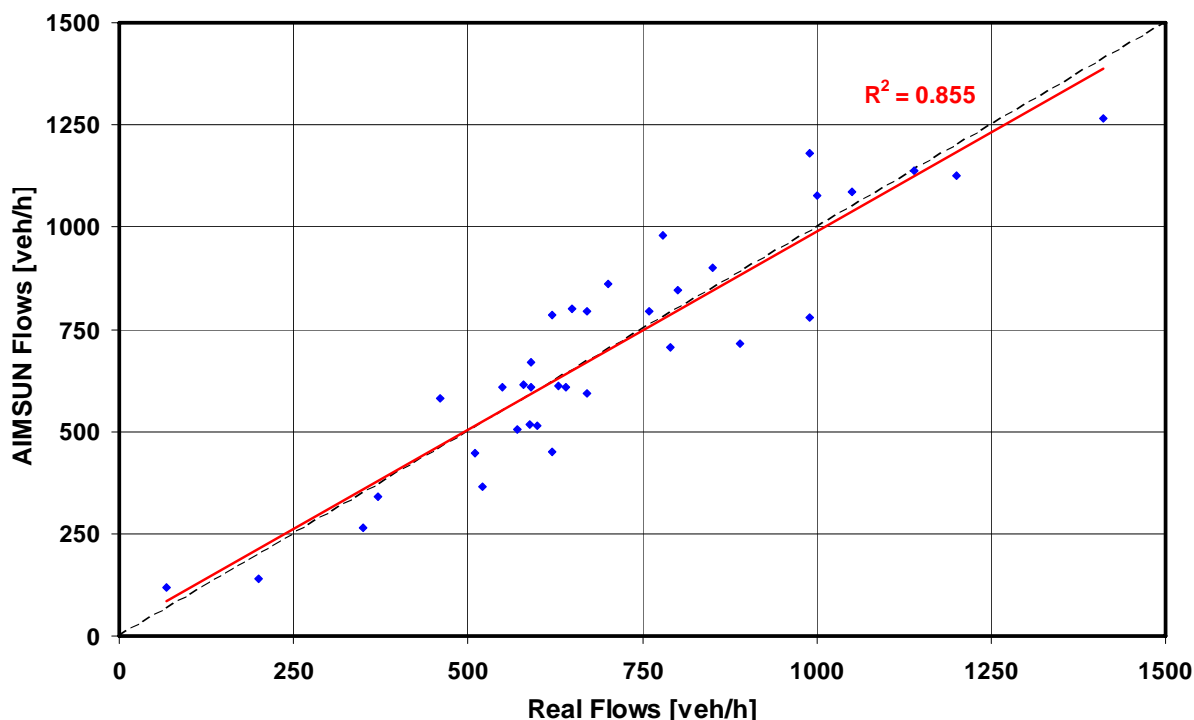
	Capacité "AIMSUN" [véh/voie]	Vitesse limite [km/h]
Arterial	1000	50
Urban road	700	50
Street	300	40
Street 30	1	30

**Tableau 13 : Caractéristiques des 4 niveaux hiérarchiques de polysections choisis pour le réseau du centre-ville**

Le calibrage de ce modèle a été réalisé en deux étapes. Dans un premier temps, une série de paramètres comportementaux ont été mesurés sur le terrain dont notamment le temps de réaction au stop, paramètres importants pour des réseaux à densité de jonction à feux élevée. Par la suite, le plus gros du travail a porté sur les paramètres du choix de route. Les flux obtenus dans AIMSUN ont été comparés aux valeurs de comptages utilisées pour la calibration du modèle EMME/2 à l'origine de la matrice utilisée. Dans le périmètre du centre-ville, une trentaine de points étaient disponibles.

Parmi ces nombreux paramètres, la fréquence d'actualisation a été finalement fixée à 3 minutes et la période des statistiques prise en compte à 9 minutes. Le modèle C-Logit s'est révélé être le plus performant dans ce cas. Il a été appliqué sur un lot de 10 « path trees » maximum. Le facteur d'échelle, lui, a été fixé à 15.

La comparaison entre les flux ainsi obtenus et les valeurs des comptages réels est présentée à la Figure 63.



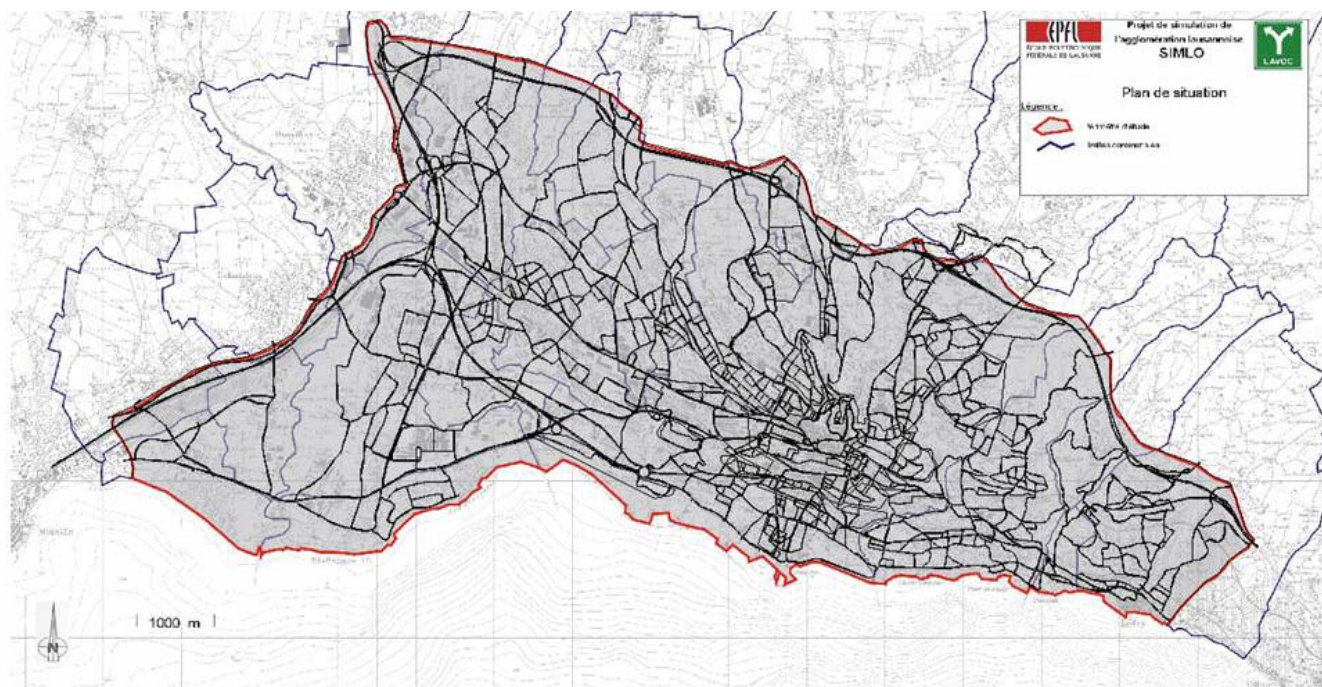
**Figure 63 : Comparaison entre les débits du modèle AIMSUN (Centre-ville) et ceux réellement mesurés sur le terrain**

Si, d'une manière générale, ces résultats peuvent être jugés comme satisfaisant, l'analyse de certains points où la différence est plus marquée a permis de mettre en évidence certaines incohérences de la matrice fournie. D'ailleurs, il est intéressant de noter que la corrélation entre les flux AIMSUN et réels est sensiblement meilleure qu'entre les réels et ceux du modèle EMME/2.

Faute de données, aucune validation n'a pu être réalisée au niveau des temps de parcours. Seules les valeurs de comptage d'un seul jour ayant été mises à disposition, une analyse de la variabilité d'une journée à l'autre et d'une réplication à l'autre n'a pu être réalisée. A titre d'information, les valeurs de flux AIMSUN ont été obtenues en moyennant les flux de 10 répliques différentes.

### 11.2.2 Le réseau "agglomération"

Ce réseau a été élaboré dans un deuxième temps, parallèlement à l'avancement de cette étude. Ce dernier englobe également la totalité des voies ouvertes au trafic de la région lausannoise. La limite du réseau est en grande partie définie par l'autoroute de contournement au nord et par le bord du lac sud. Les limites est et ouest ont été placées là où le nombre d'alternatives pour accéder à l'agglomération était le plus restreint (la distribution du trafic entre ces points étant fixée par la matrice OD). Il s'agit respectivement de la limite Morges – Préverenges à l'ouest et de la celle entre Lutry et Cully à l'est. Le réseau ainsi défini est illustré par la Figure 64. Ce réseau présente l'avantage d'être d'une étendue suffisamment importante et d'une complexité permettant aux véhicules y circulant d'avoir un éventail intéressant d'alternatives en terme de choix de route.



**Figure 64 : Réseau de l'agglomération lausannoise**

Comme pour le réseau "centre", la matrice origine destination utilisée provient du modèle EMME/2. Les deux modèles couvrant plus ou moins la même zone, très peu d'adaptations de la matrice EMME/2 ont dû être effectuées. Une extension de la période de temps à étudier a également été réalisée, suivant le même principe que pour le réseau "centre". Toutefois, les temps de calculs et de traitement des données s'avérant conséquents vu la taille du réseau, cette période a été limitée à 3 heures, centrée sur l'heure de pointe du soir (donc de 16h00 à 19h00).

	Capacité "AIMSUN" [véh/voie]	Vitesse limite [km/h]
Highway	2000	120
Arterial	1950	50
Urban road	700	50
Street	300	40
Small street	10	30
Street 30	1	30

**Tableau 14 : Caractéristiques des 4 niveaux hiérarchiques de polysections choisis pour le réseau agglomération**

La taille de la matrice OD du réseau « agglomération » est de 292 par 292 avec un volume horaire total de 61'594 véhicules. Le réseau est lui composé de 16'006 sections, regroupées en 4'131 polysections, et de 1613 nœuds. La décomposition en niveaux hiérarchiques des polysections est décrite au Tableau 14. Pour cette étude, des plans de feux fixes ont été modélisés. Le passage en mode adaptatif est prévu dans une prochaine étape. Les données des feux n'ont pu être obtenues pour toute la zone étudiée. En effet, pour certaines jonctions, seule la société ayant installé les feux possède ces données et le prix à payer pour ces informations ne rentraient pas dans le budget de l'étude. Dans ce cas, des phases de feux simplifiées ont été introduites sur la base des flux traversant ces jonctions.

De manière prévisible, la calibration de ce modèle de grande taille a demandé une masse de travail importante. Il faut dire que la durée d'un run de simulation est légèrement inférieure à la moitié du temps simulé (1h20 pour 3h00 réelles). C'est principalement au niveau du modèle d'affectation de trafic que le travail de calibration s'est avéré le plus délicat. La stabilisation du DTA (éviter les mouvements *flip flop*) a été difficile à obtenir. La sur-utilisation des routes de faible hiérarchie a nécessité le choix d'un coefficient de capacité plus élevé que dans le cas du « centre-ville ». Le facteur d'échelle du modèle de choix de route C-Logit a également été difficile à déterminer. Ce dernier étant un paramètre global, il ne peut qu'être le résultat d'un compromis face à la large gamme de durées de temps de parcours.

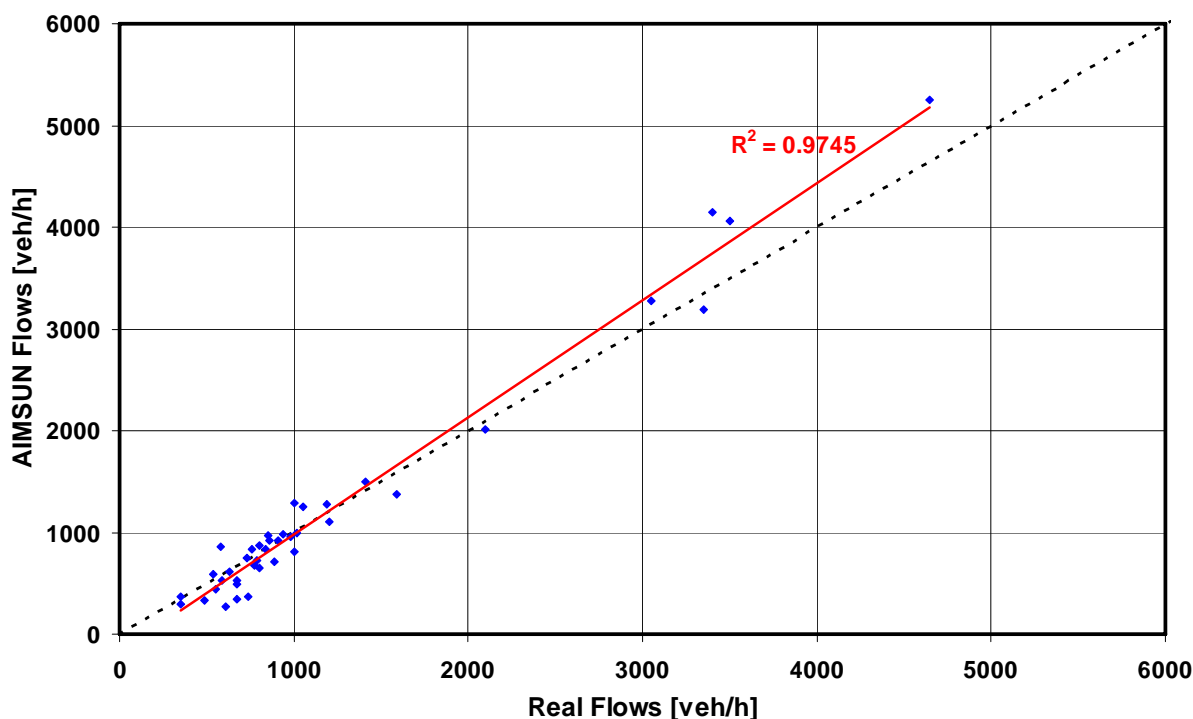


Figure 65 : Comparaison entre les débits du modèle AIMSUN (Agglomération) et ceux réellement mesurés sur le terrain

La Figure 65 présente les résultats de cette calibration sur la base d'une cinquantaine de points de mesures. Si l'excellente valeur du  $R^2$  paraît flatteuse, elle est en partie due à la présence des cinq points de comptages sur autoroutes qui minimise l'importance de certaines différences sur le réseau local. Au vu de certaines simplifications qui ont dues être réali-

sées, ce résultat est toutefois jugé comme satisfaisant. D'ailleurs, comme dans le cas du « centre-ville », la comparaison entre les valeurs réelles et celle d'AIMSUN s'est avérée meilleure que celle effectuée avec les valeurs d'EMME/2.

## 11.3 Modèle de prédiction des temps de parcours

### 11.3.1 Etat des connaissances

La majorité des études décrites au chapitre 3 n'utilisent pas de modèle de prédiction des temps de parcours dans leur approche. Seuls quelques développements s'appuyant sur des bases de données historiques ont été proposés. Il existe toutefois une riche littérature sur ce sujet. Shbaklo et al. [76] proposent d'ailleurs une revue détaillée des techniques possibles et les classent en quatre catégories: les profils historiques, les modèles statistiques, les analyses heuristiques et la simulation. Chu et al. [77] ont eux montré que les méthodes les plus couramment utilisées sont basées sur les:

- régressions non paramétriques
- séries temporelles
- reconnaissance de profils historique
- réseaux neuronaux
- filtres de Kalman
- simulation (Dynamic Traffic Assignment)

Dans leur étude, ils passent en revue ces différentes méthodes, montrant leurs avantages et leurs inconvénients, et déduisent que le choix de la méthode adéquate est dépendant du nombre et de la qualité des données disponibles ainsi que du type de service développé. En définitive, ils proposent une méthode permettant de passer automatiquement d'une technique à l'autre selon une liste de critères. Néanmoins, sa complexité semble rendre son utilisation difficile.

Si peu de travaux ont été proposés sur les régressions paramétriques [78], la méthode des séries temporelles - et particulièrement sa variante ARIMA - a fait l'objet de nombreuses études [79-82]. Elles mettent en évidence des résultats en général satisfaisants, certaines relevant toutefois un décalage récurrent dans le temps entre les valeurs prédites et réelles. Les techniques basées sur reconnaissance de profil historique [76] ne semblent pas suffisamment précises dans les cas d'incident non récurrent. Les réseaux de neurones [83-88] et les filtres de Kalman [89, 90] offrent par contre l'avantage de pouvoir utiliser une large variété de variables en input.

Les approches basées sur la simulation implique la création d'un modèle du réseau traité ce qui peut représenter une limitation en soi. Toutefois, elles permettent des prédictions plus pertinentes. Hall [91] et Engelson [92] ont par exemple mis en évidence l'utilité de prendre en compte l'impact des informations fournies par les ATIS sur l'évolution du trafic et, par conséquent, sur sa prédiction. Ce principe a été concrètement mis en application dans le cadre du

développement de DYNAMIT par notamment Ben-Akiva et Bierlaire. DYNAMIT [93] est un système - basé sur un outil de simulation mésoscopique – prévu pour travailler en temps réel. Il évalue l'état du trafic actuel, prédit son évolution et fournit des informations consistantes et non biaisées aux usagers. Le principe de la *prévision anticipative* consiste, sur la base d'une première prévision de l'état du trafic, à déduire une série d'informations à transmettre aux usagers. Leurs réactions à ces informations sont ensuite simulées induisant un nouvel état du trafic. Celui-ci est généralement différent de celui prédit. Il s'en suit un processus itératif qui cherche à obtenir une convergence entre l'état prédit et l'état simulé après information des usagers (fixed point problem).

### 11.3.2 Définition des besoins

La prédiction des temps de parcours est un élément permettant d'améliorer les performances du SNDM. Le but de ce paragraphe est donc de choisir une méthode de prédiction appropriée à une utilisation dans le cadre de son développement. Les temps de parcours ainsi prédits sont principalement utilisés pour l'amélioration des techniques d'estimation de temps de parcours (§ 7.1.3.2).

### 11.3.3 Choix de la méthode

Si les auteurs ont proposé une série d'innovations dans le domaine de l'estimation des temps de parcours, en revanche celui de la prédiction n'est ici considéré que comme un outil sans qu'aucun travail de développement n'y soit rattaché. Il s'agit donc de choisir la méthode la plus adéquate parmi les nombreuses proposées dans la littérature et de l'adapter au cas particulier du modèle de la ville de Lausanne.

Afin d'effectuer cette sélection il est nécessaire de définir les inputs à disposition et les outputs souhaités. Du côté des inputs, la méthode devra évidemment reposer sur les mesures présentes et passées des temps de parcours d'arcs. Comme ces valeurs proviennent d'une méthode d'acquisition par FCD, il est plus juste de parler de valeurs estimées. Il en effet important de rappeler ici que les temps de parcours qui seront utilisés par la méthode seront entachés d'une certaine erreur d'estimation, ce qui influencera évidemment la qualité de la prédiction. De plus, ces valeurs peuvent avoir été estimées par le biais de processus différents ( $ELT_f$ , méthode combinée ou méthode de substitution) donnant ainsi lieu à des séries chronologiques au comportement non « naturel » à l'inverse d'une série de valeurs uniquement mesurées. A ces valeurs du jour peuvent s'ajouter, si besoin est, celles du profil historique. La comparaison d'une méthode avec ou sans l'usage de ces valeurs devra permettre de juger de l'utilité de leur intégration.

Du point de vue des outputs, l'élément essentiel est le choix du nombre de périodes futures pour lesquelles une prédiction doit être réalisée. Idéalement, ce nombre devrait être obtenu en divisant la durée du temps de parcours le plus long observé sur le réseau de Lausanne divisé par la durée de la période de recalcul (ou d'agrégation). Toutefois, dans cette étude, la durée de cette période est variable. L'auteur a donc choisi arbitrairement de se limiter à trois périodes futures.

Sur la base des enseignements du § 11.3.1 et des spécificités de l'étude, il semble raisonnable d'écartier les méthodes séries chronologiques du type ARIMA (Auto Regression Integrated Moving Average) ou SARIMA (Seasonal ARIMA). En effet, outre les limitations théoriques, ce genre de modèles risque de ne pas se comporter de manière satisfaisante face à des séries non « naturelles » telles que celles calculées par le processus d'estimation par FCD. Ensuite, elles ne sont pas prévues pour fournir plus d'une valeur dans le futur. Enfin, elles ne permettent pas d'introduire de paramètres décrivant la spécificité des arcs (longueur, type, etc.). Cela implique que de tels modèles devraient être calibrés pour chaque arc du réseau (ou du moins pour chaque type) ce qui représente une somme de travail importante.

Les méthodes de reconnaissance de profils (pattern recognition) semblent mettre trop de poids sur la connaissance des profils historiques. Mais ce qui empêche l'application de cette méthode dans le cas présent est avant tout une limitation technique. En effet, pour obtenir de bons résultats, cette méthode doit disposer d'une base de données contenant de nombreux profils de temps de parcours. Cela impliquerait de devoir réaliser plusieurs centaines de runs de simulation ce qui, vu la taille du modèle utilisé, prendrait beaucoup trop de temps.

Encourager par les nombreux travaux comparatifs et applications pratiques proposés dans la littérature, l'auteur a finalement porté son choix sur les réseaux de neurones. Il présente en effet deux avantages majeurs. D'abord, il permet la prédiction de temps de parcours pour plusieurs périodes de temps dans le futur. Ensuite, sa capacité d'intégrer des inputs de types totalement différents (des temps, des longueurs, des heures, des catégories, des booléens, etc.) offre la possibilité d'intégrer dans un seul et même modèle les paramètres décrivant la spécificité de chaque arc. Ainsi, un seul modèle peut être utilisé pour tout le réseau. Une des limitations de la méthode des réseaux de neurones reste son processus d'apprentissage nécessitant de nombreuses séries d'inputs. Dans cette étude, plusieurs millions de séries sont disponibles ce qui s'avère largement suffisant.

#### 11.3.4 Brève introduction sur les réseaux de neurones

Ce paragraphe se propose de présenter une brève introduction à la méthode des réseaux de neurones. Elle se base sur une série d'ouvrages ([94], [95], [96] et [97]) auxquels le lecteur pourra se référer s'il désire de plus amples informations.

La méthode des réseaux de neurones est un outil d'approximation non linéaire par apprentissage inspiré de l'analogie avec les systèmes nerveux vivants. Il se compose d'un vecteur d'entrées (les inputs), d'une ou plusieurs couches de neurones et d'un vecteur de sorties (les outputs). Chaque neurone est une fonction algébrique non linéaire, paramétrée et à valeurs bornées. Cette fonction, appelée fonction d'activation, s'applique à une combinaison des entrées du neurone  $\{x_i\}$  pondérées par les paramètres  $\{w_i\}$ . Cette combinaison, appelée potentiel, s'écrit le plus fréquemment sous cette forme :

$$v = w_0 + \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i \quad \text{Equ. 38}$$

où  $w_0$  est un terme constant ou biais.

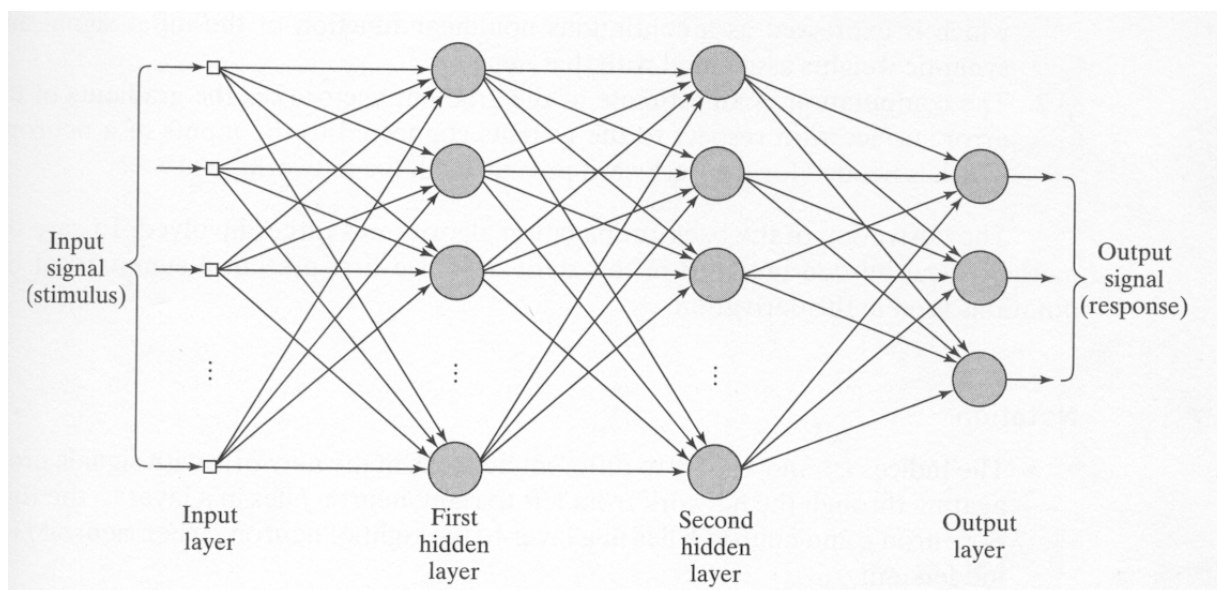
La fonction d'activation, quant à elle, est généralement de type « sigmoïde » (c'est-à-dire une fonction en forme de « s ») symétrique par rapport à l'origine, telle que la tangente hyperbolique ou la fonction arctangente. Ainsi, la sortie d'un neurone est habituellement :

$$y = \text{th} \left[ w_0 + \sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i \right] \quad \text{Equ. 39}$$

Il existe de multiples autres possibilités qui ne seront cependant pas décrites ici.

Par conséquent, on peut dire qu'un réseau de neurones réalise une (ou plusieurs) fonctions algébriques de ses entrées, par composition des fonctions réalisées par chacun de ces neurones.

L'architecture de réseaux la plus courante (et généralement utilisée dans le domaine du trafic) est le Multi Layer Perceptron (MLP). La Figure 66 présente sa forme générique. Un tel réseau peut être composé d'un ou de plusieurs couches de neurones (appelées couches cachées) entre le vecteur d'inputs et la couche de neurones de sortie. Ces derniers utilisent généralement une fonction d'activation linéaire du type  $f(x)=x$  pour éviter que la valeur des inputs soit bornée entre -1 et 1.



**Figure 66 : Architecture générique d'un réseau de neurones de type MLP (Multi Layer Perceptron)**

Dans le cas particulier d'un réseau à une couche cachée de  $N$  neurones, à  $n$  inputs et à un seul output (donc un neurone de sortie), la sortie du réseau aura donc pour expression :

$$g(x, w) = \sum_{i=1}^N \left[ w_{N,i} \cdot \text{th} \left( w_{j,0} + \sum_{j=1}^n w_{i,j} \cdot x_j \right) \right] + w_{N,0} \quad \text{Equ. 40}$$

L'apprentissage (supervisé) d'un réseau de neurones consiste à changer, suivant un processus itératif, la valeur des poids  $w$  du réseau de manière à minimiser la mesure de performance (ou fonction de coût<sup>24</sup>). A chaque itération, une série de vecteurs d'inputs est présentée au réseau ainsi que la ou les valeurs ciblées correspondantes, les valeurs que l'on souhaiterait obtenir. Une comparaison est alors faite entre les sorties du réseau et les valeurs cibles. La mesure la plus fréquemment utilisée est la MSE (Mean Square Error).

A chaque itération, les poids  $w$  du réseau sont modifiés grâce à la minimisation de la fonction de coût par la méthode du gradient simple. Les gradients sont calculés en partant du (des) neurone(s) de sortie puis en remontant vers la première couche de neurones cachés. C'est pourquoi on parle d'apprentissage par rétro-propagation (Back propagation) basé sur la méthode du gradient. Les équations permettant le calcul de ces gradients ne sont pas développées ici mais sont disponibles dans les ouvrages cités précédemment.

L'apprentissage est considéré comme terminé lorsqu'une série de conditions décrivant la stabilisation de la fonction de coût vers une valeur minimale est atteinte.

### 11.3.5 Apprentissage et validation des réseaux de neurones

Dans le cadre particulier de cette étude, quatre réseaux de neurones différents sont élaborés, entraînés et validés. Deux d'entre eux ne comportent qu'une seule sortie (prédiction de la période  $\tau+1$ ) alors que les deux autres proposent trois sorties ( $\tau+1$ ,  $\tau+2$  et  $\tau+3$ ). Les premiers ont été expressément développés pour être utilisés dans le cadre de l'estimation des temps de parcours. La différence entre les réseaux offrant le même nombre d'outputs est l'utilisation ou non de valeurs provenant du profil historique.

L'architecture des réseaux (nombre de couches cachées et nombre de neurones par couches) aurait du faire l'objet d'une analyse paramétrique pour déterminer la combinaison offrant les meilleures performances. Toutefois, suite à la lecture de nombreux travaux d'application de réseau de neurones (voir § 11.3.1), l'auteur a constaté une certaine répétitivité dans les recommandations formulées par leurs auteurs et les a donc appliquées. Ainsi, l'expérience montre que l'utilisation de plus d'une couche de neurones cachés amène que peu d'amélioration comparée à l'augmentation de la complexité du problème et surtout du temps de calcul. Quant aux nombres de neurones à utiliser pour la couche cachée, l'idéal serait qu'il soit identique au nombre des inputs.

---

<sup>24</sup> A ne pas confondre avec celle des arcs du réseau routier (affectation de trafic)

	Inputs	Couche ca- chées	Neurones par couche	Outputs	Historique
NN-1	10	1	10	1	Non
NNH-1	13	1	13	1	Oui
NN-3	10	1	10	3	Non
NNH-3	13	1	13	3	Oui

**Tableau 15 : Caractéristiques des réseaux de neurones utilisés**

Comme indiqué précédemment, les principaux paramètres d'entrées de ce processus de prédiction de temps de parcours d'arc sont les mesures présentes et passées de ce temps de parcours. Une fois encore la littérature montre que la prise en compte de deux à trois mesures passées en complément à celle de la période en question semble être le meilleur choix. Une brève analyse comparative a rapidement montré qu'une combinaison de trois valeurs ( $ELT_{\tau}$ ,  $ELT_{\tau-1}$  et  $ELT_{\tau-2}$ ) présentait les meilleures performances. En effet, le passage à quatre n'apporte pas d'amélioration substantielle tout en ralentissant le processus de calcul. A l'inverse, deux seules valeurs offrent des résultats nettement moins bons. Pour les réseaux prenant en compte le profil historique, les valeurs  $EHLT_{\tau}$ ,  $EHLT_{\tau-1}$  et  $EHLT_{\tau-2}$  sont rajoutées au vecteur des inputs.

Ce dernier est également constitué d'une série de paramètres décrivant les spécificités des arcs auxquels s'appliquera le modèle. Il s'agit de :

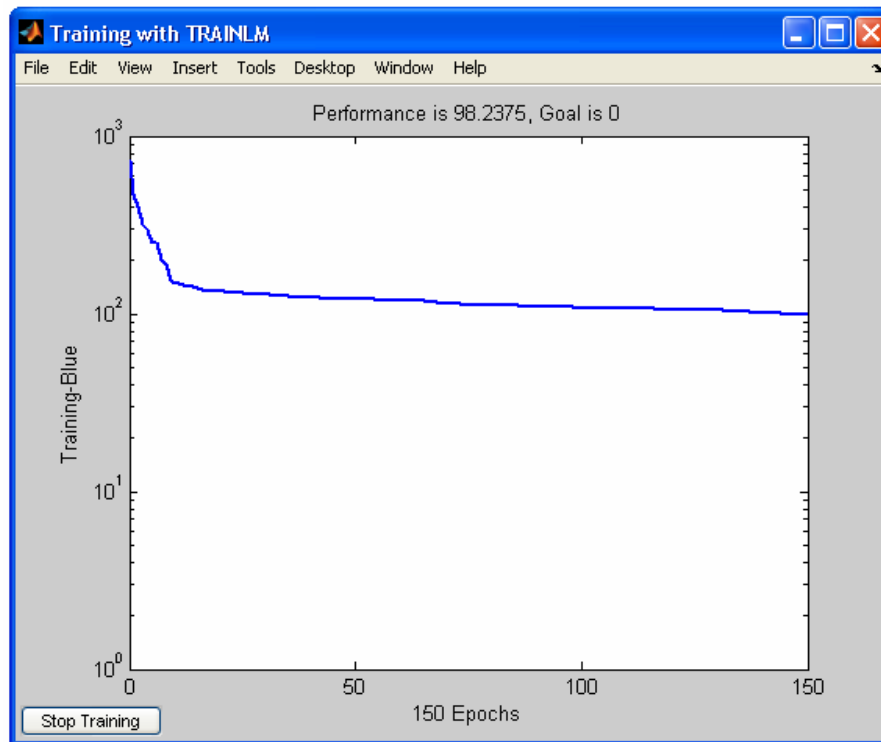
- longueur de l'arc
- type de route (autoroute, avenue, rue,...)
- type d'intersection (feux, stop, céder le passage, prioritaire)

Etant donné que l'évolution des temps de parcours d'un arc est fortement dépendante de l'heure de la journée, il est important de fournir au réseau de neurones cette information. Ainsi, l'index de la période de temps considérée fait également partie des inputs. Ensuite, comme la présente étude réalise une analyse paramétrique dont la définition d'arcs et la période d'agrégation sont des variables, ces deux valeurs doivent également faire partie des entrées du système. L'apprentissage différencié des réseaux de neurones pour chaque pair AP/définition d'arcs aurait évidemment fourni des performances plus pointues, mais ne respecterait pas l'idée de disposer d'une méthode générique adaptée à tous les cas. Finalement, le taux d'équipement joue un rôle évidemment clé dans ce processus car il offre une certaine information sur la fiabilité des valeurs d'estimation utilisées. Son intégration au vecteur des inputs est particulièrement bénéfique lorsque les valeurs du jour sont complétées par celles du profil historique. En résumé, et comme l'indique le Tableau 15, la taille du vecteur d'inputs est de 13 dans le cas avec profil historique et de 10 sans profil.

Le processus de sélection des lots d'observations (une observation comprenant le vecteur d'inputs et le ou les valeur(s) cible correspondant(s)) a été décomposée en deux étapes. Dans un premier temps, un container unique d'observations a été créé au cours du travail

d'analyse paramétrique d'estimation de temps de parcours. En effet, une routine supplémentaire du module de traitement et statistique, ajoute une nouvelle observation dans le container à chaque fois qu'une combinaison de valeurs  $ELT_{f,t}$ ,  $ELT_{f,t-1}$  et  $ELT_{f,t-2}$ , ( $EHLT_t$ ,  $EHLT_{t-1}$  et  $EHLT_{t-2}$ ),  $ALT_{t+1}$ , ( $ALT_{t+2}$  et  $ALT_{t+3}$ ), toutes non nulles, est disponible. Il est important de signaler que seules les valeurs d' $ELT_f$  sont utilisées, soit avant toute opération de substitution. L'analyse paramétrique passant en revue toutes les combinaisons possibles d'AP / ER / définition d'arcs (soit  $4 \times 8 \times 11 = 352$  combinaisons), le container contient finalement plus d'un million d'observations. L'utilisation de toutes ces observations pour les processus d'apprentissage et de validation s'avère techniquement difficile vu le temps de calcul considérable que cela entraînerait. Dans un second temps donc, 16 lots (4 par réseau) de 15'000 valeurs sont extraits du container principal. Etant donné que le nombre d'observations stockées est d'autant plus grand que la période d'agrégation est petite et que le taux d'équipement est grand, un tirage au sort pondéré a été réalisé afin d'obtenir des lots dans lesquels les 352 combinaisons sont représentées de manière équitable. Sans cette opération les réseaux de neurones n'auraient pas fourni de performances homogènes.

L'apprentissage et la validation de ces quatre réseaux ont été réalisés à l'aide du logiciel commercial MATLAB. Suite à une lecture attentive de la documentation fournie avec le module « Neural Networks » du logiciel, l'auteur a évalué différentes alternatives aux méthodes traditionnelles du gradient proposées pour l'optimisation de la fonction de coût (MSE). Parmi elles, la méthode de type quasi-newtonienne dénommée Levenberg-Marquardt s'est avérée fournir une convergence beaucoup plus rapide et systématique. Pour de plus amples informations concernant cette méthode, le lecteur se référera à cette documentation. Une opération de prétraitement des valeurs d'input a également été appliquée permettant une substantielle baisse des valeurs de la fonction de coût. Cette opération consiste à appliquer un facteur d'échelle spécifique à chaque paramètre afin que la gamme des valeurs soit toujours comprise entre -1 et 1. Une telle approche évite que des paramètres dont les valeurs sont beaucoup plus grandes que les autres ne viennent biaiser le modèle.



**Figure 67 : Processus d'apprentissage du réseau de neurones à l'aide du logiciel MATLAB**

La Figure 67 présente un exemple de convergence de la fonction de coûts. En général, le processus itératif s'arrête après 150 à 200 itérations, évitant ainsi le phénomène de « surapprentissage ». Ce dernier se caractérise par un modèle offrant de très bonnes performances pour un lot particulier mais s'avérant nettement moins bon lorsque d'autres lots lui sont proposés. Cette dernière opération s'appelle la validation. Elle consiste à calculer la valeur de la fonction de coût en présentant d'autres lots d'observation en entrée du réseau, une fois les poids du réseau déterminés par le processus d'apprentissage. S'il paraît normal que cette valeur soit plus grande que celle correspondante au lot d'apprentissage, elle doit cependant en rester proche pour que le modèle soit jugé comme bon. Dans cette étude, l'apprentissage des réseaux est toujours accompagné d'une validation par l'intermédiaire de trois autres lots d'observations.

	Apprentissage		Validation 1	Validation 2	Validation 3
	MSE	R <sup>2</sup>	MSE	MSE	MSE
<b>NN-1</b>	62	0.85	72	69	74
<b>NNH-1</b>	47	0.89	53	55	56
<b>NN-3</b>	83	0.82 / 0.82 / 0.80	97	91	93
<b>NNH-3</b>	72	0.85 / 0.85 / 0.82	81	77	80

**Tableau 16 : Valeurs de la fonction de coût (MSE) de chaque réseau de neurones pour le lot d'apprentissage et ceux de validation**

Les valeurs de MSE ainsi obtenues pour les quatre réseaux sont regroupées au Tableau 16. Pour la phase d'apprentissage, le coefficient de détermination  $R^2$  a également été calculé pour mieux juger du niveau de corrélation entre les sorties des réseaux et les valeurs ciblées. Ces résultats permettent tout d'abord de confirmer l'apport positif des valeurs du profil historique dans le vecteur d'inputs, que ce soit pour la prédiction d'une ou de trois périodes futures. Ils montrent également que le niveau de détermination de la première période future est sensiblement meilleur (0.85 contre 0.82 et 0.89 contre 0.85) lorsque les réseaux (NN-1 et NNH-1) se fixent comme seul objectif l'approximation de cette valeur. Dans les cas où trois valeurs sont prédites, on constate que les deux premières le sont avec un coefficient de détermination identique, seule la troisième présentant des performances inférieures.

Une étude de sensibilité aurait été souhaitable pour analyser plus en détails l'influence de chacun des paramètres d'inputs pour, le cas échéant, supprimer ceux n'en ayant qu'une influence limitée. Un essai d'apprentissage en n'utilisant que les valeurs de séries chronologiques (ELT et EHLT) a été réalisé pour les réseaux NN-1 et NNH-1. Les valeurs de MSE ainsi obtenue (respectivement 98 et 73) ont cependant permis de mettre en évidence l'apport de l'utilisation des autres paramètres sans toutefois arriver à les différencier entre eux.

Concernant la phase de validation, les résultats des trois lots utilisés présentent une bonne homogénéité démontrant par là même que ces réseaux sont applicables de manière globale. Les différences raisonnables entre les MSE des lots de validation et celles des lots d'apprentissage garantissent qu'aucun surapprentissage n'a eu lieu et que les réseaux n'ont pas un comportement trop spécifique au lot d'apprentissage.

Si les performances des réseaux de neurones (en observant les valeurs de  $R^2$ ) peuvent sembler modestes, il est important de rappeler ici qu'il s'agit des méthodes totalement génériques s'adaptant à toute combinaison d'AP, ER et définition d'arcs. Si une telle méthode venait à être utilisée pour une application pratique il serait évidemment recommandé de développer un réseau par combinaison afin d'en améliorer les performances.

Avant de clore ce paragraphe, l'auteur aimerait également souligner que les observations utilisées pour l'apprentissage et la validation de ces réseaux ont été sélectionnées de manière à ce qu'elles ne présentent que des valeurs d' $ELT_f$  non nulles. Cela veut dire qu'aucun ELT obtenu suite à l'application d'une méthode de substitution n'est utilisé ce qui aurait pourtant amélioré la pertinence des modèles. Il faut rappeler que les méthodes de substitution les plus intéressantes se basent justement sur les valeurs de prédiction. Pour faire face à cette situation, l'approche la plus rigoureuse aurait été de travailler à l'aide d'un réseau de neurones bouclé pour lequel les outputs seraient partiellement repris comme input. L'incorporation d'un facteur temps (delays) aurait alors été nécessaire pour réaliser l'apprentissage d'un tel réseau. Une telle approche pourrait faire l'objet d'un approfondissement dans le cadre d'un travail de recherche complémentaire.

### 11.3.6 Synthèse et choix

Ce chapitre a premièrement mis en évidence que derrière la notion habituellement utilisée de temps de parcours moyen un phénomène plus complexe est en réalité à traiter et que seule une vision totalement désagrégée permet de cerner. Ainsi ont été mises en évidence les particularités des temps de parcours d'arcs de réseau urbains dont la population des mesures individuelles présente généralement une variabilité plus importante due à une certaine discontinuité des flux.

Deuxièmement, l'estimation des temps de parcours d'arc par la technique des véhicules flottants a ensuite été présentée. Dans un premier temps, une approche déterministe a été suivie en utilisant comme seule valeur la moyenne. Une analyse détaillée de certains paramètres (période d'agrégation, définition d'arc, taux d'équipement, méthodes de substitution, etc.) de cette technique FCD a permis de montrer leur influence sur les performances d'estimation. Cette dernière s'est avérée être étroitement liée à la variabilité de la population des mesures individuelles. Pour évaluer cette performance, différents indicateurs ont été présentés, l'AIPE (Average Individual Path Error) ayant été retenu comme le plus pertinent.

Ces paramètres n'influençant pas de manière indépendante les performances d'estimation, une étude multiparamétrique a été menée. Elle avait comme objectif principal de déterminer, pour chacune des valeurs de taux d'équipement traitées, quelle combinaison de paramètres permettait d'atteindre les meilleures performances. Si cette étude a montré qu'une combinaison différente devait être appliquée pour chaque cas, elle a également mis en évidence la faible différence qu'il pouvait y avoir en choisissant des valeurs de paramètre voisines à celles de la combinaison optimale. Elle a également mis en évidence que la moitié du potentiel de réduction d'erreur d'estimation, soit entre le cas sans véhicules équipés (purement statique) et celui où tous le sont, est atteint avec seulement un véhicule flottant pour mille. Un tel résultat a été obtenu pour le cas d'un jour ordinaire où la bonne estimation d'un profil historique joue un rôle clé. Il faut toutefois noter que les performances dans le cas d'un jour avec incident ne sont pas pour autant beaucoup moins bonnes.

Dans un deuxième temps, une approche probabiliste où le temps de parcours d'arc est représenté par une variable aléatoire a été présentée. Les difficultés à déterminer la forme et les paramètres de la distribution de probabilité par la technique des véhicules flottants ont été mis en évidence. Une solution se proposant de n'estimer que l'écart type de ces distributions a été alors présentée. Si certains parallèles entre l'estimation des moyennes et des écarts types ont pu être utilisés, certaines particularités propres aux écarts types rendent la tâche plus compliquée. Parmi elles le fait que la variance du temps de parcours d'un itinéraire n'est pas forcément celle de la somme des variances des arcs qui le composent.

Finalement, ce chapitre a abordé la problématique de la prédiction de temps de parcours. Si la disponibilité de telles valeurs s'avère utile pour l'estimation des temps de parcours (méthodes de substitution), elle se justifie également - dans l'architecture du SNA - par l'utilisation possible de ces valeurs dans un TDSPA (Time Dependent Shortest Path Algorithm). Parmi les nombreux outils que propose la littérature pour la prédiction de temps de parcours, celle des réseaux de neurones a été retenue. Entre les raisons justifiant ce choix, la possibili-

té d'utilisés aisément des valeurs autres que celles des séries chronologiques a été prédominante. Cet aspect des réseaux de neurones a permis de calibrer et de n'utiliser qu'un seul modèle pour traiter tous les scénarii. La disponibilité de grandes quantités de données pour son apprentissage a également facilité ce choix. La validation des différents réseaux proposés a montré une qualité de prédiction satisfaisante au regard de la généricité du modèle. Dans l'optique d'une application pratique, des apprentissages plus ciblés sont recommandés.