HAL
open science

Approche multimodale de la mobilité urbaine : développement d'un outil d'aide à la prise de décision

Mathias Glaus

To cite this version:

Mathias Glaus. Approche multimodale de la mobilité urbaine : développement d'un outil d'aide à la prise de décision. Sciences de l'environnement. Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Université de Montréal, 2007. Français. NNT : 2007EMSE0008 . tel-00777775

HAL Id: tel-00777775

https://theses.hal.science/tel-00777775

Submitted on 18 Jan 2013

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL

ET

L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE DES MINES DE ST-ETIENNE

APPROCHE MULTIMODALE DE LA MOBILITÉ URBAINE : DÉVELOPPEMENT D'UN OUTIL D'AIDE À LA PRISE DE DÉCISION

THÈSE

PRÉSENTÉE EN COTUTELLE

COMME EXIGENCE PARTIELLE

DU DOCTORAT EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

PAR

MATHIAS GLAUS

JUILLET 2007

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À MONTRÉAL
Service des bibliothèques

Avertissement

La diffusion de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire *Autorisation de reproduire et de diffuser un travail de recherche de cycles supérieurs* (SDU-522 – Rév.01-2006). Cette autorisation stipule que «conformément à l'article 11 du Règlement no 8 des études de cycles supérieurs, [l'auteur] concède à l'Université du Québec à Montréal une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de [son] travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, [l'auteur] autorise l'Université du Québec à Montréal à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de [son] travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de [la] part [de l'auteur] à [ses] droits moraux ni à [ses] droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, [l'auteur] conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont [il] possède un exemplaire.»

AVANT-PROPOS

« Une vie à se dire : ce n'est pas en perfectionnant

la chandelle qu'on a inventé l'électricité »

Jacques Salomé

Durant sept ans, j'ai eu le privilège de travailler avec Bernard Saugy, le père de *La Serpentine* et de bien d'autres concepts innovateurs en urbistique. J'ai été un témoin privilégié que le génie de l'inventeur et le génie de l'ingénieur peuvent ne faire qu'un. Décédé en 2006, ce visionnaire nous laisse sa conception d'un transport innovateur qu'il nous appartient de mettre en œuvre. À titre plus personnel, cette collaboration m'aura appris que les limites d'un projet sont celles que l'on veut bien se fixer.

Pour cette magnifique aventure au-delà des sentiers battus, je tiens à remercier tout particulièrement mes directeurs de recherche, les professeurs Robert Hausler et Jacques Bourgois de m'avoir amené, par leur ouverture d'esprit et leurs connaissances, à découvrir de nouveaux horizons. Mes remerciements vont également aux membres de la STEPPE de l'ÉTS et du Centre SITE de l'ENSM.SE. Un grand merci à toutes les personnes qui, de près ou de loin, m'ont soutenu dans ce travail.

Finalement, j'exprime toute ma gratitude à mon épouse Dominique qui, en plus de l'atmosphère familiale qu'elle a su développer malgré mes absences, a toujours trouvé les mots pour m'encourager lors des moments de moins grand enthousiasme. Sans cette complicité, l'aventure n'aurait pas eu la même saveur.

TABLE DES MATIÈRES

AVANT-PROPOS III

LISTE DES FIGURES VIII

LISTE DES TABLEAUX X

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SYMBOLES XI

RÉSUMÉ XII

ABSTRACT XIV

INTRODUCTION 1

CHAPITRE I

REVUE DE LITTÉRATURE 4

1.1 Contexte urbain et mobilité individuelle 5

1.1.1 La mutation des villes 5

1.1.2 La nouvelle réalité urbaine 9

1.2 Axes d'intervention 16

1.2.1 Automobiles et circulation routière 16

1.2.2 Transport en commun 18

1.3 Système de transport cybernétique (STC) 21

1.3.1 Origine et définition du concept 22

1.3.2 Caractéristiques et avantages du système 25

1.3.3 Exemples de STC 33

CHAPITRE II

ANALYSE NON-LINÉAIRE DE LA DEMANDE EN MOBILITÉ ADAPTÉE À UNE OFFRE DE TRANSPORT INDIVIDUALISÉ 39

Résumé 40
Introduction 41
I. Analyse non-linéaire des séries chronologiques 43
II. Dimension d'encastrement 47
III. Analyse de la présence de chaos 49
IV. Prévision de la demande en mobilité 51
V. Discussion 52
Conclusion 54
Références 55

CHAPITRE III

THÉORIE DE L'ENTROPIE POUR UNE NOUVELLE APPROCHE DE L'ÉTABLISSEMENT DES ITINÉRAIRES D'UN SYSTÈME DE TRANSPORT CYBERNÉTIQUE 57

Résumé 58
Introduction 59
I. Principe du maximum d'entropie 60
II. Entropie maximale et réseau routier 62
III. Entropie et système de transport cybernétique: étude de cas 65
IV. Discussion 73
Conclusion 74
Références 76

CHAPITRE IV

APPLICATION DES PRINCIPES THERMODYNAMIQUES À LA CONFIGURATION DES VÉHICULES DANS UN RÉSEAU STC 78

Résumé 79
Introduction 80
I. Principes théoriques 81

II. Transposition des principes thermodynamiques à un STC 85

III. Discussion 90

Conclusion 92

Références 93

CHAPITRE V

DISCUSSION GÉNÉRALE 94

5.1 Modèle du système de mobilité 95

5.1.1 Acquisition des données 95

5.1.2 Dynamique du système 96

5.1.3 Principes opératoires 99

5.2 STC et multi-modalité 104

5.2.1 Dispositif par périmètre 105

5.2.2 Approche par complémentarité des modes de transport 108

5.2.3 Limites 114

5.2.4 Perspectives 115

CONCLUSION 119

BIBLIOGRAPHIE 122

ANNEXE A - NON-LINEAR ANALYSIS OF MOBILITY DEMAND ADAPTED TO AN INDIVIDUALISED TRANSPORTATION SYSTEM 133

ANNEXE B - ENTROPY THEORY FOR A NEW APPROACH TO ROUTE ASSIGNMENT FOR CYBER TRANSPORTATION SYSTEMS 150

ANNEXE C - APPLICATION OF THE PRINCIPLES OF THERMODYNAMICS TO VEHICLE CONFIGURATION IN A CTS NETWORK 171

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 Les trois modèles de villes qui se sont succédé et coexistent depuis la révolution industrielle 7

Figure 1.2 Évolution de l'occupation du territoire à Montréal 7

Figure 1.3 Évolution de la croissance démographique et du nombre d'immatriculations de véhicules à moteur au Québec 8

Figure 1.4 Expression de la dépendance automobile pour 30 villes à travers le monde 10

Figure 1.5 Taux d'utilisation de la voiture associés aux déplacements quotidiens pour les différents secteurs de la grande région de Montréal en 2003 11

Figure 1.6 Dynamique des facteurs positifs et négatifs de l'usage privilégié de la voiture en milieu urbain [adapté de Handy, 1993] 13

Figure 1.7 Variation du nombre estimatif de conducteurs sur les routes au Canada selon l'heure de la journée en 1992, 1998 et 2005 [tiré de Turcotte, 2005] 15

Figure 1.8 Distribution modale en fonction du niveau d'accessibilité au métro à Montréal en 1993 [tiré de Bergeron, 1999] 20

Figure 1.9 Concept d'irrigation des embranchements avec les véhicules de petite capacité d'un STC [adapté de Latour, 1992] 23

Figure 1.10 Concept de dissociation des fonctions « transport » et « accès » [adapté de Latour, 1992] 24

Figure 1.11 Schéma du système composé de ses éléments physiques et leurs liens de communication 26

Figure 1.12 Temps de trajet comparés entre autobus, train léger et STC en fonction de la distance entre les arrêts pour une distance parcourue de 8 kilomètres [tiré de Lowson, 2003b] 30

Figure 1.13 STC avec voies de guidage physique 34

Figure 1.14 STC avec guidage sans contact sur un réseau de voies dédiées 34

Figure 1.15 STC avec guidage sans contact et sans infrastructure apparente 35

Figure 5.1 Schéma conceptuel de la dynamique usagers-STC 97

Figure 5.2 Schéma de principe du modèle associé à la dynamique du système de mobilité en STC 98

Figure 5.3 Schéma de principe du modèle opératoire d'attribution d'un véhicule à une demande individuelle en déplacement. 100

Figure 5.4 Expression de la variable T en fonction du degré de congestion 103

Figure 5.5 Schéma de principe de l'intégration d'un STC dans un périmètre à forte activité. 106

Figure 5.6 Schéma de déplacements « STC-transport linéaire-STC » 108

Figure 5.7 Durées de parcours comparées entre le métro, la voiture et une combinaison des modes STC-Serpentine+métro en fonction de la distance entre les stations de métro [Adapté de Lowson, 2003b] 109

Figure 5.8 Schéma des déplacements associés à une offre diversifiée en mobilité 111

Figure 5.9 Durées de parcours en fonction de la longueur du trajet pour différents scénarios de mobilité [Adapté de Lowson, 2003b] 112

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 Superficie, population et densité des classes associées aux taux d'utilisation de la voiture pour la grande région de Montréal 12

Tableau 1.2 Principaux avantages associés à l'opération d'un STC [tiré de ATRA, 2003] 27

Tableau 1.3 Capacités théoriques comparées du STC-*Serpentine* avec les modes de transport conventionnel 29

Tableau 1.4 Coût moyen par passager-trajet en Euro pour différents modes de transport à 25 000 déplacements journalier [adapté de Tegnér, 2005] 32

Tableau 1.5 Liste de différentes technologies STC, leur origine et leur principales caractéristiques 33

LISTE DES ABRÉVIATIONS ET DES SYMBOLES

AMT	Agence Métropolitaine des Transports (Montréal)
CO_2	Dioxide de carbone; principal gaz à effet de serre
GJ	Gigajoule; soit 10^6 Joules
GJ/personne	Gigajoule par personne; utilisé comme unité de consommation moyenne d'énergie (carburant par exemple) par individu
hab/km^2	habitants par kilomètre carré
pers/h	personne par heure, unité de débit
pers/km	personne par kilomètre; unité de charge sur la voie de transport
pers/véh	personne par véhicule
PRB	Produit Régional Brut; correspondant au PIB (Produit Intérieur Brut) retenu pour une région métropolitaine
PRT	*Personal Rapid Transit*
PZEV	*Partial zero emission vehicle* Véhicule à émissions réduites (par exemple, véhicule hybride)
SAAQ	Société de l'Assurance Automobile du Québec
STC	Système de Transport Cybernétique *Cyber Transportation System (CTS)*
STM	Société de Transport de Montréal
véh-h	véhicules-heures
véh-km	véhicules-kilomètres
ZEV	*Zero emission vehicle* Véhicule à zéro émission (par exemple, véhicule électrique)

RÉSUMÉ

La voiture individuelle a permis d'agir directement sur les contraintes associées aux temps de déplacements en facilitant la mobilité individuelle et a engendré une évolution des villes qui se caractérise par des processus qui s'autoalimentent : une dispersion urbaine, une spécialisation fonctionnelle des zones et une croissance du trafic automobile. Le transport de masse conventionnel (métro, tramway, train léger), comme seule alternative à la dépendance automobile, s'adapte difficilement à cette nouvelle réalité pour répondre à une mobilité qui s'exprime variablement dans le temps et dans l'espace. Dans ce contexte, les Systèmes de Transport Cybernétiques (STC) se présentent comme une alternative technologique propice à répondre à cette mobilité collective individualisée en offrant, en tout temps, un service sur demande par le partage de véhicules automatisés fonctionnant en réseau.

Si la voiture est synonyme de liberté individuelle, en revanche son utilisation privilégiée mène à un déséquilibre du système de mobilité qui se traduit par les phénomènes d'engorgements du réseau routier. À l'inverse, le transport de masse est stable à l'extrême en assujettissant les usagers à son mode opératoire rigide (corridors et cadences des véhicules préétablis). En rupture avec ces deux modes de fonctionnement, la dynamique du système de mobilité par STC repose sur la capacité à anticiper le besoin ainsi que sur la configuration des véhicules dans le réseau pour desservir adéquatement la demande individuelle formulée aux différents lieux du périmètre urbain desservi.

Les résultats de la recherche ont montré que le besoin individuel en déplacements peut être appréhendé comme un phénomène chaotique. La reconstruction de l'espace d'encastrement à sept dimensions associées à la série chronologique du besoin en déplacements pour un édifice au centre-ville de Montréal permet de reconstruire le profil du besoin par pas de temps de deux minutes, à partir des événements préalablement enregistrés. Basée sur la capacité des véhicules d'un STC d'emprunter l'ensemble des voies de guidages et l'identification des stations de départ et d'arrivée de chaque demande préalablement aux déplacements,

l'application du principe du maximum d'entropie permet d'identifier les itinéraires individuels des véhicules. L'application du principe, développé à partir des relations de l'entropie statistique et de la théorie de l'information, permet de diffuser les véhicules dans le réseau sous contrainte du respect des demandes des usagers et ainsi de minimiser le phénomène d'engorgement. Dans une approche dynamique de l'évolution du système, la configuration des véhicules dans un réseau STC se modifie en fonction des demandes et doit s'organiser pour répondre aux besoins à venir. Par analogie avec les systèmes naturels, l'application des principes thermodynamiques de l'enthalpie et de l'entropie permettent d'expliciter la relation entre le besoin en déplacement et l'état du système. Par raisonnement déductif, les résultats explicitent le principe d'une configuration des véhicules dans le réseau basée sur des critères caractérisant l'état du système dans sa globalité plutôt que sur des critères de proximité et de distances à parcourir.

Les résultats obtenus sur la base de l'application des lois comportementales des systèmes naturels (phénomènes chaotiques et principes thermodynamiques) sont intégrables dans un modèle. Ce dernier, en tant qu'outil de représentation, permet de mettre en évidence les fonctionnalités dynamiques qui d'une part animent le système et, d'autre part en assurent la cohérence pour satisfaire les besoins individuels dans le temps et dans l'espace. Cette capacité de s'adapter aux caractéristiques du milieu dans lequel un STC est implanté, permet de générer une synergie avec les transports conventionnels pour une diversification de l'offre en transport collectif apte à s'adapter aux multiples dimensions de la demande individualisée en mobilité. Finalement, la démarche développée initie un changement de paradigme dans le domaine du transport collectif en privilégiant la variété des moyens (multiples modes et multiples itinéraires) pour rejoindre les différents lieux plutôt que la singularité d'un transport de masse. Ce changement de paradigme trouve également un écho en urbanisme où une organisation multifonctionnelle des zones urbaines favorise une accessibilité de proximité diversifiée.

ABSTRACT

The automobile has without a doubt facilitated personal mobility, and as such has allowed people to act directly upon the constraints associated with travel duration. This has brought about an evolution of cities that can be characterised by self sustaining processes, such as urban sprawl, increasing specialisation of urban zones, and an increase in traffic. Conventional mass transit (subway, tramway, light rail), being the only alternative to the automobile, is difficult to adapt to the above reality, that is to respond to a mobility demand that varies in time and space. In this context, a CTS is presented as an alternative technological solution, able to respond to the new reality of individualised mobility requirements by offering a continuous on demand service of shared, automated vehicles, running on a common network of pathways.

If the automobile is synonymous with individual freedom, then in contrast its preferred use leads to a destabilisation of the mobility system, which in turn leads to the phenomenon of traffic congestion. Oppositely, mass transit systems operate in an extremely stable fashion by subjecting passengers to its inflexible mode of operation (fixed routes and schedules). The CTS mobility system dynamic is very different to the previous two modes of operation, in that it is based on its ability to anticipate requirements, as well as on the vehicle configuration in the network to adequately respond to individual requests made from various stations within the urban perimeter covered.

The results of this work have shown that individual travel needs can be considered as a chaotic phenomenon. Reconstruction of the 7 dimensional embedding space associated with the time series of travel needs for a building located in the city centre of Montreal enables the reconstruction of the requirement profile over 2 minute intervals of time, from events that were previously recorded. Based on the capacity of the vehicles in a CTS to make use of all the available pathways, and knowing the identity of the departure and arrival stations prior to travel, the maximum entropy principle can be applied in order to identify the individual vehicle routes over the network. The application of this principle, developed from

equations of statistical entropy and information theory, allows the distribution of vehicles over the network under the constraint of respecting passengers' requests, and so minimising the phenomenon of congestion. By taking a dynamic approach to the evolution of the system, vehicle configuration over a CTS modifies itself in response to requests and must be able to reorganise in order to satisfy future requirements. By analogy with natural systems, the application of the principles of thermodynamics (enthalpy and entropy) allows the formulation of a relationship between the need to travel and the system state. The results of this work elucidate the principle of a vehicle configuration over the network based on criteria that characterise the global system state rather than on criteria of proximity and travel distance.

The results obtained through the application of the behavioural laws of natural systems (such as chaotic phenomena and thermodynamics) can be integrated into a model. This model, used as a tool for demonstration, enables the portrayal of the dynamic functionality, which on one hand animates the system, and on the other hand assures coherence in order to satisfy individual needs over time and space. The ability of a CTS to adapt itself to the characteristics of the environment in which it is placed allows the generation of a synergy with conventional transport systems, and results in the diversification of mass transport services able to adapt to the multiple dimensions of individual mobility requirements. Finally, the procedure developed in this work marks a paradigm shift in the field of mass transit by giving preference to a variety of means (multiple modes and routes) in order to reach a destination, rather than the singular means that is mass transport. This paradigm shift also has appeal in the field of urban planning, where a multifunctional arrangement of urban zones favours local diversified accessibility.

INTRODUCTION

Depuis un siècle, la voiture individuelle a modifié le mode de vie des individus en leur permettant d'aller plus vite et plus loin dans le confort d'un habitacle personnalisable. L'automobile offre surtout un moyen adapté qui facilite la mobilité individuelle permettant ainsi l'accès aux points de services essentiels aux activités humaines : travail, centres commerciaux, hôpitaux, etc. Ainsi, depuis son avènement, l'automobile a permis de désenclaver les régions, faciliter les échanges commerciaux et, dans ce sens, elle se présente comme un rouage important, voir essentiel, du développement de l'économie de nos sociétés. Cependant, l'automobilisation[1] a un optimum et l'accroissement constant du nombre de déplacements en voiture engendre des effets néfastes sur l'environnement et la santé des citoyens. De surcroît, les engorgements systématiques aux heures de pointe nuisent au développement économique de la société.

Le développement du tissu urbain axé sur l'automobile repousse de plus en plus les limites de la ville et *de facto* abaisse la densité de population. Le mode traditionnel du transport en commun s'adapte difficilement à cette nouvelle réalité. En effet, comment rejoindre le citadin quand ses lieux d'activités s'éloignent des corridors du transport collectif et que ses habitudes de déplacement sont multiformes? La démarche pour réduire la dépendance à l'automobile dans les déplacements

---

[1] *automobilisation* : terme qui se réfère aux activités dépendantes de l'automobile (Dupuy, 1999).

urbains peut viser à contraindre et à réduire le déplacement des personnes à la simple expression d'un transport sans flexibilité sur les parcours et les horaires figés des transports de masse tels que le métro, le tramway ou encore le train léger. Elle peut également vouloir, pour mieux satisfaire l'usager, s'adapter à cette complexité de la mobilité individuelle. Les Systèmes de Transport Cybernétiques (STC) sont une réponse technologique à cette mobilité collective personnalisée en offrant un service sur demande disponible en tout temps pour répondre à un besoin individuel en déplacements.

La démarche des travaux de recherche présentés est basée sur cette flexibilité opératoire des systèmes de transport cybernétiques et leurs propriétés fonctionnelles à servir collectivement la mobilité individuelle. Cependant, la configuration des véhicules dans le réseau doit évoluer afin d'assurer une concordance de l'offre avec la demande en mobilité. Dans ce contexte, l'enjeu repose sur la compréhension de la dynamique du besoin individuel et sur la capacité du système de transport à s'y adapter. Bien que la mobilité soit une activité purement anthropique, elle peut être appréhendée par les lois comportementales des systèmes naturels afin d'assurer une stabilité dynamique du système de transport propice à répondre aux besoins individuels en déplacements, en considérant que :

- le besoin individuel en déplacements, tout comme les phénomènes climatiques, est un processus chaotique;
- les principes thermodynamiques permettent d'assurer une évolution de la configuration du système de mobilité qui optimise la distribution des véhicules dans le réseau afin de minimiser les risques d'engorgement.

La première partie du document traite du contexte général dans lequel s'inscrit la recherche. Plus spécifiquement, le premier chapitre aborde l'évolution de la mobilité en milieu urbain et traite des solutions envisageables pour minimiser les enjeux associés à la dépendance à l'automobile. Les chapitres II, III et IV présentent, sous la forme d'articles, les travaux de recherche axés sur la compréhension du système de mobilité par les lois comportementales des systèmes naturels. En particulier, le deuxième chapitre traite de l'analyse du besoin individuel en déplacements pour un centre d'activités sous l'aspect des phénomènes chaotiques et met en évidence le caractère déterministe et prévisible de la demande en mobilité. Le troisième chapitre traite de l'assignation de la route à suivre pour les véhicules par le principe du maximum d'entropie afin de minimiser les risques d'engorgement du réseau. Le quatrième chapitre présente l'applicabilité des principes thermodynamiques à l'analyse de l'évolution des configurations des véhicules dans le réseau par analogie avec les systèmes naturels et leur aptitude à s'adapter aux changements, en évoluant ou en se transformant pour atteindre un nouvel état d'équilibre. Finalement, le chapitre V aborde, sous la forme d'une discussion générale, la portée de l'intégration des travaux réalisés sur la dynamique du comportement d'un système de mobilité dédié à répondre aux besoins individuels en déplacements. Par ailleurs, ce dernier chapitre présente l'intérêt d'une démarche multimodale de l'offre en mobilité et d'une mixité des fonctionnalités du milieu urbain.

CHAPITRE I

REVUE DE LITTÉRATURE

Les enjeux associés à la mobilité des personnes en milieu urbain sont récurrents dans la grande majorité des métropoles. Afin de comprendre le contexte dans lequel doivent s'inscrire les solutions, la revue de la littérature aborde d'une part, l'évolution du milieu dans lequel cette mobilité s'exprime et d'autre part, les axes potentiels d'intervention pour répondre à la problématique du transport.

La première partie de ce chapitre aborde le portrait de la mobilité urbaine à travers l'évolution de la structure des villes. La deuxième partie présente les principaux axes d'intervention retenus par les différents intervenants dans le domaine ainsi que les instances gouvernementales afin de pallier aux problématiques du transport. La troisième et dernière partie du chapitre présente les Systèmes de Transport Cybernétique (STC) à travers leurs caractéristiques intrinsèques ainsi que l'état de la situation quant à leur intégration en tant que solutions à la mobilité des personnes.

1.1 Contexte urbain et mobilité individuelle

Il existe une étroite relation entre aménagement du territoire et transport, en particulier en milieu urbain, où la mobilité apparaît comme le moteur du développement et le responsable de la forme des villes. Zahavi (1976) a montré que quelle que soit l'agglomération (des villages africains aux mégapoles états-uniennes), le citadin consacre, quotidiennement, en moyenne environ une heure à la mobilité. Ainsi, la ville dont la fonction repose sur les relations entre les individus, offre une proximité temporelle plus que géographique. Le corollaire est que l'augmentation des vitesses de déplacement favorise l'expansion des limites de la ville. Dès lors, la relation de la vitesse avec les paramètres temporels associés à la mobilité des citadins rend compte de la synergie existante dans les évolutions des villes et des systèmes de transport.

> *« Les déplacements résultent de l'agencement urbain (...). L'inverse est aussi vrai, c'est-à-dire que l'agencement urbain résulte des « conditions » de la mobilité (...). Nous sommes dans un système interactif où le plus permanent – le construit – et le plus éphémère – la mobilité – se modèlent en permanence l'un l'autre, suivant un processus évolutif à la fois global (tout interagit sur tout) et continu (inscrit dans le durée). Cette réciprocité (...) est constitutive du fait urbain lui-même ».*

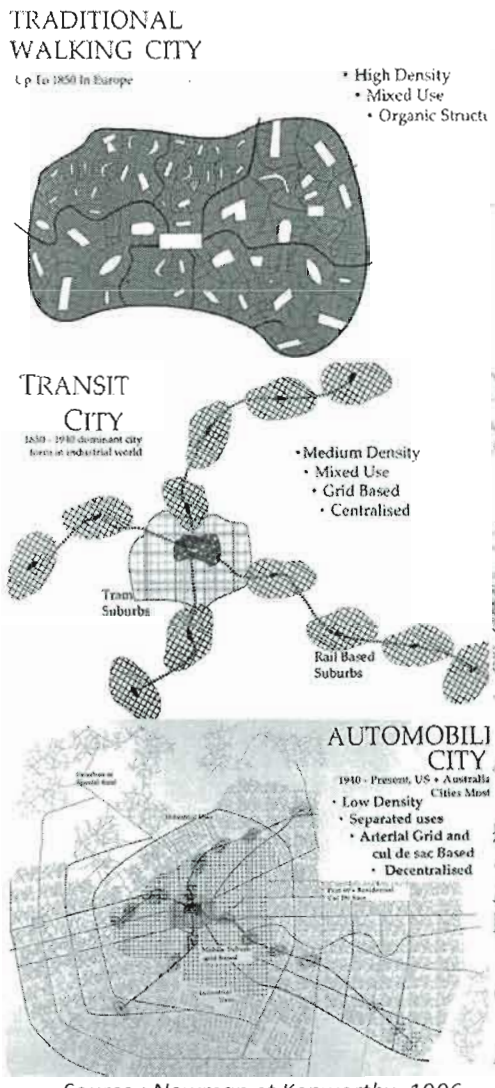
(Wiel, 2001)

1.1.1 La mutation des villes

Les dimensions et la forme de la ville initiale se sont définies par les déplacements à pied (Beaucire, 1996). Cette ville piétonne d'une largeur de quelques kilomètres a

une densité de population élevée (de 10 000 à 20 000 hab/km^2) propice aux interactions entre les citoyens. L'accroissement de population se traduit par une augmentation de la densité urbaine plutôt qu'un élargissement des frontières de la ville. À partir du milieu du 19e siècle, la ville pédestre a laissé place à la ville du transport en commun avec l'avènement du tramway et du rail urbain dans les pays industrialisés. Cette ville polycentrique et tentaculaire s'est développée à partir du noyau constitué de la ville piétonne. La ville a dorénavant une superficie de 10 à 20 kilomètres carrés et les densités de population s'abaissent (5 000 et 10 000 hab/km^2). L'avènement de la voiture pour tous après la Seconde Guerre mondiale a fait se greffer la ville automobile au tissu urbain existant. La ville s'étale sur un rayon de 50 kilomètres et la densité de population s'abaisse encore (1 000 à 2 000 hab/km^2).

La Figure 1.1 et la Figure 1.2 illustrent ces trois modèles de ville qui se sont succédé. L'inertie du développement des milieux urbains fait que ces trois états coexistent dans les villes actuelles. Pour des raisons historiques, les villes européennes ont un centre-ville adapté à la marche à pied tandis que les villes nord-américaines ont un héritage moins important. Leur tissu urbain est plus à l'image de la ville automobile où la voiture individuelle est devenue le moyen prédominant pour se déplacer dans ces villes diffuses.



Source : Newman et Kenworthy, 1996

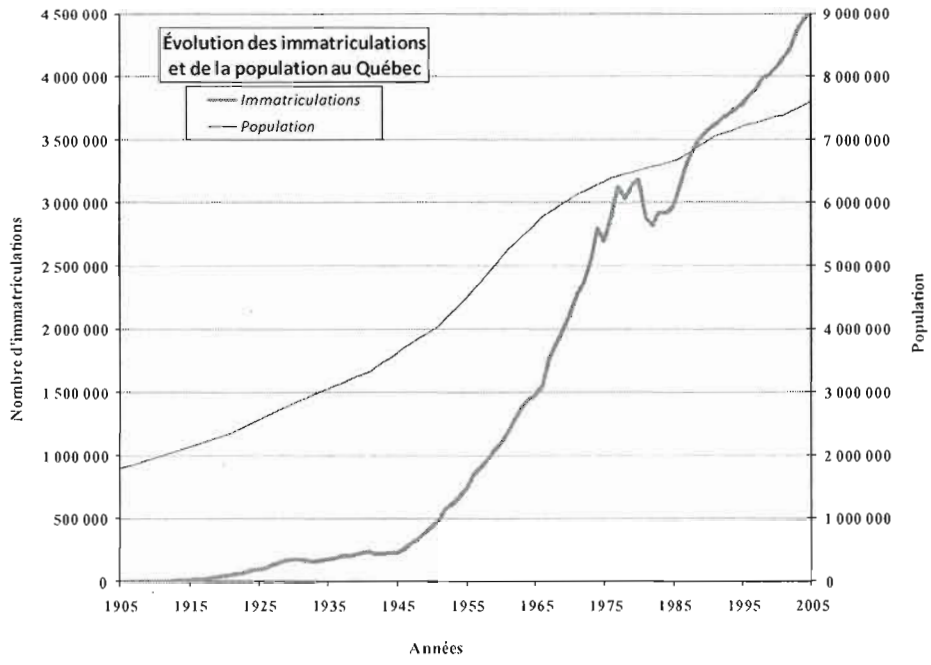
Sources : Atlas du Canada, 3e éd.
Ressources Naturelles Canada, 1957

Figure 1.1 Les trois modèles de villes qui se sont succédé et coexistent depuis la révolution industrielle

Figure 1.2 Évolution de l'occupation du territoire à Montréal

À l'image de l'évolution des limites urbaines de la ville de Montréal (Figure 1.2), l'existence des trois types de villes est une réalité. Typiquement, le tramway électrique, apparu à Montréal en 1892, a rapidement pris son essor pour

comprendre, en 1910, cinq lignes pour 225 kilomètres (140 miles) de voies et accueillir près de 145 millions de voyageurs par an (source : archives de la STM). Son effet sur l'aménagement du territoire est visible sur la Figure 1.2 (1932) où la ville se développe le long des axes du tramway, c'est la ville polycentrique. Dès la fin de la Deuxième Guerre mondiale, la motorisation de la population par la voiture explose (Figure 1.3) et amplifie le phénomène d'étalement urbain.



Sources : Statistiques Canada et SAAQ

Figure 1.3 Évolution de la croissance démographique et du nombre d'immatriculations de véhicules à moteur au Québec

L'allure de la courbe des immatriculations de la Figure 1.3 obtenue pour le Québec et en particulier le point d'inflexion à partir de 1945 est similaire à celle correspondant au parc automobile français (Banos, 2001). L'accès facilité à la voiture individuelle se combine à un autre facteur pour expliquer l'incapacité des

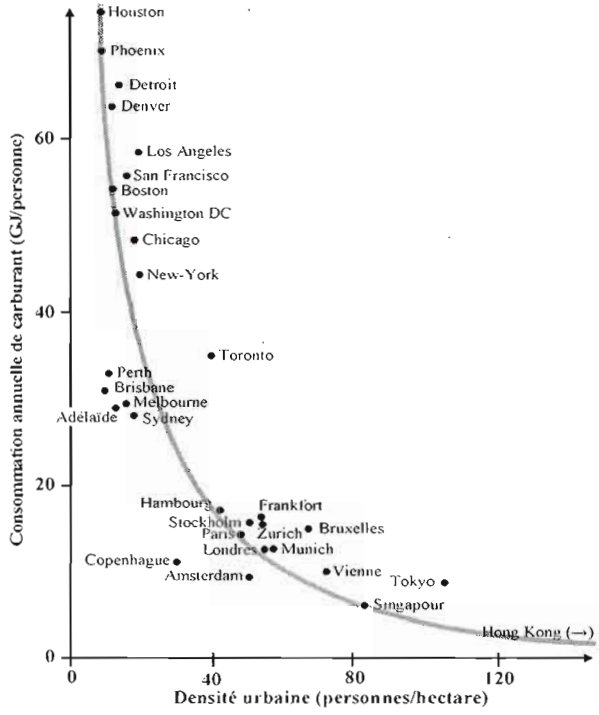
transports sur rail à concurrencer l'automobile. Le réseau routier est un bien public donc exempté de la taxe foncière. À l'inverse, les emprises des voies, les gares et les terminus des sociétés de transport collectif sont du domaine privé et les taxes foncières servent entre autres à la construction et à l'entretien des infrastructures dédiées à l'automobile (Hanna, 1993). Contrairement aux systèmes sur rail, « *avec la voiture, un développement tous azimuts devenait possible* » (Newman et Kenworthy, 1996).

Si l'automobile a accéléré le phénomène d'étalement urbain et d'abaissement de la densité de population, elle a également engendré une modification de l'agencement des espaces fonctionnels de la ville. De la densité et mixité des fonctions à l'origine de la ville centre, par l'autonomie acquise des individus grâce à la voiture, les espaces de l'agglomération se sont spécialisés (Wiel, 1999). Ainsi, le centre-ville accueille préférentiellement les activités de service et les banlieues sont davantage associées au résidentiel. À cela s'ajoute depuis quelques années, le phénomène de localisation des centres de commerces en périphérie de la ville. Ainsi, la dynamique urbaine engendrée par l'automobile est caractérisée par une consommation d'espace importante et une spécialisation fonctionnelle de l'espace qui engendrent des effets de coupure réduisant l'accessibilité rapprochée.

1.1.2 La nouvelle réalité urbaine

La voiture a facilité la mobilité du plus grand nombre et a permis aux populations de répondre à leur aspiration d'un milieu de vie avec plus d'espace tout en préservant la capacité d'accéder en ville (Banos, 2001). Ce phénomène de

périurbanisation a pour effet direct d'appauvrir la diversité de l'offre en transport (Litman, 2003a). De ce fait, les villes sont entrées dans la spirale de la dépendance automobile, le moyen par excellence pour répondre aux besoins individuels en déplacements. La consommation de carburant est un bon indicateur de l'utilisation privilégiée de la voiture (Newman *et al.*, 1989) et la Figure 1.4 exprime l'ampleur de la dépendance des villes envers l'automobile.



Source : Newman et Kenworthy (1989)

Figure 1.4 Expression de la dépendance automobile pour 30 villes à travers le monde

Tel qu'illustrée à la Figure 1.4, la dépendance à la voiture individuelle est en relation inverse avec la densité de population. En 1980, les citadins des villes états-uniennes ont consommé deux fois plus de carburant qu'en Australie, quatre fois plus qu'en Europe et six fois plus qu'en Asie. À l'échelle de la ville, cette relation

entre une utilisation privilégiée de l'automobile et la densité de population s'illustre par le taux d'utilisation de la voiture dans les déplacements quotidiens pour les différents secteurs de l'agglomération de Montréal (Figure 1.5). Le territoire couvert par l'enquête Origine-Destination (AMT, 2005) comprend 88 municipalités découpées en 101 secteurs pour une superficie globale de 5 500 km^2.

Source : Mobilité des personnes dans la région de Montréal
Enquête Origine-Destination 2003, version 03.a période automne
Traitement : M. Glaus

Figure 1.5 Taux d'utilisation de la voiture associés aux déplacements quotidiens pour les différents secteurs de la grande région de Montréal en 2003

Une première lecture de la Figure 1.5 permet de mettre en évidence la cœxistence des trois types de villes qui se sont développées successivement à partir de la ville centre. Par ailleurs, si la figure rend compte de la dimension spatiale, en revanche, les densités de population n'étant pas homogènes, les superficies des quatre classes ne sont pas proportionnelles aux populations associées aux taux

d'utilisation privilégiée de l'automobile. Le Tableau 1.1 présente les superficies et les populations pour les quatre classes.

Tableau 1.1 Superficie, population et densité des classes associées aux taux d'utilisation de la voiture pour la grande région de Montréal

	Classe 1 *(< 60 %)*	**Classe 2** *(60 à 70 %)*	**Classe 3** *(70 à 80 %)*	**Classe 4** *(> 80 %)*
Superficie (km^2)	103 *1,9 %*	96 *1,7%*	349 *6,4%*	4 930 *90,0%*
Habitants	734 301 *20,4%*	439 974 *12,2%*	789 027 *21,9%*	1 642 690 *45,6%*
Densité (hab/km^2)	7 122	4 593	2 260	333

Source : Mobilité des personnes dans la région de Montréal
Enquête Origine-Destination 2003, version 03.a période automne
Traitement : M. Glaus

Le Tableau 1.1 montre que, si la superficie des secteurs de la classe 1 représente moins de 2 % de la superficie totale, en revanche ils accueillent un peu plus de 20 % de la population. À l'opposé, les secteurs de la classe 4 correspondent à 90 % de la superficie totale pour moins de la moitié de la population totale.

Cependant, l'usage de l'automobile en milieu urbain, qui semble offrir que des aspects positifs, ne peut s'accroître indéfiniment sans effets négatifs. L'adaptation des infrastructures urbaines pour faciliter la circulation automobile engendre, à terme, l'engorgement des voies de circulation. D'un point de vue systémique, la dynamique entre facteurs positifs et négatifs de la dépendance à l'automobile peut être représentée selon la Figure 1.6.

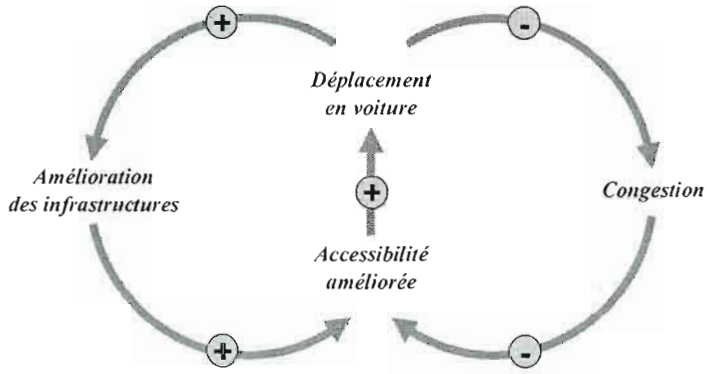


Figure 1.6 Dynamique des facteurs positifs et négatifs de l'usage privilégié de la voiture en milieu urbain [adapté de Handy, 1993]

Dans un premier temps, les retombées positives des déplacements en voitures sont supérieures aux effets néfastes dus, non seulement à la congestion, mais également aux problèmes de stationnement et de qualité de l'air (CDD, 2001). Cependant, cette approche monomodale engendre une spirale de dépendance envers la voiture qui génère des situations systématiques d'auto-engorgements aux heures d'affluence (Litmann, 2003b).

L'étude réalisée par Gourvil et Joubert (2004) sur l'évaluation de la congestion routière dans la région de Montréal, indique qu'entre 1993 et 1998, les véhicules-kilomètres (véh-km) effectués en **situation de congestion**[2] ont augmenté d'environ 34 % en passant de 2,5 à 3,3 millions véh-km. Cette augmentation est plus importante que l'augmentation de 21 % de véhicules-kilomètres parcourus qui sont

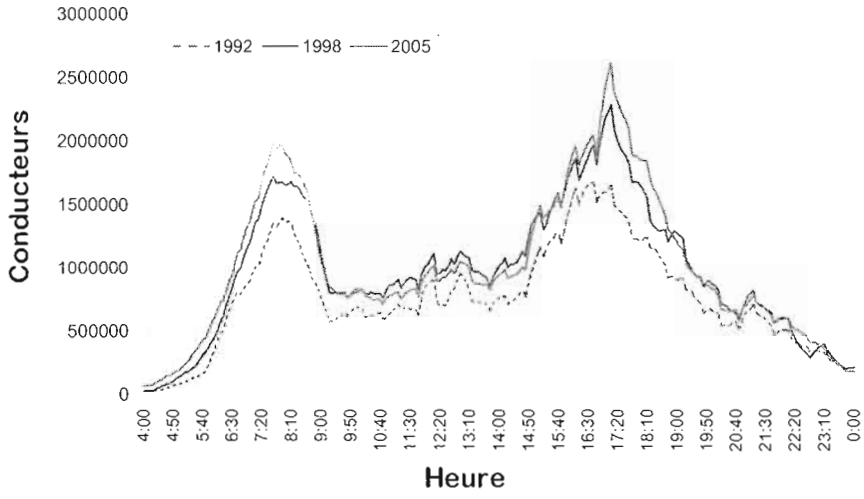
---

[2] Les auteurs ont défini le seuil de congestion a 60 % de la vitesse à écoulement libre, peu importe le type de **route** (autoroute ou artère). Pour une autoroute (vitesse permise de 100 km/h), le seuil est ainsi fixé à 60 km/h. Par ailleurs, l'étude n'a pris en compte que les phénomènes de congestion récurrente et n'a pas considéré les épisodes de congestion incidente.

passés de 11,2 à 13,5 millions véh-km. Dans le même temps, le nombre de véhicules-heures totaux (congestion ou non) a augmenté de 29 % sur le territoire de la région montréalaise. Comparativement à l'augmentation de 21 % de véhicules-kilomètres parcourus, l'écart indique que les usagers se sont déplacés à des vitesses plus faibles. L'étude a évalué les coûts socio-économiques annuels (1998) attribuables à la congestion récurrente à environ 780 millions de $, dont 90,4 % est attribuable aux retards (temps supplémentaires de déplacements des automobilistes et des camionneurs). La différence est associée aux coûts d'utilisation des véhicules (7,0 %) et des carburants (1,4 %) ainsi qu'aux émissions de polluants atmosphériques (0,8 %) et de gaz à effet de serre (0,4 %). La situation de la congestion de la région de Montréal n'est pas particulière. Par comparaison avec 12 agglomérations des États-Unis, les auteurs ont établi que, selon l'indice de congestion routière (méthode du *Texas Transportation Institute*), la métropole québécoise était la moins affectée par les situations de congestions récurrentes.

À l'échelle canadienne, la question du temps consacré *pour se rendre au travail et en revenir* a été abordée par Turcotte (2005). L'enquête indique, alors que la distance entre leur résidence et leur lieu de travail n'a que légèrement augmenté, que les Canadiens ont passé en moyenne 59 minutes pour faire l'aller-retour en 2005, comparativement à 51 minutes 1992. Pour la région métropolitaine de Montréal, le temps moyen des déplacements étaient de 62 et 76 minutes respectivement en 1992 et 2005. Bien que l'allongement des distances à un effet sur la durée des déplacements, l'augmentation des périodes d'engorgement permet également d'expliquer l'accroissement du temps consacré aux trajets. La

Figure 1.7 présente le nombre de véhicules sur les routes au Canada pour 1992, 1998 et 2005 selon l'heure de la journée.



Source des données : Statistiques Canada, Enquête sociale générale, 1992, 1998 et 2005.

Figure 1.7 Variation du nombre estimatif de conducteurs sur les routes au Canada selon l'heure de la journée en 1992, 1998 et 2005 [tiré de Turcotte, 2005]

La Figure 1.7 montre que l'augmentation des conducteurs sur les routes est particulièrement marquée aux heures de pointe du matin et de fin de journée. Ces périodes sont spécifiquement associées, respectivement à l'aller et au retour entre le domicile et le lieu de travail pour la majorité des personnes.

Turcotte (2005) met également en évidence que la durée moyenne de l'aller-retour a également augmenté entre 1992 et 2005 pour les usagers du transport en commun. Si les transports en voiture ont augmenté de 8 minutes entre les deux périodes (passant de 51 à 59 minutes), en transport en commun, les durées de déplacement ont subi une hausse de 13 minutes, passant de 94 à 106 minutes.

Pour les deux modes de transport, la différence représente environ une augmentation de 15 % de la durée des trajets. À distance égale, les usagers du transport en commun ont consacré, en 2005, en moyenne 41 minutes de plus dans leurs déplacements pour se rendre au travail et en revenir. Bien que les résultats de l'étude ne permettent pas d'évaluer le niveau de prestation de la voiture par rapport au transport en commun, l'auteur met en évidence que la durée supérieure des déplacements rend peu probable l'augmentation du niveau de popularité du transport collectif.

1.2 Axes d'intervention

En accord avec la volonté des gouvernements à atteindre les objectifs des différents accords internationaux dont le protocole de Kyoto (ONU, 1997), les stratégies des pays industrialisés visent à développer des solutions qui s'inscrivent selon les principes d'un transport durable reposant sur la prise en compte des facteurs sociaux, économiques et environnementaux (Transport Canada, 2001; Litman, 2003c).

1.2.1 Automobiles et circulation routière

Un des axes d'actions pour résoudre la problématique des transports, et en particulier leur incidence sur les émissions atmosphériques, porte sur l'amélioration des performances de l'automobile et l'efficacité des carburants (Ressources naturelles Canada, 2000) ou promouvoir l'utilisation de nouvelles sources d'énergie telles que l'éthanol, l'électricité et l'hydrogène (CEVEQ, 2000;

Parent *et al.*, 1996). Ces actions se sont concrétisées par la mise en marché, depuis quelques années, des véhicules électriques mais surtout des modèles hybrides. Ces mesures technologiques s'accompagnent également de mesures législatives comme en Californie qui, en 1990, mettait en place son programme LEV « *Low emission vehicle* ». Ce programme prévoyait que dès 2003, 10 % des véhicules vendus dans l'État ne devaient émettre aucune émission « *Zero emission vehicle-ZEV* ». Bien que cette mesure ait été modifiée en permettant une transition plus graduelle qui comprend des crédits pour des véhicules PZEV « *partial zero emission vehicle* » tels que les voitures hybrides, l'objectif demeure de mettre en place les conditions favorables à la baisse d'émission de gaz à effet de serre et de polluants par le parc automobile californien (CARB, 2007).

Par ailleurs, l'intégration des systèmes de transport intelligent tels que l'automatisation des péages à l'exemple de la voie rapide 407 à Toronto (Stewart, 1999) ou le développement des systèmes de navigation et d'information installés dans les véhicules. Ces systèmes visent à favoriser la fluidité du trafic et par conséquent à minimiser les émissions par kilomètre parcouru par une durée du trajet plus courte ainsi qu'une baisse des phases d'accélération et de freinage. Cependant, certaines études (Ministère de l'environnement du Québec, 2002) montrent que la fluidité des voies de circulation n'offre un gain qu'à court terme et que la tendance, selon le principe d'auto-engorgement (Litmann, 2003b), est d'enregistrer une augmentation du flux de véhicules à moyen terme. De plus, selon une approche en réseau, l'augmentation de la fluidité à un endroit du réseau peut engendrer un phénomène d'engorgement plus prononcé dans un autre secteur.

Il est envisageable que les automobiles ne soient plus, à moyen terme, des générateurs mobiles de CO_2 (Prades *et al.*, 1998). À noter, que quelque soit le moyen de propulsion (électricité, hydrogène), il faudrait considérer dans le bilan, la source d'énergie primaire nécessaire à sa fabrication (hydraulique, charbon, nucléaire, etc.). En revanche, les problèmes associés aux engorgements et à l'occupation de l'espace urbain (partage de la voie publique et stationnement) demeurent présents. Cette limite des mesures appliquées aux déplacements en voiture ouvre la voie aux mesures axées sur l'amélioration de l'offre du transport en commun afin de réduire la dépendance des sociétés urbaines à l'automobile.

1.2.2 Transport en commun

Pour inverser cette tendance d'une utilisation privilégiée de l'automobile, les mesures proposées par les instances des différents paliers gouvernementaux visent à promouvoir le transport en commun (IBI Group, 2001). Les études menées pour évaluer les mesures nécessaires mettent en évidence la nécessité d'une intervention financière à long terme des gouvernements pour atteindre des résultats et modifier les habitudes de déplacement des citoyens (HBL Decision Economics, 2002; Bernard, 2003). Ces mesures, basées sur le développement des transports collectifs de masse (métro, train de banlieue, tramway, bus, etc.) peuvent également être accompagnées d'actions complémentaires pour encourager le partage de véhicules automobiles, le covoiturage, le vélo, la marche ou encore le télétravail (Junca-Adenot, 2003).

Plusieurs études ont montré que les retombées économiques régionales d'un développement urbain axé sur le transport en commun étaient positives (Kenworthy *et al.*, 1999 ; Cervero, 1998) malgré les investissements importants nécessaires pour les infrastructures (Bernard, 2003). Cependant, indépendamment de leur financement, qui est une question politique et de choix de société (Boiteux, 2001 ; IBI Group, 2001), les caractéristiques intrinsèques des transports en commun conventionnels limitent leurs capacités à concurrencer l'automobile, ce d'autant plus dans un développement urbain axé sur l'utilisation de la voiture qui privilégie l'étalement urbain et de ce fait l'abaissement de la densité de population. Ce phénomène allonge le parcours, abaisse le taux de remplissage des véhicules et augmente de ce fait le coût par personne-kilomètre (Lowson, 2003a).

Dans la logique actuelle du transport en commun (Bernard, 2003 ; IBI Group, 2001), l'accroissement de la part modale passe par des investissements majeurs pour densifier le réseau et des stratégies négatives envers les automobilistes (taxes, péages, diminution du stationnement, fermeture de rues au centre-ville). Cependant, toutes ces mesures ne peuvent être efficaces (socialement et économiquement) que si l'offre globale du transport en commun est équivalente, ou tout le moins proche de celle de la voiture individuelle. Ce qui coûte cher dans les transports publics conventionnels, c'est non seulement les infrastructures mais également l'opération des véhicules sous-utilisés, situation fréquente dans les banlieues. Lorsqu'il y a un embranchement, soit les rames sont doublées pour maintenir la fréquence mais les coûts d'opérations augmentent, soit la fréquence

est diminuée par deux. Dans ce dernier cas, lorsqu'il y a 4, 8 ou 16 embranchements, en bout de réseau, le service ne peut satisfaire la demande.

La fonction de lignes pré-établies et la marche selon un horaire construit pour optimiser non pas la satisfaction de l'utilisateur mais la rentabilité d'utilisation des véhicules engendrent : (1) des temps d'attente ; (2) des arrêts fréquents aux stations intermédiaires ; (3) des changements de modes pour rejoindre la destination; (4) des déplacements debout et entassés qui sont autant de perceptions négatives de la part des usagers (McDonald, 2002).

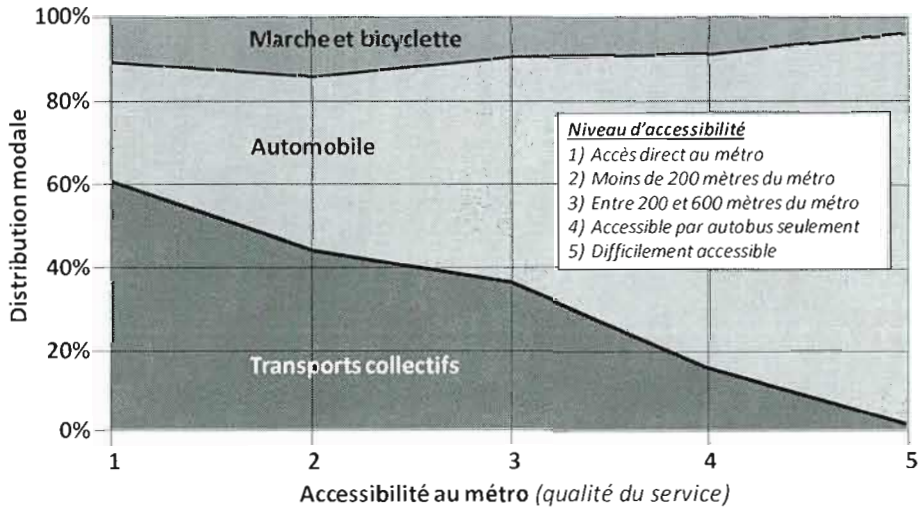


Figure 1.8 Distribution modale en fonction du niveau d'accessibilité au métro à Montréal en 1993 [tiré de Bergeron, 1999]

La Figure 1.8 montre que les résidents de Montréal se déplacent autrement qu'en voiture lorsque l'offre en transport dessert adéquatement l'origine et la destination. Cependant, le mode de « consommation » de la mobilité change et ne

repose plus sur le schéma classique du transport de masse « métro-boulot-dodo » qui considère que les usagers se déplacent en même temps sur des parcours et selon des horaires établis. Nos sociétés évoluent vers une augmentation du temps libre que les citoyens consacrent à diverses activités dispersées sur un territoire de plus en plus élargi. Ainsi, entre le lieu de travail et le domicile, le trajet est fractionné pour se rendre d'une activité à l'autre (Ascher, 2002). Dès lors, comme le souligne Banos (2001), « *Comment attraper le citadin moderne alors que ses motifs, ses horaires et ses origines-destinations de déplacement varient toujours plus, dans les mailles rigides du filet des réseaux de transports actuels ?* ». Dans ce contexte, le service de transport collectif doit faire preuve de flexibilité et de réactivité pour satisfaire le besoin en mobilité et offrir une alternative à la voiture individuelle. Cependant, la reconquête de parts de marché sur l'automobile ne peut plus se faire par les moyens traditionnels (Dupuy, 1999) et nécessite la promotion de nouveaux transports qui répondent à des besoins en déplacement qui non seulement sont dispersés dans le temps et dans l'espace mais également se caractérisent par une irrégularité temporelle et une hétérogénéité spatiale (Ascher, 2002). Dès lors, la diversification de la demande ne peut plus être satisfaite par des modes de transport basés sur les principes d'économie d'échelle et un mode opératoire répétitif pour un service de masse.

1.3 Système de transport cybernétique (STC)

Dans le présent document, le terme STC est préférentiellement utilisé dans la mesure où il fait référence à la terminologie et aux propriétés des systèmes dynamiques. Tel que présenté ci-après, les caractéristiques générales retenues

pour définir un STC sont celles associées au *Personal Rapid Transit* (PRT) par l'*Advanced Transit Association* (ATRA, 2003).

Un Système de Transport Cybernétique (STC) est, d'une manière générale, dédié tant aux déplacements des personnes que des biens. Dans le contexte de la mobilité des personnes, un STC représente la personnalisation du transport public. Il se présente comme un système de transport destiné à offrir un déplacement individualisé, automatisé, sur demande et sans arrêt. Les véhicules circulent en fonction des besoins sur un réseau de voies qui assurent tant leur conduite que le transfert d'information et de commande entre la centrale et les véhicules.

1.3.1 Origine et définition du concept

Le concept de STC est né dans les années 1950 et a suscité l'intérêt des gouvernements (aux États-Unis tout particulièrement) à la fin des années 1960 et au début des années 1970 (Anderson, 1996). Cependant, les gouvernements se sont désintéressés en raison du manque de cohésion entre les nombreuses idées proposées de transport automatique et les difficultés technologiques à réaliser un transport automatisé. C'est véritablement l'avènement de l'informatique au milieu des années 1980 qui a marqué le développement des systèmes de transport de proximité automatisé (Lowson, 2003a).

Pour éviter la problématique des coûts associés aux infrastructures et à l'opération des véhicules sous-utilisés, situation fréquente dans les zones de faible densité ou

en dehors des heures d'affluence, la solution revient à scinder les véhicules (Latour, 1992). C'est l'un des concepts qui a dirigé le développement des STC (Figure 1.9).

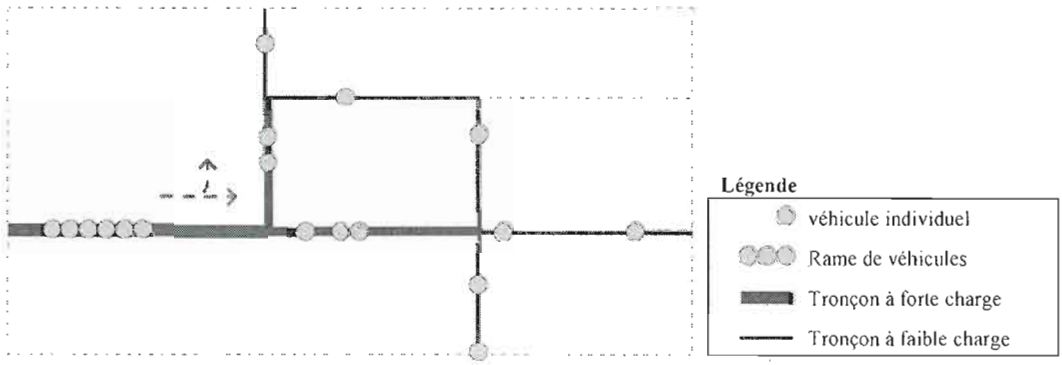


Figure 1.9 Concept d'irrigation des embranchements avec les véhicules de petite capacité d'un STC [adapté de Latour, 1992]

Sur les tronçons à forte charge, les véhicules peuvent circuler en rame et ainsi répondre à la forte demande. À l'inverse, sur les tronçons à plus faible demande, les véhicules peuvent circuler individuellement, maximisant de ce fait, l'utilisation des places disponibles.

Découlant de ce concept, les STC sont en rupture avec l'approche traditionnelle du transport collectif. Dû au nombre de véhicules et à leur taille, il n'est économiquement plus possible de les opérer par des chauffeurs (Bergeron, 1999). Par ailleurs, pour permettre l'irrigation des embranchements en fonction d'une demande effective en déplacement, il est nécessaire que chaque véhicule puisse emprunter l'un ou l'autre de ces embranchements. Basé sur ce principe de réseau maillé, le second concept à l'origine du développement des STC découle de la cinématique ; il repose sur la dissociation de la fonction « transport » et de la fonction « accès » au dispositif de transport (Figure 1.10).

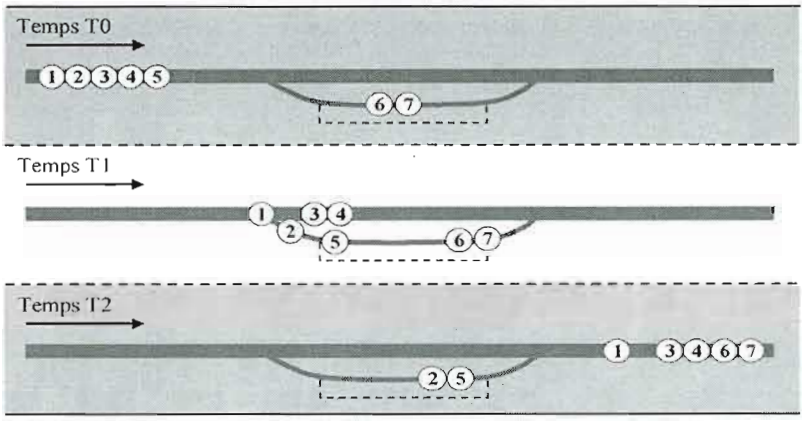


Figure 1.10 Concept de dissociation des fonctions « transport » et « accès » [adapté de Latour, 1992]

Le concept de dissociation des fonctions permet ainsi de respecter les deux règles suivantes : (1) les voyageurs traversent sans arrêt les stations intermédiaires ; (2) l'augmentation du nombre de stations le long d'une liaison n'influence ni la vitesse ni le débit en ligne (Latour, 1992).

Bien qu'il existe un grand nombre de STC qui possèdent leurs propres spécificités, un STC se définit selon les caractéristiques générales de conception définies dès 1988 par l'*Advanced Transit Association* (ATRA, 2003) :

- véhicules entièrement automatisés capables de se mouvoir sans conducteurs humains;
- véhicules captifs (une voie de guidage réservée);
- petits véhicules disponibles pour usage exclusif par un individu ou un groupe restreint (1 à 6 passagers), voyageant ensemble;
- voies de guidage à faible emprise en surface, surélevée ou enterrée;

- chaque véhicule capable d'emprunter toutes les voies de guidage et stations sur un réseau maillé;
- parcours de l'origine à la destination sans transfert ou arrêt intermédiaire au lieu de fonctionner selon des corridors de déplacement et des arrêts prédéfinis;
- service sur demande, disponible 24 heures sur 24, 7 jours sur 7 plutôt que selon un horaire prédéfini.

Globalement, un STC vise à offrir le meilleur de l'automobile et des transports collectifs conventionnels. Ainsi, un STC est conçu pour déplacer librement le plus grand nombre de personnes dans un espace urbain. Ces caractéristiques font qu'il n'occupe qu'une fraction du sol nécessaire à l'automobile (pas de stationnement), tout en offrant un espace d'accueil et une qualité de service beaucoup plus attractif que les systèmes conventionnels de transport en commun. Par ailleurs, il est accessible par tout le monde et répond précisément au principe d'équité sociale.

1.3.2 Caractéristiques et avantages du système

Un STC se caractérise par ses éléments structuraux composés d'une part, des éléments physiques tels que les voies de guidage qui composent le réseau, et, d'autre part, des réseaux de communication qui permettent les interrelations entre les différents éléments qui constituent le système. Les réseaux de communication comprennent non seulement les canaux qui portent la communication (câble, longueur d'ondes) mais également l'unité centrale qui assure le traitement de l'information (Saugy *et al.*, 1997). La Figure 1.11 présente un schéma de principe

des éléments structuraux d'un STC ainsi que leurs interrelations (liens de communication).

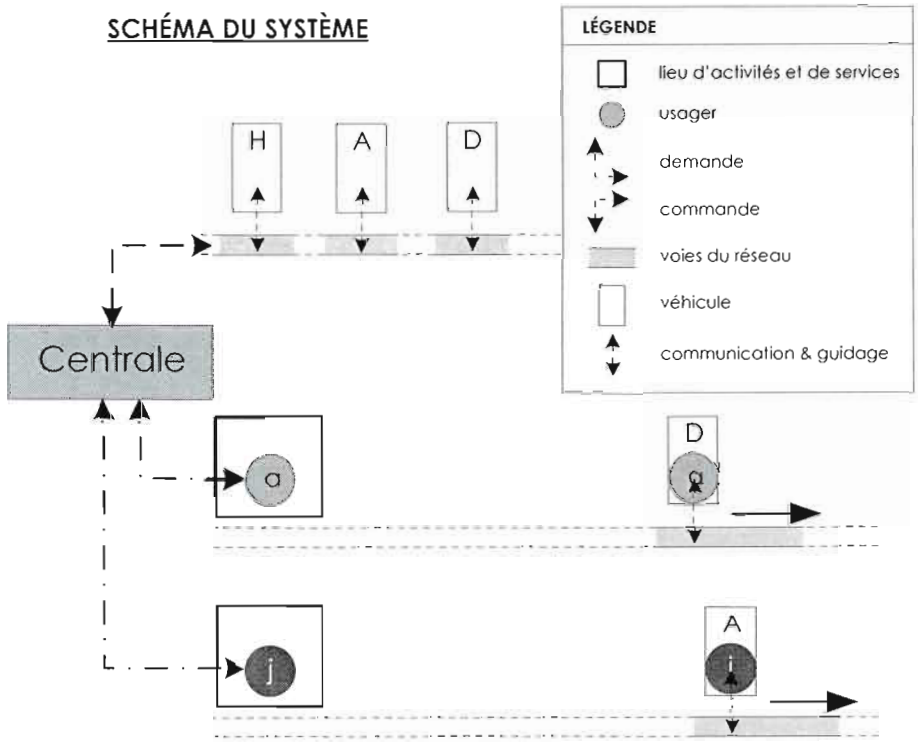


Figure 1.11 Schéma du système composé de ses éléments physiques et leurs liens de communication

Tel qu'exprimé à la Figure 1.11, la **centrale** s'apparente au cerveau du système en assurant d'une part la coordination entre la demande de la part des **usagers** et les **véhicules** disponibles et, d'autre part, la cohérence du comportement du système (gestion des incidents, choix des itinéraires, positionnement des véhicules sur le réseau). Les **voies du réseau** supportant les flux de véhicules (vides et occupés) correspondent au système nerveux par lequel sont transmis les flux d'énergie pour alimenter chaque **véhicule** et les flux d'information entre la centrale et les véhicules. Les voies assurent la conduite des véhicules selon l'itinéraire construit

par la centrale et permettent de connaître leur état (marche, arrêt, panne) ainsi que leur positionnement. Ces caractéristiques rendent le système apte à répondre dynamiquement aux demandes des utilisateurs. Les principales fonctionnalités d'un STC sont présentées au Tableau 1.2.

Tableau 1.2 Principaux avantages associés à l'opération d'un STC [tiré de ATRA, 2003]

Caractéristique	Description
Approche orientée sur l'usager	Le véhicule se rend au point d'origine sur commande de l'usager n'importe où sur le réseau pour un déplacement individuel (ou en petit groupe) à n'importe quelle heure du jour ou de la nuit. L'usager se rend à sa destination sans détour ni arrêt intermédiaire.
Efficacité énergétique	Fonctionnant à l'électricité et conçu pour des déplacements urbains, les STC ne commandent pas de vitesses élevées et de fortes accélérations. Le système de contrôle optimise l'allocation des véhicules en temps réel en fonction de la demande, minimisant ainsi les trajets « à vide ».
Emprise au sol	Les faibles dimensions des véhicules, la possibilité d'une exploitation en site mixte (partage de l'espace) et la prise en charge des véhicules (pas nécessaire de stationner le véhicule) n'exige qu'une fraction des surfaces nécessaire pour l'automobile.
Impacts environnementaux	La propulsion électrique des STC, l'efficacité énergétique et l'optimisation du taux de remplissage par kilomètre parcourus minimisent les émissions de CO_2. Les faibles dimensions des véhicules et les systèmes de sécurité (détection d'obstacle, etc.) maximisent la sécurité des usagers et des autres utilisateurs potentiels des voies de circulation (piétons, vélos, etc.).
Coûts	Les études menées sur l'implantation d'un PRT pour le transport de personnes montrent que tant les coûts d'infrastructures que d'opération sont plus bas en comparaison des systèmes de transport de masse (métro, train léger, tramway, etc.). Cela s'explique par l'infrastructure relativement légère des STC (véhicules, voies de guidage, stations) et l'absence de chauffeur.
Transferts intermodaux	Un STC peut être implanté soit comme système primaire de mobilité dans une zone urbaine pour réduire les distances entre les points de services d'une ville, soit comme un système secondaire (supplémentaire) pour procurer des connections rapides et conviviales entre des systèmes de transport rapide (train, aéroport, etc.)

Ainsi, l'intégration des éléments structuraux (voies de guidage, véhicules et système de gestion des demandes et des déplacements) et fonctionnels (service individualisé, prestation sur demande, déplacement automatisé sans arrêt intermédiaire) définit des propriétés globales au système qui lui permettent de s'adapter aux caractéristiques des différents besoins de déplacement engendrés par la demande des utilisateurs (Saugy, 2001).

Par définition, « *Un système est un ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but* ». Par ailleurs, un système se décrit par ses caractéristiques structurales et fonctionnelles (De Rosnay, 1975). À cette définition, la notion de propriété d'ensemble apparaît importante : la propriété des éléments et de leurs interactions aboutissent à des propriétés globales spécifiques non réductibles à la somme des propriétés élémentaires (Frontier *et al.*, 1999). La transposition de ces notions à la mobilité des personnes permet de définir un STC comme un **système** par comparaison aux modes de transport conventionnels (voiture, métro, tramway, bus, etc.) qui reposent en majeure partie sur la juxtaposition des composantes (infrastructure, véhicule, systèmes d'information et d'ordres) avec un faible degré d'intégration. À titre d'exemple, un réseau de caméra de surveillance des autoroutes permet d'informer les automobilistes des zones de ralentissement et de congestion sur le réseau. Cependant, cette interaction entre infrastructure et véhicule est purement informative et l'action correctrice qui en découle est dépendante du nombre de récepteurs (conducteurs écoutant la radio ou lisant les panneaux de signalisation) et du choix individuel des automobilistes.

Mode de transport collectif au service de l'usager, les STC n'en demeurent pas moins des systèmes qui possèdent les atouts des transports de masse. Le Tableau 1.3 présente une comparaison des valeurs spécifiques associées à la capacité à déplacer des personnes entre le STC *Serpentine* et différents modes de transport conventionnel.

Tableau 1.3 Capacités théoriques comparées du STC-*Serpentine* avec les modes de transport conventionnel

		STC Serpentine		Autoroute[1)]	Autobus	Métro
Vitesse	*km/h*	**18**	**18**	100	18	35
	m/s	*5,0*	*5,0*	*27,8*	*5,0*	*9,7*
Longueur absolue d'un véhicule	*m*	3,2	3,2	4	12	150
Distance entre les véhicules	*s*	0,5	0,5	2	120	180
	m	2,5	2,5	55,6	600	1 750
Longueur relative d'un véhicule	*m*	5,7	5,7	59,6	612	1 900
Charge unitaire	*pers/véh*	1,2	4,0	1,2	80	1 200
Charge linéaire	*véh./km*	175,4	175,4	16,8	1,6	0,5
	pers/km	210,5	701,8	20,1	130,7	631,6
Capacité	*pers/h*	**3 790**	**12 632**	**2 015**	**2 353**	**22 105**

1) *Pour les fins de comparaison, les calculs sont réalisés pour une voie d'autoroute*

Le Tableau 1.3 montre, dans un premier temps, qu'il n'y a pas de relation directe entre vitesse et capacité de transport. Par ailleurs, pour le STC-Serpentine, les calculs ont été établis pour deux valeurs de charge unitaire (pers/véh). La valeur de 1,2 pers/véh correspond à un mode de consommation du STC similaire à la voiture, tandis que la valeur de 4 pers/véh correspond à une utilisation du STC en mode « transport de masse ». Cependant, cette approche comparative basée sur la charge déplacée (personne/heure) ne rend pas compte de la flexibilité offerte par les STC.

Les véhicules d'un STC ne se déplacent pas selon une direction mais bien en réseau. Ainsi, contrairement à un métro qui canalise les usagers dans le même corridor de déplacement, l'usager d'un STC peut emprunter un véhicule pour se rendre à n'importe quel point du réseau. Par ailleurs, les véhicules sont en service uniquement lorsqu'il y a une demande et, de ce fait, minimise les déplacements à vide. La dissociation des fonctions « transport » et « accès » permet d'augmenter le nombre d'arrêts sur le réseau sans affecter la durée du parcours. Selon la démarche de Lowson (2003b), la vitesse moyenne d'un transport conventionnel (incluant les déplacements à pied) est fortement associée à la distance entre chaque station (Figure 1.12).

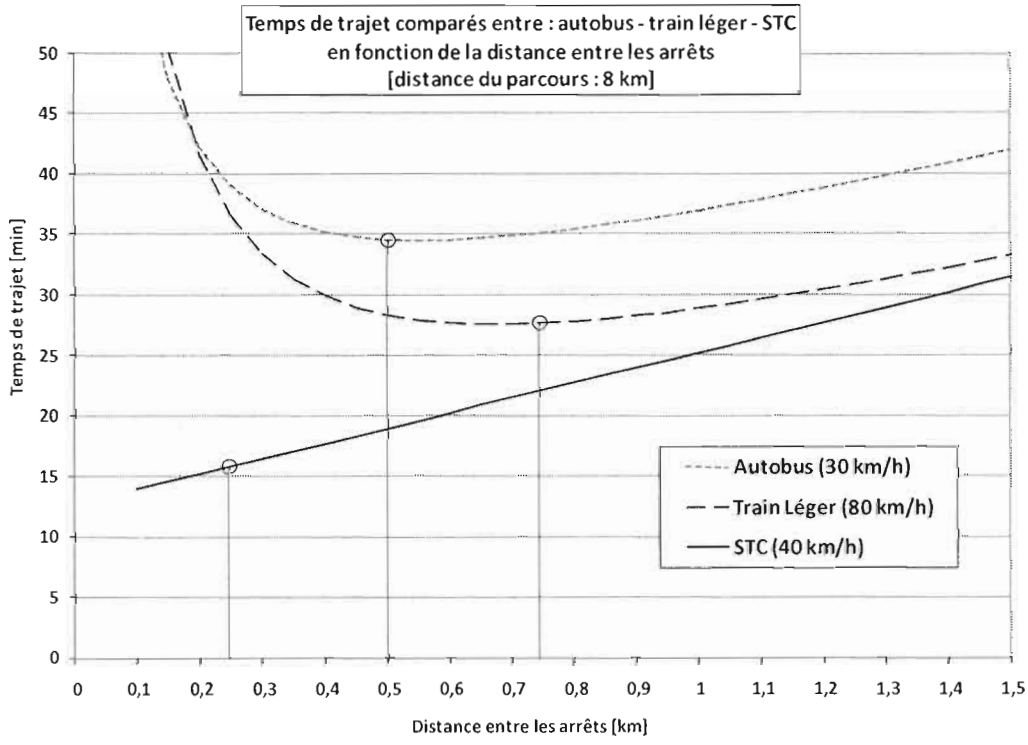


Figure 1.12 Temps de trajet comparés entre autobus, train léger et STC en fonction de la distance entre les arrêts pour une distance parcourue de 8 kilomètres [tiré de Lowson, 2003b]

Tel qu'indiqué à la Figure 1.12, pour un trajet de 8 kilomètres correspondant à la distance moyenne des déplacements en milieu urbain, la distance optimale entre les arrêts est de 500 mètres et 750 mètres pour, respectivement le bus et le train léger. Dans ces conditions, et considérant leur vitesse maximale respective de 30 km/h et 80 km/h, la vitesse moyenne est de 14 km/h pour le bus et de 17,4 km/h pour le train léger. Par comparaison, la courbe obtenue pour le STC est une droite, conséquence de l'absence d'arrêt intermédiaire. La figure montre que dans le cas du STC-ULTra (vitesse de pointe de 40 km/h), une distance de 250 mètres entre les stations afin de minimiser la marche à pied permet d'abaisser la durée du trajet à moins de 16 minutes, ce qui correspond à une vitesse moyenne de 30 km/h.

Si un STC apparaît avantageux sur le plan du service de mobilité offert au citoyen, il se montre également économiquement attractif. Bien qu'il existe plusieurs technologies de STC qui font appel à différentes infrastructures tant au niveau du véhicule que des voies de guidage, l'analyse des coûts (Tegnér, 2005) montre que d'une manière générale les STC représentent le mode le plus économique comparativement aux transports conventionnels. L'étude comparative révèle deux caractéristiques des STC. La première démontre que les STC sont moins chers dans une configuration type de déplacement : des trajets de 10 kilomètres et 25 000 déplacements par jour (Tableau 1.4).

Tableau 1.4 Coût moyen par passager-trajet en Euro pour différents modes de transport à 25 000 déplacements journalier [adapté de Tegnér, 2005]

Mode de transport	Coût moyen par passager-trajet [1)] à 25 000 déplacements journalier
Train léger	4,13 €
Métro	4,12 €
Autobus	2,53 €
Autobus (voie réservée)	2,08 €
STC	1,19 €

[1)] le coût comprend les investissements, l'opération et la maintenance

La seconde caractéristique établit que lorsque le nombre de déplacements journalier diminue, le coût moyen par passager-trajet augmente moins fortement pour les STC que pour les autres modes (hormis l'autobus mais qui n'offre pas le même niveau de service), ce qui diminue l'impact de la variation de la demande en mobilité sur la rentabilité du système de transport. Ces bénéfices économiques sont une retombée d'une part d'un investissement moins élevé pour des infrastructures plus légères (voies de guidage et véhicules) et, d'autre part, d'un coût d'opération abaissé grâce à l'absence de conducteur dans les véhicules.

Dans le cas de la comparaison économique entre différents modes de transport, il apparaît que l'hypothèse de 25 000 déplacements par jour soit faible pour des modes tels que le train léger ou le métro, ce qui a pour effet de pénaliser ces modes de transport. Ainsi, bien que la comparaison apporte une information intéressante, il apparaît néanmoins que l'analyse entre différents modes devrait être établie spécifiquement pour chaque milieu urbain étudié. Ainsi, l'évaluation de la réponse de l'offre en mobilité en regard des besoins individuels en déplacement permettait de comparer différents scénarios de transport (métro, train léger, STC

ou combinaison de plusieurs modes) non seulement sur une base économique mais également en fonction de critères environnementaux et de satisfaction des usagers.

1.3.3 Exemples de STC

Dans sa définition de véhicules de dimensions réduites (1 à 6 personnes) dédiés aux déplacements personnalisés, il existe de nombreux modèles de STC à différents stades de développement, allant du simple concept au système opérationnel à l'échelle réelle. Sans toutefois dresser une liste exhaustive des technologies STC, le Tableau 1.5 présente les systèmes qui font l'objet d'une attention particulière tant d'un point de vue recherche et développement que solution applicable à la problématique de la mobilité des personnes en milieu urbain.

Tableau 1.5 Liste de différentes technologies STC, leur origine et leur principales caractéristiques

Nom	Origine	État	Guidage	Vitesse maximale
CyCab	France	démonstration	optique	30 km/h
Serpentine	Suisse	démonstration	magnétique	18 km/h
Skycab	Suède	concept	physique (rail)	32 km/h
Skyweb Express	États-Unis (Minnesota)	prototype	physique (rail)	32 à 96 km/h
ULTra	Royaume-Uni	démonstration	magnétique ultrasonique	40 km/h
Vectus	Corée-Europe	prototype	physique (rail)	60 km/h

Parmi les technologies présentées au Tableau 1.5, certaines d'entre elles reposent sur un réseau de voies de guidage physique. Si ces derniers facilitent la conduite des véhicules, en revanche ils représentent une barrière physique qui oblige à dédier un espace urbain pour le STC. En règle générale, ces systèmes sont aériens. Cette configuration engendre des coûts plus élevés en infrastructure et offre une moins grande flexibilité dans la configuration du réseau et de ses stations de desserte (Figure 1.13).

Skyweb express *source : Taxi2000*
http://www.taxi2000.com/

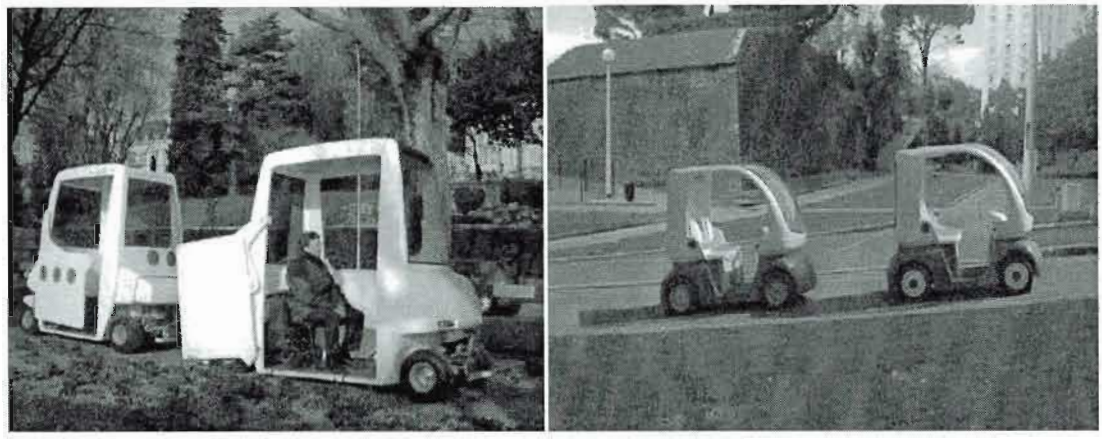
Figure 1.13 STC avec voies de guidage physique

En ce qui concerne les technologies STC dont le guidage est sans contact, soit les infrastructures de pilotage sont apparentes et les véhicules sont strictement captifs d'un réseau de voies dédiées au STC (Figure 1.14), soit le système de guidage n'est pas apparent et permet d'intégrer les véhicules en site mixte (Figure 1.15). Dans le premier cas de figure, la configuration du réseau s'apparente à celles des technologies avec voies de

ULTra
source Advanced Transport Systems Ltd
http://www.atsltd.co.uk/

Figure 1.14 STC avec guidage sans contact sur un réseau de voies dédiées

guidage physique. Pour les systèmes sans voies apparentes, les infrastructures étant plus légères, les solutions offrent une plus grande flexibilité dans leur planification et leur intégration à un milieu urbain à forte densité en permettant une mixité des modes.



Serpentine *source : BSI S.A.* *http://www.serpentine.ch/* **Cycab** *source : Robosoft* *http://www.robosoft.fr/*

Figure 1.15 STC avec guidage sans contact et sans infrastructure apparente

Cette flexibilité d'intégration dans un tissu urbain est illustrée par la Serpentine et sa voie active enfouie dans la chaussée, le MagnétoGlisseur®. Il permet, en plus d'assurer la transmission d'informations entre les composantes du système, de transmettre sans contact l'énergie aux véhicules par phénomène d'induction. Cette voie active est alimentée localement sous la capsule au fur et à mesure de l'avancement de cette dernière et permet de guider et connaître la position de chaque capsule en temps réel (CN Serpentine SA, 2003). Cette flexibilité favorise l'adaptation du STC aux caractéristiques de différents types de déplacement définis par la demande des utilisateurs (Saugy, 2001) : (1) réseau à haute capacité : site propre avec des capacités supérieures au métro si nécessaire; (2) choix de la

destination : ligne ou réseau de pistes et bandes démarquées du trafic où, de l'origine, l'usager choisit sa destination; (3) choix libre et individuel : accès libre et individuel aux commerces du centre pour le transport de bagages ou au domicile en zone résidentielle pour la nuit.

Bien qu'actuellement, aucun STC ne soit en opération sur des sites urbains, plusieurs systèmes ayant fait l'objet de projets de démonstration à grande échelle, sont en cours de réalisation ou à l'étude. Les projets de démonstration à grande échelle tels que ceux menés à Cardiff (STC-ULTra) et à Lausanne (STC-Serpentine) en 2003 ont démontré non seulement l'opérabilité du système mais également l'intérêt pour ce type de transport. La commission européenne « *Transport Research Knowledge Centre* » mentionne, dans son rapport synthèse sur les principales recherches européennes dans le domaine (Leiss *et al.*, 2006), que ce type de mobilité s'intègre aux objectifs de la politique en matière de transport et permettrait d'alléger les problèmes à un coût plus attractif que tout autre système.

Cependant, en rupture avec les modes conventionnels de transport, les STC se heurtent à plusieurs barrières à l'origine des réticences à les intégrer comme solution de mobilité urbaine. À ce titre, le rapport final du projet européen EDICT (Evaluation and demonstration of innovative city transport) (EDICT, 2004) met en perspective les différentes facettes de ces barrières qui découlent du risque pour les partenaires (municipalité, autorités régionale et nationale, promoteur, investisseurs, opérateur, etc.) à choisir ce type de transport pour répondre aux besoins de mobilité en milieu urbain. L'absence d'exemple de STC en opération

engendre une réticence des décideurs à être les premiers à affronter les inconnues et difficultés inhérentes à la mise en œuvre d'une nouvelle solution de transport. Par exemple, l'absence d'une catégorie de transport adaptée aux systèmes de transport automatisé sans chauffeur peut engendrer des retards dans les procédures d'acceptation et de délivrance des autorisations de mise en opération. Ainsi, la faisabilité technique à elle seule n'est pas garante du choix d'un STC comme solution de transport. Pour aller de l'avant, les auteurs du rapport proposent : (1) de planifier le projet étape par étape avec une première phase d'une ampleur limitée afin de réduire les engagements financiers et permettre de résoudre les différents écueils associés à la mise en œuvre d'une solution innovatrice; (2) d'attirer l'intérêt du secteur privé afin de minimiser l'impact de l'incertitude politique et (3) de développer les procédures légales spécifiquement associées aux systèmes de transport automatisé sans chauffeur. Sur ce dernier point, le rapport final du projet européen Cybercars (Cybercars, 2005) présente les lignes directrices d'une méthode de certification qui devrait être développée pour les STC.

Un autre aspect de la difficulté de la mise en œuvre d'un STC repose sur la structure des organisations en charge du transport. En effet, le fractionnement des champs de compétence et l'incapacité des intervenants à intégrer l'ensemble des composantes associées au transport selon une approche systémique confinent les solutions retenues dans un raisonnement strictement modal de la mobilité : la voiture individuelle ou le transport en commun de masse (Litmann, 2003c). Selon l'approche systémique, les transports ne représentent qu'un moyen d'atteindre

une finalité qui peut se définir en termes de mobilité ou d'accessibilité aux différents lieux de service et d'activité (Glaus, 2004). Dans ce contexte, les technologies sont au service de la demande en replaçant les individus au centre des préoccupations et le marché du transport doit viser à offrir la meilleure technologie disponible pour y répondre. Dès lors, il ne devrait plus y avoir opposition de mode mais complémentarité de fonction.

Les STC se présentent comme une alternative intéressante en complémentarité des modes de transport conventionnel (voiture individuelle, métro, tramway, train léger) pour améliorer l'offre en mobilité et minimiser les problématiques associées à une utilisation privilégiée de la voiture en milieu urbain. Tant la voiture individuelle que le transport de masse conventionnel évoluent en dynamique passive (Glaus, 2004). En effet, pour la voiture, le conducteur est tributaire des engorgements ainsi que des places de stationnement. Il doit adapter le choix de son itinéraire au fur et à mesure de l'information disponible. Quant aux transports en commun, l'usager est captif d'un transport qui se déplace selon des corridors et des horaires préétablis construits sur des valeurs moyennes de fréquentation mises en relation avec les coûts d'opérations du transport. Ainsi, l'intérêt de l'étude des STC comme offre collective de la mobilité individuelle en milieu urbain réside dans le haut degré d'intégration des composantes du système qui, en permettant d'adapter l'offre à la demande, illustre la dynamique d'un système de mobilité axé sur le besoin des usagers.

CHAPITRE II

ANALYSE NON-LINÉAIRE DE LA DEMANDE EN MOBILITÉ ADAPTÉE À UNE OFFRE DE TRANSPORT INDIVIDUALISÉ

Mathias Glaus[1], Robert Hausler[1] et Jacques Bourgois[2]

[1] *Ecole de Technologie Supérieure, Département de la construction, STEPPE-ETS, 1100 Notre-Dame O., Montréal, Canada H3C 1K3 and*

[2] *Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Centre SITE, 158 Cours Fauriel, 42023 St-Etienne cedex 2, France.*

La version en anglais de l'article tel que soumis à la revue est en **Annexe A**

Article soumis

Journal of Advanced Transportation 2006

Mots clés : mobilité individuelle, transport urbain, série chronologique, analyse non-linéaire, comportement chaotique.

Résumé

Les Systèmes de Transport Cybernétique (STC) allient la flexibilité de l'automobile et la capacité des transports de masse. Ils individualisent et révolutionnent le transport en commun tout en représentant une réelle stratégie positive pour renforcer l'offre globale en mobilité. Basée sur cette rupture fonctionnelle, l'approche développée vise à caractériser le besoin individuel en déplacement, pour un centre d'activité en milieu urbain, en appliquant la méthode d'analyse non-linéaire de séries chronologiques. L'expérimentation est réalisée sur les données enregistrées pour un édifice public de la Ville de Montréal (Canada). Les résultats concluent que le besoin individuel en mobilité se comporte comme un processus chaotique. Ce comportement permet d'appliquer les techniques associées à l'espace des phases pour prévoir le besoin. Le caractère déterministe pave la voie au développement d'un système de référence globale de la mobilité individuelle en milieu urbain, permettant de mesurer l'apport des STC dans l'offre globale en mobilité.

Introduction

Un des enjeux du développement urbain réside dans la capacité des individus à satisfaire leurs besoins en mobilité. Tenant compte de l'étalement urbain et de la diversité des besoins individuels (Banos, 2001), la mise en application des Systèmes de Transport Cybernétique – STC (Lowson, 2003) est une des solutions pour améliorer la mobilité individuelle et augmenter la part modale du transport en commun. Dans ce contexte, le système de transport *Serpentine* (Saugy, 2001) se présente comme la meilleure technologie disponible en raison de son évolution avancée (faible emprise au sol, transmission d'énergie sans contact, efficacité énergétique, etc.).

Les STC se distinguent des modes de transport conventionnels par leurs caractéristiques : capacité de se mouvoir automatiquement sans conducteur humain ; dimensions réduites (1 à 6 personnes) ; déplacement sans arrêt ni transfert ; service sur demande en tout temps (Szillat, 2001). Ces différences engendrent une rupture par rapport aux modes traditionnels de transports collectifs qui est d'une part, d'ordre fonctionnel et d'autre part d'ordre opérationnel. Sur le plan fonctionnel, si le métro vise à déplacer le plus grand nombre de personnes, aux mêmes heures sur les mêmes parcours, un STC vise à offrir un service axé sur la réponse dynamique à un besoin individuel communiqué par l'usager. D'un point de vue opérationnel, le corridor de déplacement du métro et l'horaire préétabli définissent, indépendamment des usagers, complètement son positionnement spatial et temporel, tandis que le STC n'a *a priori* aucune assignation. Cette flexibilité permet d'éviter la circulation des véhicules à vide et

peut être exploitée pour positionner stratégiquement les véhicules sur le réseau afin de répondre, dans un délai de l'ordre de la minute, à la demande individuelle en mobilité exprimée dans le temps et dans l'espace.

Le positionnement préalable des véhicules dans le réseau est fortement dépendant de la capacité à anticiper les demandes individuelles en mobilité. Dans ce contexte, l'article présente le développement d'une nouvelle approche pour déterminer le profil temporel des besoins individuels en déplacement. Contrairement aux techniques statistiques (Davis *et al.*, 1991 ; Rakha *et al.*, 1994) largement appliquées pour les systèmes de transports conventionnels qui présupposent un comportement stochastique du système, l'approche développée ici repose sur le caractère déterministe du besoin individuel en déplacement. En effet, chaque individu, en fonction de ses besoins spécifiques, planifie ses déplacements. Cependant, la diversité et les interactions entre les besoins (Banos, 2001) engendrent des déplacements qui ne sont pas entièrement déterminés. Pour un centre d'activité d'un milieu urbain, l'expression du besoin individuel en mobilité repose sur des variables physiques et humaines difficilement identifiables et dont les interrelations sont complexes. Utilisées dans de nombreuses sciences (Gleick, 1987), l'analyse non-linéaire et la théorie du chaos déterministe permettent d'appréhender et de caractériser le comportement non stochastique des systèmes complexes.

La section I présente l'approche méthodologique associée à l'analyse non-linéaire des séries chronologiques. La section II aborde l'analyse des données en vue

d'identifier la présence d'un comportement chaotique. Sur la base des informations obtenues à la section précédente, la section III présente les résultats de la prévision de l'expression du besoin en mobilité individuelle. Les sections IV et V abordent les éléments de discussion et d'application des résultats.

I. Analyse non-linéaire des séries chronologiques

De façon similaire à l'application de Nair et al. (2001), Frazier *et al.* (2004) et Shang *et al.* (2005) pour les flux de véhicules sur une autoroute, les techniques d'analyse non-linéaire associées aux phénomènes chaotiques ont été appliquées à des séries chronologiques de flux. Pour un centre d'activité en milieu urbain, le besoin en mobilité pour chaque individu s'exprime lorsqu'il quitte ce lieu. Pour l'étude, le moment, avec une précision à la seconde, auquel chaque personne a franchi la porte de sortie a été relevé, durant les heures d'ouverture d'un édifice public de la Ville de Montréal au cours de la saison estivale. Le relevé des heures de sortie permet de constituer la série chronologique de l'expression individuelle de la demande en déplacement agrégée sur 2 minutes.

Pour le traitement analytique de la série chronologique, la première étape vise à reconstruire l'espace d'encastrement du système à partir de la série chronologique $\{x_i, i=1,...,N\}$. En appliquant la procédure des retards, le système dynamique peut être reconstruit dans un ensemble de vecteurs :

$$Y(t) = [s(t); s(t+T); s(t+2T); ...; s(t+(d-1)T)] \quad (1)$$

T exprime le retard et **d** la dimension d'encastrement.

La méthode repose sur le théorème de Takens (1981) qui établit que pour une dimension **d** suffisamment grande, la série de vecteur Y(t) reproduit les caractéristiques dynamiques de la série originale $\{x_i\}$. De plus, l'espace d'encastrement est équivalent à l'espace de phase de l'attracteur et que l'évolution de la série chronologique $\{x_i\}$ correspond à la dynamique du système étudié. Ainsi, en définissant la fonction scalaire s(t), il est ainsi possible de décrire le système et d'en étudier les propriétés.

La procédure des retards repose sur la détermination des deux grandeurs, **T** (valeur du retard) et **d** (dimension du système). Le premier minimum de la fonction d'information mutuelle moyenne appliqué à la série chronologique permet de définir graphiquement la valeur du retard **T** (Abarbanel, 1996). Cette fonction calcule, par probabilité, la quantité moyenne d'informations partagées par deux mesures voisines. L'effet de l'introduction d'un retard est de minimiser la corrélation pouvant exister entre des valeurs voisines engendrées par une vitesse d'échantillonnage trop grande.

La dimension d'encastrement **d** est associée à la dimension de l'espace des phases dans lequel l'attracteur correspondant au système étudié est complètement en relief (un point de l'attracteur correspond à un et un seul état du système). La méthode de Cao (1997), en accord avec la procédure des faux plus proches voisins (Arbanel, 1996), permet de déterminer graphiquement la dimension minimum d'encastrement **d** d'un système dynamique défini par une série chronologie.

La méthode utilisée dans cette étude pour définir la présence de chaos est le calcul du spectre de puissance par la transformée de Fourier (équation 2).

$$P(\omega) = \frac{1}{N^2}\left|\sum_{t=0}^{N-1} s(t)(e^{-i(2\pi/N)t\omega})\right|^2 \qquad (2)$$

P(ω) exprime le spectre de puissance, N le nombre de points de la série chronologique, s(t) la fonction scalaire exprimée dans l'espace d'encastrement.

Ce spectre met en évidence soit la présence de pics à des fréquences caractéristiques du système ou de pics irréguliers caractéristiques des systèmes non périodiques. La présence d'un spectre irrégulier est un indice de la présence de propriétés chaotiques.

Cependant, pour éviter que l'apparence d'un comportement chaotique soit due à la présence de bruits dans le signal, la méthode du plus grand exposant de Lyapunov (équation 3) est appliquée à la série chronologique.

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{N\Delta t}\sum_{t=o}^{N-1} \ln\left|\frac{s(t+\Delta t) - s'(t+\Delta t)}{s(t) - s'(t)}\right| \qquad (3)$$

λ_{max} exprime le plus grand exposant de Lyapunov; N, le nombre de points de la série chronologique; s(t), les coordonnées de la série chronologique au temps t exprimée dans l'espace d'encastrement de dimension m; s'(t), les coordonnées d'un point distinct mais proche de s(t); Δt, correspond à la valeur du retard T.

En régime chaotique, deux trajectoires initialement proches tendent à diverger et la distance entre elles à augmenter exponentiellement. L'exposant de Lyapunov correspond ainsi à un indice de divergence/convergence exprimant la sensibilité du système dynamique aux conditions initiales. Mathématiquement, si le plus grand exposant de Lyapunov est positif, alors le système présente les caractéristiques d'un système chaotique.

Contrairement aux systèmes stochastiques, les systèmes chaotiques suivent un comportement déterministe qui permet, dans une certaine mesure, de prévoir leur devenir. La méthode de prévision du comportement du système repose sur l'attracteur dans l'espace des phases de dimension d et le retard T. Sur le principe du modèle local (Abarbanel, 1996), la méthode sélectionne, pour un point initial $y(t_0)$, les *k* plus proches trajectoires sur l'attracteur et les *k* plus proches points de $y(t_0)$, avec un point sur chacune des trajectoires. La moyenne des *k* plus proches voisins correspond au point suivant $y(t_0+dt)$ de la trajectoire projetée. La procédure est répétée en considérant le point projeté comme le nouveau point initial. Cette approche exploite le fait que l'information est contenue dans les données et qu'elle peut être utilisée pour une prévision à court terme.

Les calculs sur les données ont été réalisés avec la famille de fonctions *TSTOOL*, développée par l'institut de physique de l'université de Gőttingen (Allemagne). Ces fonctions *TSTOOL*, spécifiques pour le traitement non-linéaire des séries chronologiques, sont accessibles via le logiciel *Matlab*.

II. Dimension d'encastrement

Sur la base du relevé à la seconde du moment auquel chacune des personnes a franchi la porte, les séries chronologiques, correspondant à l'agrégation du nombre d'individus sur un pas de temps de 2 minutes, ont été construites pour quatre jours d'observations (figure 1).

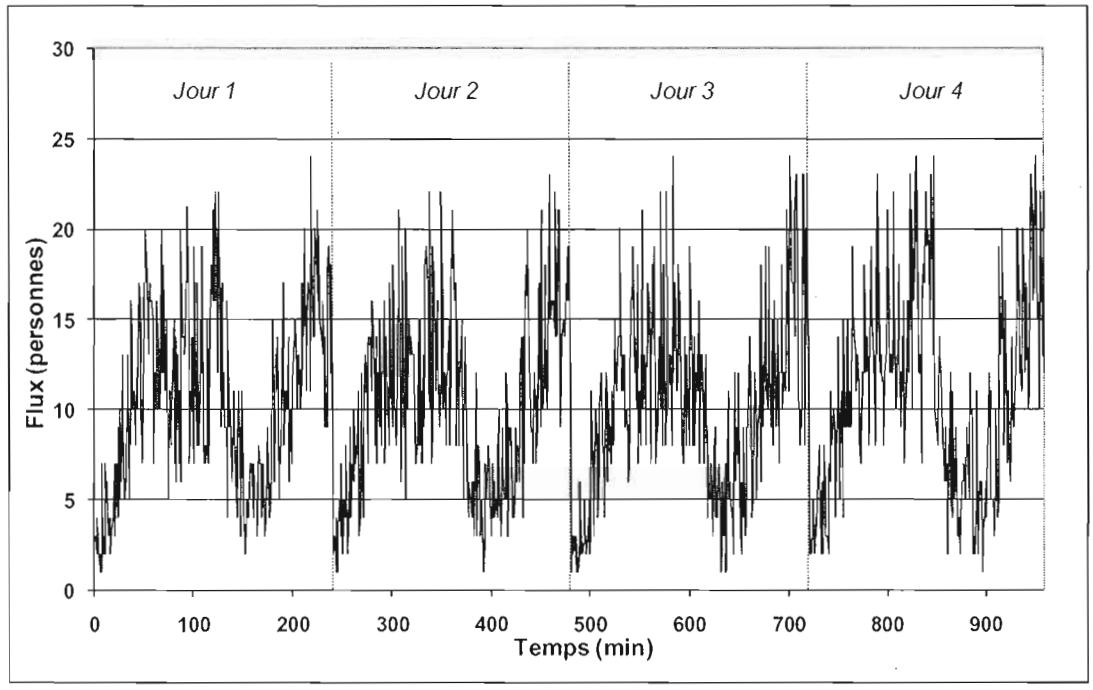


Figure 1 Série chronologique du nombre de personnes qui franchissent la porte par pas de temps de deux minutes durant les 4 jours d'observations.

L'observation de la série chronologique (figure 1) montre qu'il se dégage une certaine périodicité. Celle-ci permet d'envisager un comportement non-aléatoire du système.

Le processus de reconstruction de l'espace d'encastrement repose sur les deux grandeurs **T** (retard) et **d** (dimension d'encastrement). L'application de la fonction « d'information mutuelle moyenne » permet de construire le graphique liant la quantité moyenne d'informations partagée par deux mesures voisines (bits) et la valeur du retard (figure 2).

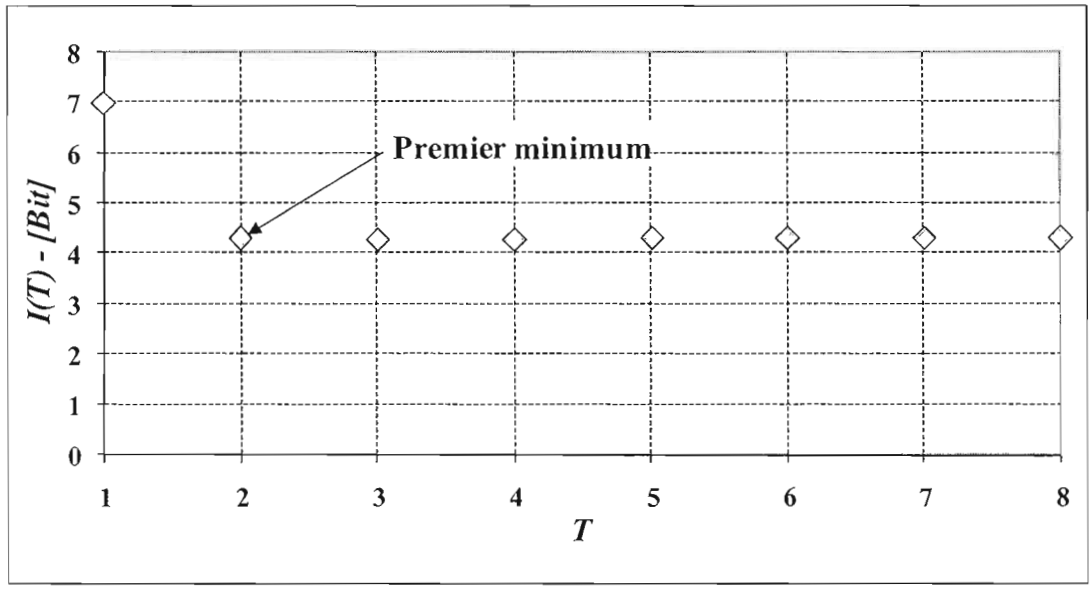


Figure 2 Graphe de l'information mutuelle moyenne entre des valeurs voisines en fonction du retard.

Le premier minimum du graphe de la figure 2 apparaît à 2, ce qui, en tenant compte du temps d'agrégation des données de 2 minutes, correspond à 4 minutes. La figure 3 présente graphiquement l'application de la procédure de Cao à la série chronologique.

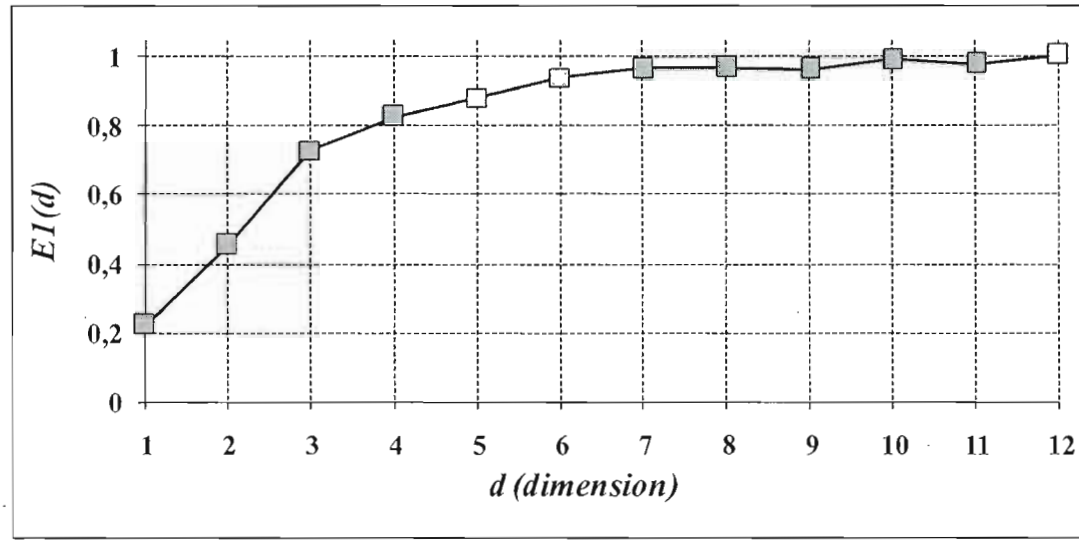


Figure 3 Graphe de la dimension d'encastrement minimum selon la méthode de Cao

La dimension minimum d'encastrement est définie graphiquement par la dimension à partir de laquelle la courbe cesse de croître, en l'occurrence, **d** est égal à 7.

III. Analyse de la présence de chaos

Les figures 4 et 5 présentent respectivement le spectre de puissance par transformée de Fourier (équation 2) et le calcul du plus grand exposant de Lyapunov (équation 3) associés à la série chronologique.

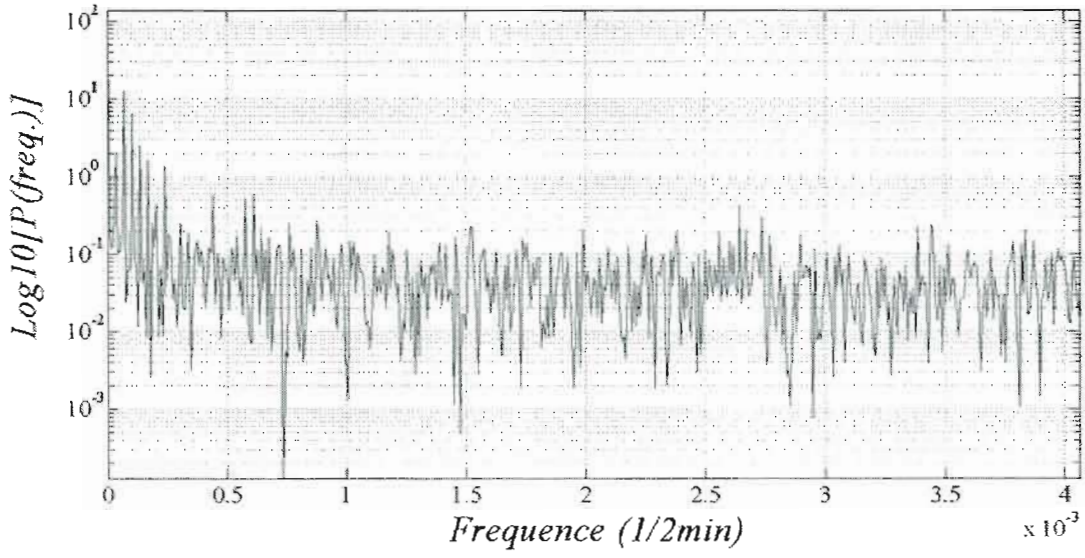


Figure 4 Le spectre de puissance de la série chronologique

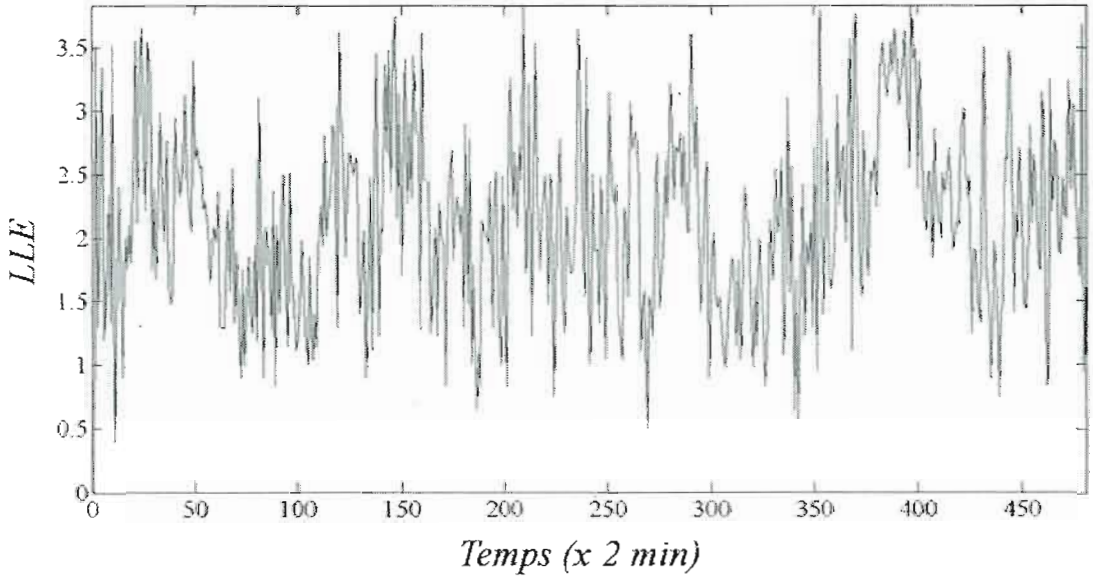


Figure 5 Le plus grand exposant de Lyapunov pour la série chronologique

L'irrégularité du spectre de puissance (figure 4) et la valeur positive (comprise en moyenne entre 1 et 3,5) du plus grand exposant de Lyapunov (figure 5) semblent

montrer que l'expression de la demande en mobilité se comporte similairement à un système chaotique.

IV. Prévision de la demande en mobilité

Au-delà de la présence apparente de chaos, l'intérêt de la démarche associée à un système chaotique réside dans la prévision du comportement du système à partir de l'espace des phases de dimension d. La figure 6 présente la prévision du dernier jour sur la base des données des trois premiers.

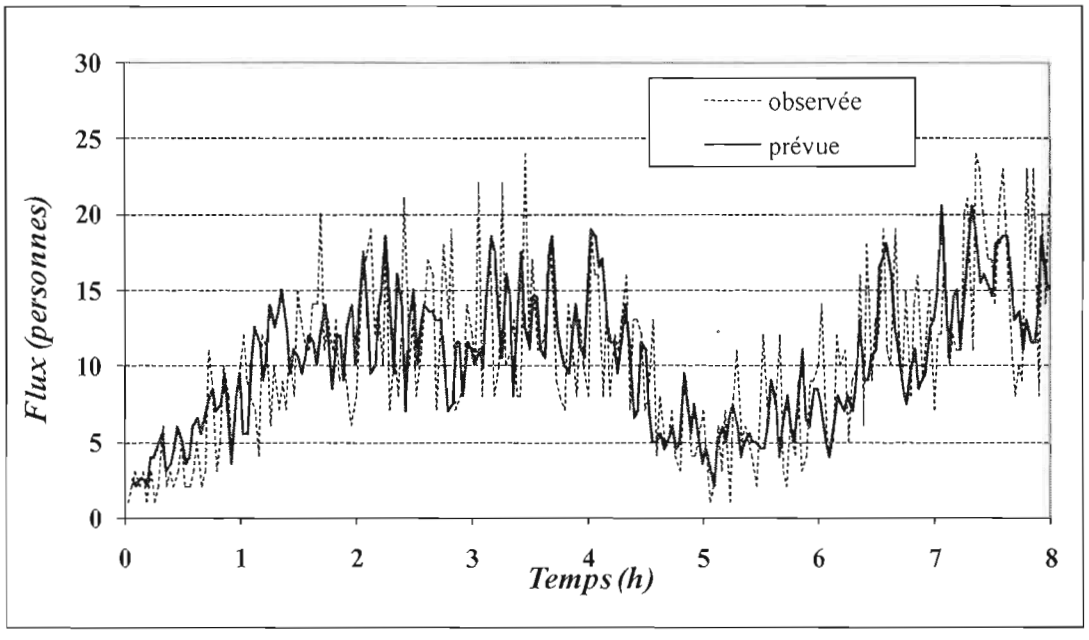


Figure 6 Comparaison des séries chronologiques observée et prévue pour le 4e jour

La figure 6 montre que le comportement général de la série chronologique prévue est similaire à la série observée. Par ailleurs, la prévision du nombre total de personnes prévues sur la journée est supérieure de 8 unités au nombre total

observé. Il apparaît néanmoins des différences significatives sur certains pas de temps. Ces différences résultent de la difficulté de prévoir les « pics » de demandes qui peuvent s'expliquer par la grandeur des données observées qui sont de l'ordre de la dizaine de personnes (par pas de temps de 2 minutes) qui tend à amplifier l'effet des valeurs singulières.

V. Discussion

Les transports en commun conventionnels opèrent selon un horaire construit et des lignes pré-établies ce qui engendrent : des temps d'attente ; des arrêts fréquents aux stations intermédiaires ; des changements de modes de transport pour rejoindre la destination; des déplacements debout et entassés qui sont autant de perceptions négatives de la part des usagers. Par une approche axée sur l'individu qui génère la demande et, dans le même temps, le trajet à parcourir, les STC offrent toute la flexibilité faisant défaut aux transports de masse. Dès lors, il apparaît légitime d'initier une rupture dans l'approche associée à l'expression du besoin en mobilité.

Dédiée aux déplacements par transport en commun conventionnel, l'approche statistique s'applique particulièrement bien au traitement des données issues des enquêtes origine-destination. En revanche, elle ne permet pas d'exprimer et de caractériser la dynamique des besoins individuels où l'état d'équilibre du système besoin-ressource à un temps « t » est dépendant de l'état du système au temps « t-1 ». Ainsi, en mettant en évidence le caractère déterministe de la demande individuelle, il est alors envisageable de structurer dynamiquement la réponse du

système de transport individuel de proximité à l'expression d'un besoin en déplacement dans le temps (propriété d'auto-organisation du système de transport).

Dans la mesure où les véhicules d'un STC n'ont aucune position spatio-temporelle déterminée à l'avance, il existe, *a priori*, plusieurs chemins possibles pour se rendre d'un point à un autre du réseau. Une avenue à envisager pour optimiser leur position, en vue de répondre rapidement à la demande, réside dans l'utilisation des notions de probabilité thermodynamique et d'entropie. Ainsi, l'approche par entropie maximale permettrait de déterminer la distribution des véhicules sur le réseau compte tenu de l'information disponible.

Finalement, indépendamment de l'approche conceptuelle et théorique présentée, un STC tel que la *Serpentine* possède intrinsèquement les caractéristiques structurelles et fonctionnelles pour répondre au besoin individuel en déplacement dans un milieu urbain. Sa mise en œuvre et son opération, en complément aux modes de transports conventionnels en milieu urbain, permettrait d'acquérir en temps réel des valeurs « réelles » aux différents centres d'activités desservis par le système ainsi que les liaisons privilégiées entre les centres. Tenant compte du caractère déterministe de la demande individuelle, ces valeurs faciliteraient la compréhension de la dynamique des besoins et des déplacements en fonction des éléments qui constituent le système global de mobilité.

Conclusion

Par opposition aux transports de masse qui asservissent les usagers au système, un STC est conçu pour répondre aux besoins individuels. L'approche développée, s'inscrit dans la volonté de répondre à cette rupture de fonctionnalité dans le domaine de la mobilité urbaine. Résolument innovante, elle permet de caractériser la demande individuelle, dans un milieu donné, afin d'anticiper le besoin effectif et ainsi maximiser la réponse par l'assignation dynamique d'une position spatiale et temporelle aux véhicules sur le réseau. Plus fondamentalement, la démarche a permis d'appréhender la demande en mobilité comme des événements discrets dont l'apparition dans le temps suit un comportement déterministe. Ce comportement s'inscrit dans un espace d'encastrement à sept dimensions, dont les grandeurs pourraient être ramenées à des paramètres tangibles, et devenir un espace de référence globale pour exprimer la demande en déplacement aux différents pôles d'activités du périmètre étudié. Cette avenue faciliterait la compréhension de l'apport des STC dans l'offre globale en mobilité, seule avenue pour améliorer la part modale du transport en commun.

Références

Abarbanel, H.D.I. 1996. *Analysis of Observed Data*, Spinger-Verlag, New-York.

Banos, A. 2001. *Le lieu, le moment, le mouvement : pour une exploration spatio-temporelle désagrégée de la demande de transport en commun en milieu urbain.* Ph.D. thesis, Université de Franche-Comté, Besançon (France).

Cao, L. 1997. Practical Method for Determining the Minimum Embedding Dimension of a Scalar Time Series. *Physica D* 110:43-50.

Davis, G.A. and Nihan, N.L. 1991. Noparametric regression and short-term freeway traffic forecasting. *Journal of Transportation Engineering*, 177(2):178-88.

Frazier, C. and Kockelman, K.M. 2004. Chaos Theory and Transportation Systems. presented at *83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., January.

Gleick, J. 1989. *Chaos: Making a new science*. Viking Press, New York.

Hilborn, R.C. 2001. *Chaos and Nonlinear Dynamics: An Introduction for Scientists and Engineers*, 2nd Ed., Oxford University Press.

Kantz, H. and Schreiber, T. 1994. *Nonlinear Time Series Analysis.* Cambridge University Press (1994).

Lowson, M. 2003. A New Approach to Effective and Sustainable Urban Transport. *Transportation Research Record* 1838:42-49.

Nair, A.S., Jyh-Charn, L., Laurence, R. and Saurabh, G. 2001. Non-Linear Analysis of Traffic Flow. *Proc. of the 4th International IEEE Conference on ITS*, Oakland, August.

Rakha, H. and Van Aerde, M. 1994. Statistical Analysis of Day-to-Day Variations in Real-Time Traffic Flow Data. *Transportation Research Record* 1510:26-34.

Saugy, B. 2001. The Serpentine – sustainable urban mobility. presented at *The tenth international conference on management of technology*, Lausanne (Switzerland), March 2001.

Szillat, M.T. 2001. *A Low-level PRT Microsimulation*, Ph.D. thesis, Université de Bristol, England (2001).

CHAPITRE III

THÉORIE DE L'ENTROPIE POUR UNE NOUVELLE APPROCHE DE L'ÉTABLISSEMENT DES ITINÉRAIRES D'UN SYSTÈME DE TRANSPORT CYBERNÉTIQUE

Mathias Glaus[1], Jacques Bourgois[2], Robert Hausler[1] et Samir Lasfar[1]

[1] *Ecole de Technologie Supérieure, Département de la construction, STEPPE-ETS, 1100 Notre-Dame O., Montréal, Canada H3C 1K3 and*

[2] *Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Centre SITE, 158 Cours Fauriel, 42023 St-Etienne cedex 2, France.*

La version en anglais de l'article tel que soumis à la revue est en **Annexe B**

Article soumis

Journal of Advanced Transportation 2007

Mots clés : transport urbain, STC, entropie, itinéraire, réseau.

Résumé

Une des propriétés des Systèmes de Transport Cybernétiques (STC) est de permettre aux véhicules d'emprunter l'ensemble des voies de guidages qui composent le réseau afin de déplacer les usagers d'un point à un autre sans arrêt intermédiaire ni transfert. Basé sur cette propriété fonctionnelle et sur le principe d'une gestion centralisée de la flotte de véhicules, cet article présente, à travers un exemple, une approche de sélection des itinéraires des véhicules par le principe du maximum d'entropie. Selon la notion d'équiprobabilité du principe d'entropie, tous les tronçons d'un réseau maillé possèdent, *a priori*, la même probabilité d'être empruntés par un véhicule. En tenant compte des origines et destinations des demandes des usagers, le calcul de la distribution des flux de véhicules sur le réseau par le principe du maximum d'entropie permet d'optimiser la diffusion des véhicules dans le réseau afin d'éviter les risques d'engorgement tout en s'assurant du respect des déplacements individuels.

Introduction

Dans le domaine des réseaux de transport, Tomlin and Tomlin (1968) ont montré que l'entropie de Shannon (Shannon and Weaver, 1948) pouvait jouer un rôle dans la modélisation des flux de véhicules dans un réseau. Le principe du maximum d'entropie développé par Jaynes (1957) a été adapté pour déterminer, *a posteriori*, la distribution normale des voitures sur les différents tronçons d'un réseau routier lorsque l'information disponible ne permet pas de définir l'état du système (Das *et al.*, 2000).

Dans le cas d'un Système de Transport Cybernétique (STC), les véhicules possèdent la capacité d'emprunter toutes les voies de guidage et stations sur un réseau maillé pour répondre efficacement aux besoins des usagers (ATRA, 2003). Cette conception du schéma de déplacement s'apparente au réseau routier. En revanche, à l'échelle du système de transport, la demande d'un véhicule par l'utilisateur permet d'associer, préalablement aux déplacements, une origine et une destination à chaque véhicule. Dans l'optique d'une gestion globale de la flotte de véhicules (Szillat, 2001), l'établissement de l'itinéraire doit se faire non seulement en fonction de la demande (origine et destination) mais également en fonction du taux d'utilisation des différents tronçons.

Selon la notion d'équiprobabilité du principe d'entropie (toutes les routes possèdent, *a priori*, la même chance d'être empruntées), le résultat des flux déterminés par le maximum d'entropie est la distribution qui maximise la diffusion des véhicules sur les différents tronçons qui composent le réseau compte tenu des

contraintes correspondantes à l'information disponible. Dans ce contexte, le présent document présente l'application du principe du maximum d'entropie à la planification des itinéraires de la flotte de véhicules d'un STC. Le développement est basé sur une optimisation de la diffusion des véhicules sur le réseau tenant compte des contraintes associées à la configuration du réseau et de l'information disponible sur les origines et destinations en amont des déplacements.

La section I et II présentent le principe général du maximum d'entropie appliqué à un système ainsi que l'application de la méthode à un réseau routier. La section III présente, à travers un exemple, l'application du principe du maximum d'entropie au choix du trajet à privilégier pour les véhicules d'un STC où, pour chaque destination, les origines sont différenciées. Finalement, les deux dernières sections abordent les éléments de discussion et la contribution majeure de ce travail.

I. Principe du maximum d'entropie

Soit un système composé de N éléments (molécules d'un gaz, cellules d'un organisme, etc.) pouvant appartenir à n classes et N_i (i=1, 2, ..., n) représentant le nombre d'éléments de la classe i, l'état macroscopique du système est donné par $A_n = \{N_1, N_2, ..., N_n\}$. La distribution des éléments dans les différentes classes possède un niveau de désordre qui peut être évalué par la valeur d'entropie du système:

$$S = -K \sum_{i=1}^{n} N_i \ln N_i \tag{1}$$

K représente la constante de Boltzmann ($1{,}381 * 10^{-23}$ J/K).

Selon le deuxième principe de thermodynamique, qui introduit la notion d'entropie S comme une fonction d'état, un système isolé évolue toujours vers un état de plus grande entropie. Selon l'entropie de Boltzmann (Chakrabarti and De, 1997), l'évolution thermodynamique d'un système vers l'équilibre correspond au passage d'un état initial à un autre état statistiquement plus probable et tous les micro-états possibles menant à un macro-état donné sont équiprobables. Ainsi, la configuration la plus probable d'un système est celle qui offre l'entropie maximale pour le macro-état observé.

Initialement développé par Jaynes (1957) et reposant sur la théorie de l'information de Shannon (1948), le principe de maximum d'entropie est une technique d'optimisation de la distribution des éléments dans un système lorsqu'il y a un manque d'information.

$$S = -\sum_{i=1}^{n} p_i \ln p_i \qquad (2)$$

p_i représente la probabilité qu'un élément de N appartienne à la classe N_i.

Assujetti aux contraintes linéaires :

$$\sum_{i=1}^{n} p_i f_i^{(k)} = f_k \quad (k = 1, 2, ..., m) \qquad (3)$$

f_k est la moyenne pondérée des $f_i^{(k)}$.

$$\sum_{i=1}^{n} p_i = 1 \qquad (4)$$

La méthode des multiplicateurs de Lagrange (Jaynes, 1957) permet de déterminer les p_i par maximisation de l'entropie (relation 2) assujetti aux contraintes (3) et (4).

Dans la relation (2) il n'y a pas de constante similaire à celle de Boltzmann (1). Dans ce cas, l'entropie S est exprimée dans l'unité de mesure de l'information (bits).

La relation (2) peut également être exprimée en termes de N*i* :

$$S = -\sum_{i=1}^{n} N_i \ln N_i \qquad (5)$$

Ce principe a été étendu et largement appliqué dans différents champs des sciences et des technologies (Wilson 1970; Qu *et al.*, 2003, Kapur 1990). En planification du transport, le principe d'entropie maximale a été appliqué plus spécifiquement à l'étape de la distribution des trajets. (Spiess, 1987; Wang *et al.*, 2006).

II. Entropie maximale et réseau routier

Das *et al.* (2000) ont montré que dans le cas de la détermination des flux de voitures dans un réseau routier (*trafic network flow*) la formulation du principe du maximum d'entropie de Jaynes pouvait être adaptée et simplifiée afin d'éviter la procédure de détermination des multiplicateurs de Lagrange.

L'application de la loi des nœuds permet d'exprimer les N_i (i = 1, 2, ..., m) en fonction des N_i (i = m+1, m+2, ..., n) correspondant aux *m-n* variables indépendantes du système. Ainsi, l'équation d'entropie (5) s'exprime de la manière suivante :

$$S = -\sum_{i=m+1}^{n} N_i \ln N_i - \sum_{i=1}^{m} \Phi_i \ln \Phi_i \qquad (6)$$

n est le nombre de classes, *m* le nombre de contraintes du système et Φ_i (*i* = 1, 2, ..., m) la relation exprimant chaque N_i (*i* = 1, 2, ..., m) en fonction des N_i (*i* = m+1, m+2, ..., n).

Pour maximiser l'entropie, l'équation (6) doit satisfaire la condition :

$$\frac{\partial S}{\partial N_j} = 0 \quad (j = m+1, m+2, ..., n) \qquad (7)$$

ce qui permet d'exprimer l'équation (6) sous la forme :

$$N_j \prod_{i=1}^{m} \Phi_i^{(\partial \Phi_i / \partial N_i)} = \exp\left[-\left\{ 1 + \sum_{i}^{m} \frac{\partial \Phi_i}{\partial N_i} \right\} \right] \quad (j = m+1. m+2, ..., n) \qquad (8)$$

La relation (8) correspond à un système de (*n-m*) équations à (*n-m*) inconnues qui peut être résolu pour obtenir, dans un premier temps, les valeurs des N_i (*j* = m+1, m+2, ..., n), puis à l'aide des relations Φ_i (*i* = 1, 2, ..., m), les valeurs des N_i (*i* = 1, 2, ..., m).

Soit un système correspondant à un réseau routier maillé composé de 12 tronçons routiers et 9 croisements (nœuds). L'information disponible est celle associée aux nombres de voitures entrant dans le réseau en A et B et sortant en C et D ainsi que

la direction des routes (figure 1). Par maximisation de l'entropie du système, l'application de la loi des nœuds et la relation (8) permettent de déterminer la distribution la plus probable des véhicules sur chaque tronçon du réseau (figure 2).

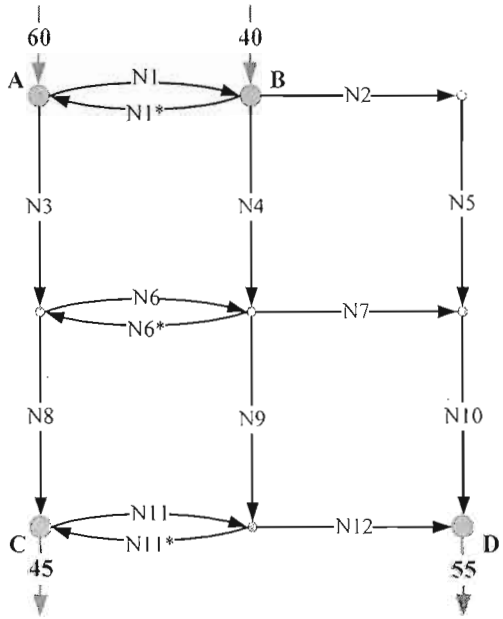


Figure 1 Schéma d'un réseau routier avec deux entrées et deux sorties

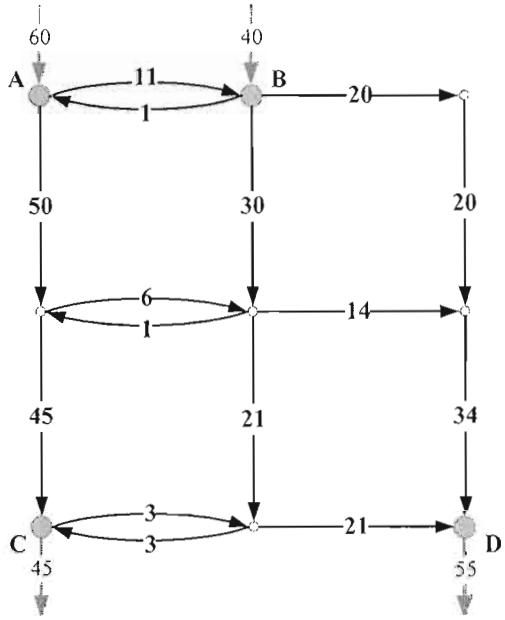


Figure 2 Flux déterminé par la méthode du maximum d'entropie pour un réseau routier

Dans le cas de la distribution des flux de voitures sur les différents tronçons qui composent le réseau routier maillé, aucune information n'est associée à la correspondance entre l'entrée (origine) et la sortie (destination). Autrement dit, pour les voitures sortant aux différents nœuds du réseau (C et D), il y a indifférenciation de l'origine (A et B). Par exemple, les 20 voitures sur le tronçon N_2 peuvent provenir soit entièrement des 40 qui entrent en B, soit en partie des 10 qui viennent du tronçon N_1.

III. Entropie et système de transport cybernétique: étude de cas

Dans le principe opérationnel des STC, il y a, pour chaque destination, différenciation de l'origine. En effet, le système de gestion du STC coordonne la flotte de véhicules en fonction de la demande individuelle des usagers qui s'exprime en termes de couple origine-destination. Ainsi, les véhicules à un nœud origine du réseau ont une destination assignée. Cette information qui prend la forme d'une matrice O-D, correspond, d'un point de vue mathématique, à des contraintes supplémentaires appliquées au système. Toutefois, cette information additionnelle ne permet pas de définir complètement l'état du système puisque dans un réseau maillé, il existe, pour la majorité des déplacements, plusieurs trajets équivalents qui permettent de répondre aux besoins de déplacement.

Dans la procédure de détermination des flux de véhicules par le maximum d'entropie, la différenciation des origines pour chaque destination (propriété des STC) se traduit, mathématiquement, par l'application de la loi des nœuds à chaque origine prise séparément.

Loi des nœuds :

Pour chacun des *j* nœuds du réseau : $\sum N^{x}_{entrée} = \sum N^{x}_{sortie}$ (9)

x représente l'identification de l'origine. La relation (9) permet de définir un système de (*j***x*) équations, *j* représentant le nombre de nœuds et *x* le nombre d'origines.

Soit, par similitude avec le réseau routier présenté ci-dessus, un réseau de STC composé de 12 routes et 9 croisements avec 2 entrées A et B et 2 sorties C et D. Le principe de différenciation des origines peut être représenté par une décomposition en sous-réseaux superposables spécifiques à chaque origine (figure 3).

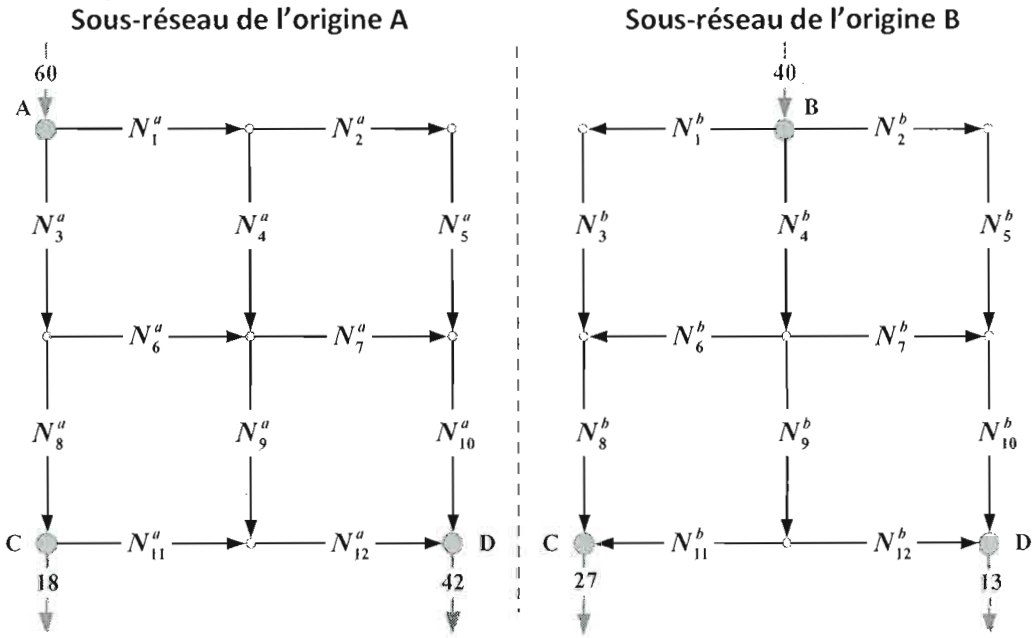


Figure 3 Décomposition du système en sous-réseaux associés à l'origine

En appliquant la loi des nœuds, chaque sous-système, qui comporte 12 inconnues et 8 contraintes, peut s'exprimer par un système de 8 équations indépendantes (Φ_i) en fonction de 4 variables. En fixant les 4 variables : $N_1; N_4; N_7; N_{11}$, les systèmes d'équations Φ_i^a et Φ_i^b s'expriment de la manière suivante :

$$
\begin{aligned}
N_2^a &= N_1^a - N_4^a & N_2^b &= 40 - N_1^b - N_4^b \\
N_3^a &= 60 - N_1^a & N_3^b &= N_1^b \\
N_5^a &= N_1^a - N_4^a & N_5^b &= 40 - N_1^b - N_4^b \\
N_6^a &= 60 - 18 - N_1^a - N_{11}^a & N_6^b &= 27 - N_1^b - N_{11}^b \\
N_8^a &= 18 + N_{11}^a & N_8^b &= 27 - N_{11}^b \\
N_9^a &= 42 - N_1^a + N_4^a - N_7^a - N_{11}^a & N_9^b &= 13 - 40 + N_1^b + N_4^b - N_7^b + N_{11}^b \\
N_{10}^a &= N_1^a - N_4^a + N_7^a & N_{10}^b &= 40 - N_1^b - N_4^b + N_7^b \\
N_{12}^a &= 42 - N_1^a + N_4^a - N_7^a & N_{12}^b &= 13 - 40 + N_1^b + N_4^b - N_7^b
\end{aligned}
\tag{10}
$$

<u>*Maximum d'entropie*</u> :

La fonction du maximum d'entropie (6) est une relation pour laquelle le principe de superposition ne s'applique pas : $\max S^A + \max S^B \neq \max S^{système}$. Pour calculer $\max S^{système}$, il est nécessaire de considérer le nombre de véhicules circulant dans le même sens sur un tronçon du réseau global. Cela revient à considérer les sommes des véhicules circulant sur chaque tronçon ($N_i^{a,b}$) comme variables permettant de maximiser l'entropie du système global :

$$N_i^{a,b} = N_i^a + N_i^b \qquad (i = 1, 2, \ldots, 12) \tag{11}$$

La réalité physique de la relation (11) tient au fait que les véhicules associés aux différentes origines occupent la même voie de circulation. Par ailleurs, les deux sens de circulation entre les nœuds sont considérés comme indépendants. Cette réalité est illustrée à la figure 4.

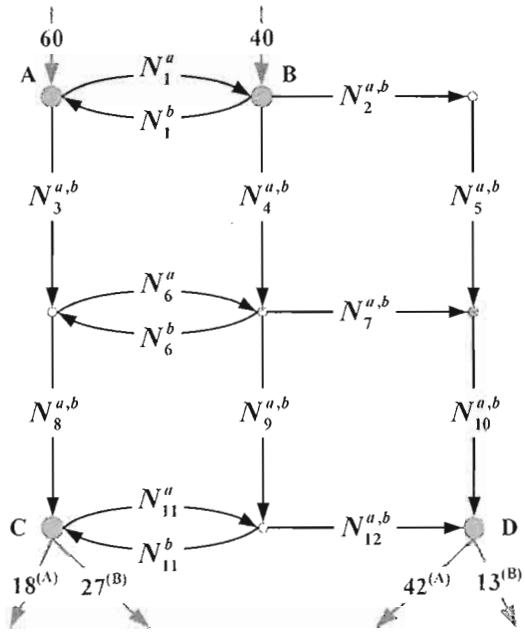


Figure 4 Représentation du système global avec 2 entrées et la différenciation des origines

Tenant compte de (11), Φ_i^a et Φ_i^b (10) permettent d'exprimer les équations indépendantes pour le système global (figure 4) :

$$
\begin{aligned}
N_2^{a,b} &= 40 + N_1^a - N_1^b - N_4^{a,b} \\
N_3^{a,b} &= 60 - N_1^a + N_1^b \\
N_5^{a,b} &= 40 + N_1^a - N_1^b - N_4^{a,b} \\
N_6^a &= 60 - 18 - N_1^a - N_{11}^a \\
N_6^b &= 27 - N_1^b - N_{11}^b \\
N_8^{a,b} &= 18 + 27 + N_{11}^a - N_{11}^b \\
N_9^{a,b} &= 42 + 13 - 40 - N_1^a + N_1^b + N_4^{a,b} - N_7^{a,b} - N_{11}^a + N_{11}^b \\
N_{10}^{a,b} &= 40 - N_1^a - N_1^b - N_4^{a,b} + N_7^{a,b} \\
N_{12}^{a,b} &= 42 + 13 - 40 - N_1^a + N_1^b + N_4^{a,b} - N_7^{a,b}
\end{aligned}
\tag{12}
$$

La relation (8) permet de calculer, dans un premier temps, les valeurs de $N_1^a; N_1^b; N_4^{a,b}; N_7^{a,b}; N_{11}^a; N_{11}^b$ selon le principe du maximum d'entropie pour le réseau global. Les autres inconnues sont déterminées à l'aide des relations (12). Les charges calculées par tronçon sont illustrées à la figure 5. Les tronçons en pointillés identifient ceux dont la charge des tronçons des sous-réseaux est déterminée. Les résultats présentés à la figure 5 correspondent, selon le principe du maximum d'entropie, à la distribution des véhicules sur les différents tronçons qui forment le réseau global. À cette étape, en comparant les résultats de la figure 5 avec ceux illustrés à la figure 2 pour les voitures, bien que les valeurs globales en entrée (A et B) et en sortie (C et D) soient identiques, il apparaît que la différenciation des origines pour chaque destination à un effet sur la distribution des véhicules le long du réseau.

À cette étape, il y a une partie des tronçons pour lesquels l'origine des véhicules est indéterminée (traits continus sur la figure 5). Pour cette partie du réseau où la charge des tronçons des sous-réseaux n'est pas déterminée, le principe du maximum d'entropie peut être appliqué pour déterminer la distribution la plus probable. Le sous-système étudié est illustré à la figure 6.

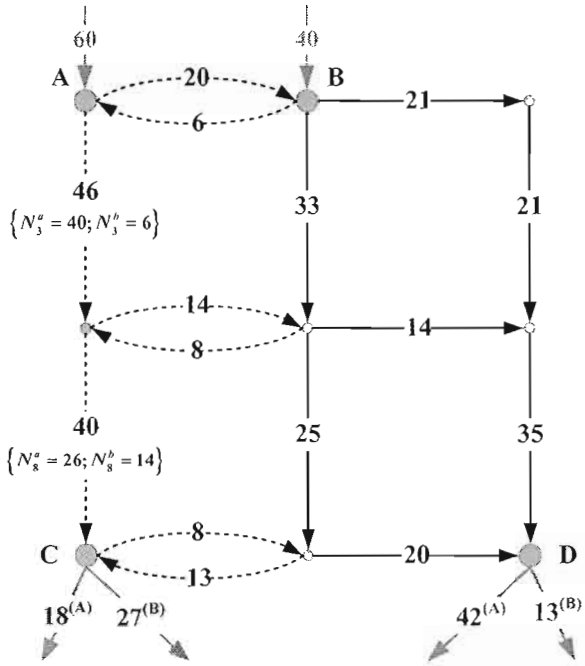


Figure 5 Résultats des flux calculés par le principe du maximum d'entropie pour le réseau global d'un STC

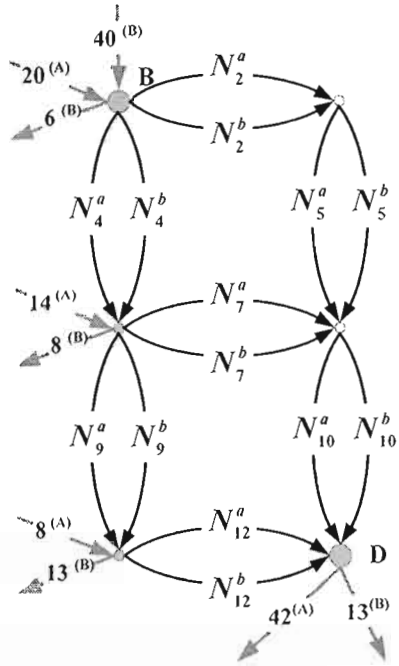


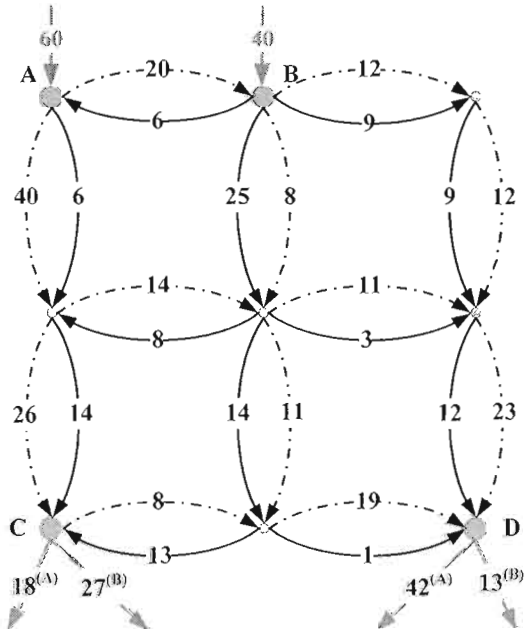
Figure 6 Sous-système pour lequel l'origine des véhicules reste indéterminée

En appliquant la loi des nœuds, le sous-réseau A, qui comporte 7 inconnues et 5 contraintes, peut s'exprimer par un système de 5 équations indépendantes (Φ_i^a) en fonction de 2 variables ($N_4^a; N_7^a$). Les 7 inconnues du sous-réseau B peuvent être exprimées par 7 équations indépendantes (Φ_i^b) en fonction des 2 mêmes variables grâce à la relation (10) qui unit les 2 sous-réseaux et assure le respect des valeurs de distribution obtenues pour le système global. Ces informations permettent de définir les équations indépendantes pour le sous-système de la figure 6.

$$
\left.\begin{aligned}
N_2^a &= 20 - N_4^a \\
N_5^a &= 20 - N_4^a \\
N_9^a &= 14 + N_4^a - N_7^a \\
N_{10}^a &= 20 - N_4^a + N_7^a \\
N_{12}^a &= 14 + 8 + N_4^a - N_7^a
\end{aligned}\right\} \Phi_i^a
$$

$$
\left.\begin{aligned}
N_2^b &= 21 - (20 - N_4^a) \\
N_4^b &= 33 - N_4^a \\
N_5^b &= 21 - (20 - N_4^a) \\
N_7^b &= 14 - N_7^a \\
N_9^b &= 25 - (14 + N_4^a - N_7^a) \\
N_{10}^b &= 35 - (20 - N_4^a + N_7^a) \\
N_{12}^b &= 20 - (14 + 8 + N_4^a - N_7^a)
\end{aligned}\right\} \Phi_i^b \qquad (13)
$$

L'application de la relation (8) permet de calculer les valeurs des 2 variables $N_4^a; N_7^a$ et, grâce aux relations (13) de déterminer l'ensemble des inconnues du sous-système. La figure 7 présente les résultats pour l'ensemble du réseau.



Sous-réseau A *(traits discontinus)*	Sous-réseau B *(traits continus)*
$N_1^a = 20$	$N_1^b = 6$
$N_2^a = 12$	$N_2^b = 9$
$N_3^a = 40$	$N_3^b = 6$
$N_4^a = 8$	$N_4^b = 25$
$N_5^a = 12$	$N_5^b = 9$
$N_6^a = 14$	$N_6^b = 8$
$N_7^a = 11$	$N_7^b = 3$
$N_8^a = 26$	$N_8^b = 14$
$N_9^a = 11$	$N_9^b = 14$
$N_{10}^a = 23$	$N_{10}^b = 12$
$N_{11}^a = 8$	$N_{11}^b = 13$
$N_{12}^a = 19$	$N_{12}^b = 1$

Figure 7 Distribution des véhicules en fonction des origines maximisant l'entropie du réseau

Le découpage des charges sur les tronçons en fonction de l'origine permet d'identifier le nombre de véhicules qui empruntent les différents itinéraires pour se rendre d'une origine à une destination. Ainsi, la figure 8 illustre la répartition des véhicules entre les différents itinéraires en fonction des contraintes imposées par les différentes entrées et sorties dans le réseau.

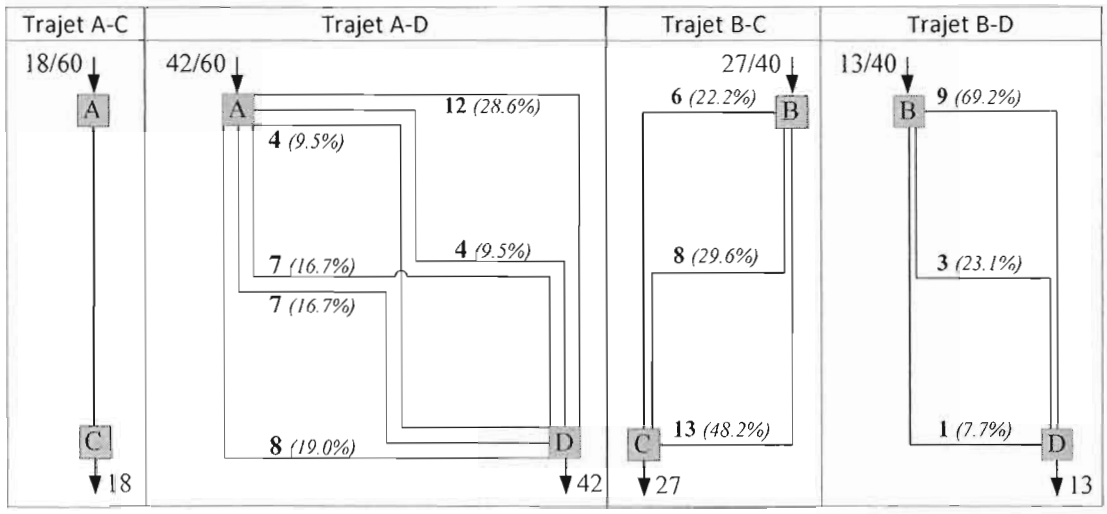


Figure 8 Répartition des véhicules entre les différents itinéraires

La figure 8 démontre que la répartition des véhicules sur les différents itinéraires n'est pas proportionnellement distribuée. Ainsi, le nombre de véhicule pour chaque itinéraire est dépendant du partage des tronçons qui le composent avec les autres itinéraires du réseau.

IV. Discussion

La démarche qui a été présentée sur un réseau de 12 tronçons et 9 nœuds avec 2 entrées et 2 sorties peut être généralisée à tout réseau maillé. En effet, la solution pour un réseau peut être obtenue selon les 5 étapes suivantes :

1re étape : Application de la loi des nœuds pour chaque entrée prise séparément (relation 9);

2e étape : Transformation des relations qui découlent de la première étape de manière à exprimer l'ensemble des inconnues en fonction des variables indépendantes (relation 10).

3e étape : Sommation, pour chaque tronçon, des variables exprimant les flux de véhicules circulant dans le même sens. Cela permet de définir de nouvelles variables (relations 11 et 12).

4e étape : Maximisation de l'entropie du système global en utilisant les nouvelles variables définies à l'étape précédente (relation 8, figure 5).

5e étape : Dans le cas où le système d'équations final est hyperstatique, les indéterminations sont levées en appliquant le principe du maximum d'entropie pour déterminer les flux sur les différents tronçons relatifs à chaque origine (relation 13, figure 7).

Dans le cas des déplacements en voiture, l'automobiliste choisit son trajet en fonction du chemin qu'il perçoit comme le plus rapide (Daganzo, 1977) pour rejoindre sa destination tout en étant tributaire des phénomènes d'engorgements. Dans ces conditions, l'équilibre sur le réseau se fait *a posteriori* des événements de congestion par une information transmise en amont du réseau (file de véhicules à

l'arrêt, panneau d'information, radio, etc.). Dans le cas des STC, l'itinéraire de chaque véhicule est attribué par le système. Ainsi, la capacité d'associer une origine à une destination pour l'ensemble des véhicules dès la demande des usagers permet d'optimiser la gestion des flux dans le réseau. Ainsi, la modélisation des flux par le principe d'entropie maximale permet d'établir les itinéraires des véhicules qui répondent non seulement à la demande individuelle en déplacement mais également à l'équilibre du système et la fluidité du réseau.

La démarche a été présentée sur un exemple de réseau théorique pour lequel les différents itinéraires permettant de se déplacer d'un point à un autre du réseau étaient de même longueur et donc de même durée. Dans le cas d'un réseau de transport en milieu urbain les distances selon l'itinéraire peuvent varier sensiblement. Dans ce cas il serait intéressant d'évaluer l'écart acceptable pour considérer 2 itinéraires comme similaires d'un point de vue qualité de service auprès des usagers.

Conclusion

Le travail présenté dans ce document a montré que les réseaux de STC ne sont pas un cas particulier des réseaux routiers. En effet, bien que le schéma de déplacement en réseau des STC soit similaire à celui de l'automobile, l'approche du maximum d'entropie appliquée aux réseaux routiers doit être adaptée aux spécificités opérationnelles des STC. Ainsi, le principe du maximum d'entropie a permis de développer une approche appliquée à l'établissement des itinéraires des véhicules d'un STC basée sur la diffusion optimale de ceux-ci dans un réseau, sous

contrainte du respect des déplacements individuels (origine-destination). Cette approche correspond parfaitement au contexte de la mobilité des individus en milieu urbain, et en particulier au centre-ville, où les besoins en déplacement sont de type « multiples-multiples » (multiples origines vers de multiples destinations). Dans ce contexte de mobilité, l'approche proposée montre que les STC sont particulièrement bien adaptés pour répondre aux demandes individuelles en déplacement. En effet, ni le transport en commun conventionnel (métro, bus, tramway), dont les véhicules sont captifs d'un corridor de déplacement, ni la voiture, dont le choix de l'itinéraire est individuel, ne peuvent assurer une gestion cohérente de l'ensemble des déplacements individuels. Finalement, l'application de la thermodynamique et, en particulier, du principe d'entropie montre l'intérêt à développer de nouvelles approches en planification des transports basées sur l'équilibre du système tout en considérant les spécificités des éléments qui le composent.

Références

ATRA (2003). *Personal Automated Transportation: Status and Potential of Personal Rapid Transit*. Main Report of the Advanced Transit Association. Palo Alto (California). 37p.

Chakrabarti, C.G. and De, K. 1997. Bolzman-entropy: Generalization and Application. Journal of Biological Physics, 23(3): 163-170

Daganzo, C.F. 1977. Some Statistical Problems in Connection with Traffic Assignment. *Transportation Research*, 11(6):385-389

Das, N.C., Chakrabarti, C.G. and Mazumder, S.K. 2000. Traffic Network and Distribution of Cars: Maximum-Entropy Approach. *Journal of Transportation Engineering*, 126(1):89-92

Jaynes, E.T. 1957. Information Theory and Statistical Mechanics. *Physical Review*, 106(4):620-630.

Kapur, J.N. 1990. *Maximum Entropy Models in Science and Engineering*. Wiley Eastern, New Dehli.

Tomlin, J. A., and Tomlin, S. G. (1968). Traffic distribution and entropy. *Nature,* 220:97–99.

Shannon, C.F. 1948. Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27:379–423,623-656.

Spiess, H. 1987. A Maximum Likelihood Model for Estimatings Origin-Destination Matrices. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 21(5):395-412.

Szillat, M.T. 2001. *A Low-level PRT Microsimulation*, Ph.D. thesis, University of Bristol, England (2001).

Wang, D.H., Yao, R.H. and Jing, C. 2006. Entropy Models of Trip Distribution. *Journal of Urban Planning and Development*, 132(1): 29-35

Wilson, A.G. 1970. *Entropy in Urban and Regional Modelling*. Pion, London.

CHAPITRE IV

APPLICATION DES PRINCIPES THERMODYNAMIQUES À LA CONFIGURATION DES VÉHICULES DANS UN RÉSEAU STC

Mathias Glaus[1], Robert Hausler[1], Jacques Bourgois[2] and Samir Lasfar[1]

[1] *Ecole de Technologie Supérieure, Département de la construction, STEPPE-ETS, 1100 Notre-Dame O., Montréal, Canada H3C 1K3 and*

[2] *Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Centre SITE, 158 Cours Fauriel, 42023 St-Etienne cedex 2, France.*

La version en anglais de l'article tel que soumis à la revue est en **Annexe C**

Article soumis

Journal of Advanced Transportation 2007

Mots clés : véhicule, réseau, thermodynamique, enthalpie, entropie, mobilité, satisfaction.

Résumé

Les systèmes naturels s'adaptent aux changements en évoluant vers un nouvel état d'équilibre tout en minimisant les énergies mises en jeu. Par analogie, la configuration des véhicules dans un réseau STC se modifie en fonction des demandes et évolue vers un nouvel état d'équilibre apte à satisfaire le besoin en déplacement. Basé sur cette analogie, l'article étudie, par un raisonnement déductif, la transposition des principes thermodynamiques aux STC. Selon la démarche proposée, l'enthalpie et l'entropie permettent d'expliciter la relation entre le besoin en déplacement et l'état du système. Par ailleurs, la thermodynamique explicite le principe d'une configuration des véhicules dans le réseau basée sur des critères caractérisant l'état du système dans sa globalité plutôt que sur le traitement individuel des demandes fondé sur des critères de proximité et de distances à parcourir. Dans une perspective plus générale de la mobilité urbaine, la démarche permet également d'expliciter le choix privilégié de la voiture par rapport aux modes de transports en commun conventionnels.

Introduction

De par ses caractéristiques fonctionnelles, un système de transport cybernétique (STC) offre, d'un point de vue opérationnel, une très grande flexibilité. Dans un réseau maillé de voies de guidage, n'importe quel itinéraire peut être assigné aux véhicules pour assurer de manière efficace le déplacement des usagers (ATRA, 2003). Une des particularités des STC résulte dans la capacité à allouer *a priori* n'importe quel véhicule libre à une demande qui est faite en un lieu et à un moment donné. L'approche la plus logique est d'assigner le véhicule libre le plus proche de chacune des demandes successives. Cependant, la résultante de ce mode opératoire est un débalancement potentiel de la disposition des véhicules dans le réseau lorsque le bilan départ-arrivée pour chacune des stations n'est pas à l'équilibre. Il apparaît donc nécessaire de redistribuer les véhicules libres vers les stations de départs des trajets de façon à minimiser les temps d'attentes des futures demandes aux différentes stations localisées sur le réseau (Andréasson, 1997; Andréasson, 2003).

Le présent document présente l'application des principes de la thermodynamique classique des processus naturels pour une meilleure compréhension du système de mobilité des personnes. Appliquée aux STC, la démarche repose fondamentalement sur l'aptitude des systèmes naturels à s'adapter aux changements en évoluant ou en se transformant pour atteindre un nouvel état d'équilibre tout en minimisant les énergies mises en jeu. La section I présente les principes de la thermodynamique classique appliqués aux systèmes naturels. La section II présente, par raisonnement déductif, la transposition de ces principes à

un STC. Finalement, la section III aborde la contribution de ce travail non seulement sur la compréhension du système de mobilité mais également dans une perspective plus générale de satisfaction du besoin en déplacement des personnes.

I. Principes théoriques

La thermodynamique étudie et décrit, à l'échelle macroscopique, l'évolution ou les transformations de la matière ou de l'énergie des systèmes en considérant des variations entre des états du système (Kestin, 1979). Chaque système est défini par les variables décrivant son état comme par exemple: n (nombre d'unités dans le système), P (pression), V (volume), T (Température).

Premier principe : enthalpie

Selon le premier principe thermodynamique, l'énergie interne U d'un système isolé (sans échange avec l'extérieur) peut se transformer mais reste constante. Selon ce principe, la variation d'énergie interne du système (ΔU) entre deux états de celui-ci découle des variations de la chaleur (ΔQ) et du travail (ΔW) fournis par l'extérieur. Considérant le système à pression constante, la variation du travail (ΔW) est égale au produit de la pression par la variation de volume (P*ΔV). Ainsi, la variation de l'énergie interne s'exprime selon la relation (1).

$$\Delta U = Q - P\Delta V \qquad (1)$$

L'enthalpie (H), qui est une fonction d'état, se définit comme la somme de l'énergie interne (U) avec le produit de la pression et du volume (P*V). À pression constante, la variation d'enthalpie se formule selon la relation (2).

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V \qquad (2)$$

La somme des relations (1) et (2) permet d'écrire la relation (3) qui exprime que la variation d'enthalpie (ΔH) est de même valeur que la variation de chaleur fournie au système par l'extérieur (Q).

$$\Delta H = Q \qquad \text{(exprimé en Joule)} \qquad (3)$$

Si la variation d'enthalpie entre deux états du système est positive, la transformation est dite endothermique, dans le cas contraire elle est exothermique. Dans la plupart des systèmes naturels, la pression est généralement considérée constante et l'enthalpie est l'un des paramètres principaux caractérisant les phénomènes.

Deuxième principe : entropie

L'entropie (S) mesure le degré de désordre d'un système macroscopique. Selon ce principe, un système évolue naturellement vers un état de plus grande entropie. Selon l'entropie de Boltzmann (Chakrabarti and De, 1997), l'évolution thermodynamique d'un système vers l'équilibre correspond au passage d'un état initial à un autre état, statistiquement plus probable, et tous les micro-états possibles menant à un macro-état donné sont équiprobables. Ainsi, la configuration la plus probable d'un système est celle qui offre l'entropie maximale pour le macro-état observé.

$$S = k \log W \tag{4}$$

W représente le nombre d'états microscopiques possibles du système (nombre de complexions ou de configurations) et k représente la constante de Boltzmann ($1{,}381*10^{-23}$ J/K).

Pour un système composé de N éléments (molécules d'un gaz, cellules d'un organisme, etc.) pouvant appartenir à n classes et Ni (i=1,2, ..., n) représentant le nombre d'éléments de la classe i, l'état macroscopique du système est donné par An = {N1, N2, ..., Nn}. La distribution des éléments dans les différentes classes possède un niveau de désordre qui peut être évalué par la valeur d'entropie du système selon la relation (5).

$$S = -K \sum_{i=1}^{n} N_i \ln N_i \tag{5}$$

Entre deux états successifs du système, la transformation se produit (transformation spontanée) si la variation d'entropie (ΔS) est supérieure à zéro. La relation entre les variations d'entropie et d'enthalpie s'exprime alors selon la relation (6).

$$\Delta S_{système} > \frac{\Delta H}{T} \qquad \text{(exprimé en J/K)} \tag{6}$$

T correspond à la température en degré Kelvin (K).

Lorsque la transformation est réversible, les changements se produisent en passant par une succession d'états du système à l'équilibre quasistatique (transformation sans phénomène dissipatif de chaleur). Dans le cas d'une transformation réversible, la variation d'entropie (ΔS) est proportionnelle à la variation d'enthalpie (ΔH) selon la relation (7).

$$\Delta S_{système} = \frac{\Delta H}{T} \qquad \text{(exprimé en J/K)} \qquad (7)$$

Dans le cadre de processus réversibles, la relation entre les deux grandeurs ΔH et ΔS permet de prévoir leur sens naturel de la transformation. Cette relation s'exprime sous la forme de l'énergie libre de Gibbs (ΔG) selon la relation (8).

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \qquad \text{(exprimé en J)} \qquad (8)$$

Lorsque ΔG est inférieur à zéro, la transformation à lieu dans le sens prévu. Pour une valeur égale à zéro, le système est à l'équilibre et la relation (8) est similaire à la relation (7). Si la valeur de ΔG est supérieure à zéro, le sens du processus est naturellement l'inverse de celui choisi.

Troisième principe

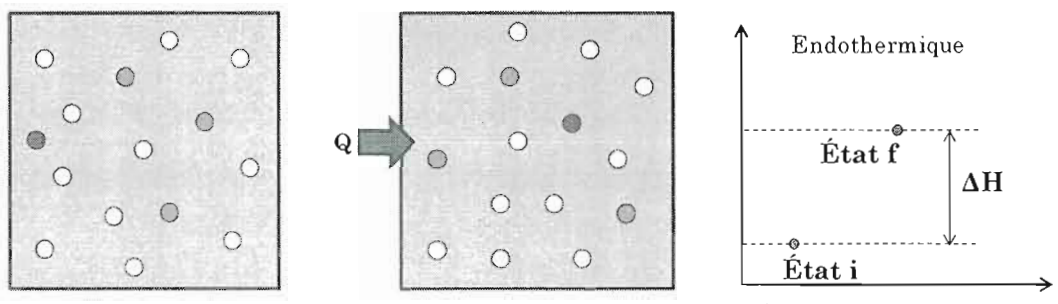
Lorsque la température d'un système tend vers zéro degré Kelvin, son entropie devient nulle. L'interprétation à l'échelle microscopique repose sur le rôle de la température comme facteur d'agitation des particules. L'absence de mouvement

des particules dans le système implique que le nombre de configurations possibles W (relation 4) tend vers 1, donc S tend vers 0.

II. Transposition des principes thermodynamiques à un STC

Tout comme la thermodynamique, la démarche proposée repose sur un raisonnement déductif appliqué à la transposition de ses principes à un système de transport cybernétique. Le système considéré correspond au périmètre urbain desservi par le STC dont les états reposent sur les configurations successives des véhicules dans le réseau suite à des échanges avec l'extérieur. Par analogie avec un système formé de molécules dans un volume donné, sans énergie transmise par l'extérieur, la configuration correspond à un état à l'équilibre pour lequel les véhicules sont répartis dans le réseau (figure 1a).

Le besoin en déplacement qui s'exprime par la demande d'un véhicule correspond à l'énergie extérieure transmise au système. Par analogie avec le premier principe, ce besoin en déplacement exprimé par la demande est la chaleur fournie (Q) (figure 1b). Selon la relation (3), cette énergie fournie correspond à la variation d'enthalpie (ΔH) du système entre les configurations initiale et finale du système (figure 1c). En consommant cette énergie, la transformation est endothermique.



(a) Configuration des véhicules dans le réseau à l'état d'équilibre

(b) Expression du besoin en déplacement sous forme d'énergie Q transmise au système

(c) Principe d'enthalpie entre deux configurations des véhicules dans le réseau

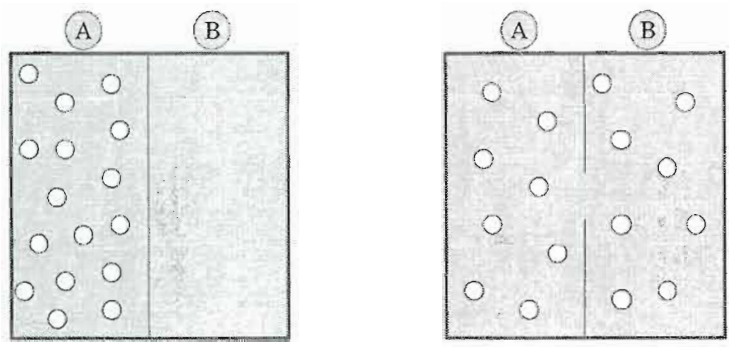
Figure 1 Principe d'enthalpie associée à la transformation du système suite à un apport exterieur d'énergie

Selon la figure 1c, une transformation d'une configuration initiale (i) vers une configuration finale (f), correspondant à la demande en déplacement de l'usager, ne peut se faire que si ΔH (soit Q) est suffisante ou, autrement dit, si l'état du système peut satisfaire le besoin.

Pour un réseau donné (localisation des stations déterminées), la satisfaction du besoin en déplacement repose sur la qualité du service et en particulier sur la capacité à répondre de façon efficiente à la demande. Cette capacité résulte du positionnement des véhicules dans le réseau. Par déduction, ce concept de redistribution des véhicules obéit au deuxième principe thermodynamique de l'entropie.

Soit un système clos constitué de deux compartiments de volume égal A et B séparés par une paroi. Considérant un état initial où les molécules de gaz sont comprises dans le compartiment A (figure 2a), en pratiquant une ouverture dans la

paroi, les molécules vont naturellement se répartir également entre les volumes A et B pour atteindre un nouvel état d'équilibre (figure 2b).



(a) État d'équilibre initial des molécules contenues dans un volume A

(b) Nouvel état d'équilibre final des molécules réparties entre les volumes A et B

Figure 2 Principe de diffusion des molécules de gaz dans un volume

La répartition homogène des molécules entre les deux volumes repose sur le principe de l'état le plus probable, soit l'état qui peut être réalisé par le plus grand nombre de combinaisons possibles. Pour tout système naturel, cet état est celui qui offre la plus grande stabilité. Selon la relation (4) où W représente le nombre de combinaisons possibles, la répartition la plus stable est celle qui possède l'entropie maximale.

L'expression de l'entropie pour une configuration de véhicules dans le réseau repose sur l'application de la relation 5. La figure 3 présente le calcul de la variation d'entropie (ΔS) engendrée par la satisfaction du besoin en déplacement dans deux cas de figures : sans et avec redistribution des véhicules. Pour le calcul de l'entropie, la constante K est égale à 1.

	(A) Sans redistribution des véhicules		(B) Avec redistribution des véhicules	
	Configuration	Entropie S	Configuration	Entropie S
(1)		S_1= -9,36		S_1= -9,36
(2)		S_2 = - 10,23		S_2= -8,32
	ΔS	- 0,87		+ 1,04

Figure 3 Variation de l'entropie après satisfaction du besoin en déplacement dans le cas « sans » et « avec » redistribution des véhicules.

Dans le cas (A) « sans redistribution des véhicules », la variation de l'entropie est négative (baisse de l'entropie). Selon le second principe, le système ne tend pas vers l'équilibre. Dès lors, la transformation basée sur le respect de l'évolution des systèmes naturels ne devrait pas avoir lieu. Une autre façon d'illustrer cette transformation est de considérer qu'une partie de l'énergie pour satisfaire la demande en déplacement est « consommée » pour maintenir l'organisation des véhicules dans le système.

La conséquence de la baisse d'entropie est que la configuration résultante est moins apte à satisfaire les nouvelles demandes. En effet, pour une nouvelle

demande exprimée à une station sans véhicule, le besoin (Q) doit être plus élevé pour que la transformation ait lieu. Dans le cas (B) « avec redistribution des véhicules », la variation d'entropie est positive. Dans ce cas, la transformation de la configuration des véhicules dans le réseau respecte le principe d'évolution des systèmes naturels. Ainsi, « **naturellement** » les véhicules doivent être redistribués dans le réseau pour augmenter l'entropie. À l'équilibre, la variation d'entropie (ΔS) est égale à 0, correspondant à une distribution optimale des véhicules dans le réseau pour satisfaire le besoin.

Un des effets désiré de la dispersion des véhicules ($\Delta S \geq 0$) est de lutter contre l'engorgement du réseau. Par analogie avec la thermodynamique, le degré d'engorgement du réseau est assimilable à une variable d'état du système au même titre que la température. Pour satisfaire la relation (6) qui établit la relation entre la variation d'entropie (ΔS) et la variation d'enthalpie (ΔH), la relation suivante est appliquée :

$$T = fct\left(\frac{1}{degré\ de\ congestion}\right) \tag{9}$$

Selon la relation (9), lorsque le degré de congestion est faible, il peut y avoir déplacement donc agitation des véhicules ce qui implique, par analogie, une température T élevée. Dans le cas contraire, l'agitation est plus faible et la température T diminue ce qui, selon la relation (6), implique une diminution de la variation d'entropie (ΔS). Lorsque le degré de congestion tend vers l'infini, T tend

vers le zéro absolu. Dans ces conditions, il n'y a plus d'activité dans le réseau et, en conformité avec le troisième principe, l'entropie est nulle.

III. Discussion

Selon la démarche présentée, l'évolution préférentielle du système de véhicules localisés sur le réseau passe par le contrôle des fonctions d'états de la variation de l'énergie libre de Gibbs ($\Delta G \leq 0$) et de la variation d'entropie ($\Delta S \geq 0$). En assurant des valeurs proches de zéro pour ces deux grandeurs, le système s'approche de l'état d'équilibre. Par ailleurs, la variable d'état T, qui est une relation de l'inverse du degré de congestion du réseau, doit être maximisée pour favoriser les transformations du système.

L'apport de l'application des principes thermodynamiques dans la compréhension du système de mobilité repose fondamentalement sur l'identification d'une configuration des véhicules dans le réseau basée sur des critères qui caractérisent l'état du système dans sa globalité plutôt que sur des critères locaux. En effet, l'approche conventionnelle basée uniquement sur les principes de proximité du véhicule par rapport à la demande et du chemin le plus court a tendance, dans les réseaux à fortes concentrations de véhicules, à déséquilibrer le système et engorger le réseau.

Un besoin en déplacement n'est pas lié au coût énergétique mais bien à la satisfaction associée à sa réalisation. En effet, si le choix d'un mode de transport était basé sur des critères énergétiques (ou économiques), les personnes désirant se déplacer en milieu urbain opteraient pour le transport en commun, tel que le

métro, plutôt que pour la voiture individuelle. Dès lors, si la voiture est le mode privilégié, c'est qu'il satisfait mieux le besoin en déplacement. En définissant une énergie du besoin, la démarche peut être ainsi transposée à d'autres modes de transport. Le besoin en déplacement d'une personne est assimilable à une énergie accumulée que cette dernière libère et transmet à son milieu environnant lorsqu'elle décide de se mettre en mouvement. Une partie de cette énergie initiale peut être dépensée en déplacement à pied pour rejoindre une station ainsi que pour attendre un véhicule, diminuant d'autant l'énergie Q qui peut être effectivement transmise au système de transport. En effet, bien que la démarche de la thermodynamique ne dépende pas des aspects temporels, le temps d'attente peut être pris en compte comme une énergie d'insatisfaction qui diminue l'énergie du besoin et rend le système moins apte à satisfaire la demande. Ce raisonnement soutient le principe d'un service porte-à-porte et d'une minimisation du temps d'attente.

Dans une perspective plus générale des systèmes de mobilité, la démarche proposée permet d'expliciter le choix privilégié de la voiture pour les déplacements en ville par rapport aux modes de transports en commun conventionnels. Dans le cas des transports en commun tel que le métro, une grande partie de l'énergie du besoin est « consommée » d'une part, pour rassembler les usagers aux stations le long du corridor de déplacement et, d'autre part, en attente des véhicules. Le système de transport en commun conventionnel va à l'encontre du deuxième principe thermodynamique. Quant à la voiture individuelle, dans un réseau routier non congestionné (valeur de T élevée), c'est d'un point de vue thermodynamique, le mode de transport qui satisfait le mieux le besoin en déplacement. Cependant, la

configuration des véhicules dans le réseau est la résultante de décisions individuelles aucunement basées sur des critères associés à l'état du système. Dès lors, comme c'est souvent le cas en milieu urbain, les états successifs du système engendrent une baisse de l'entropie ($\Delta S<0$) et également une augmentation du degré de congestion (faible valeur de T).

Conclusion

Les modes de transport linéaires comme le métro, le tramway ou le bus dépensent l'énergie du besoin en déplacement à ordonner les usagers le long des corridors de déplacement et ainsi lutter contre le principe d'entropie. Dans le système de transport routier, l'évolution de la configuration des véhicules dans le réseau peut rapidement conduire à une variation d'entropie négative. Dans les deux cas de figures, les usagers doivent exprimer un besoin élevé en déplacement pour compenser la baisse d'entropie. En revanche, les propriétés fonctionnelles d'un STC permettent de répondre aux principes thermodynamiques associés à l'évolution des systèmes naturels qui, à chaque changement, tendent vers un nouvel état d'équilibre du système. Ainsi, en considérant toute demande comme un effet sur le système dans sa totalité, la démarche proposée permet de se libérer d'une approche origine-destination strictement centrée sur le lieu de la demande et associée à un critère du temps de parcours. Finalement, l'application des principes thermodynamiques à la configuration des véhicules dans le réseau montre l'intérêt à développer de nouvelles approches en planification des transports qui intègrent la satisfaction du besoin individuel en déplacement et les propriétés qui définissent l'équilibre du système dans son ensemble.

Références

ATRA 2003. *Personal Automated Transportation: Status and Potential of Personal Rapid Transit*. Main Report of the Advanced Transit Association. Palo Alto (California). 37p.

Andréasson, I. 1997. Quasi-Optimum Redistribution of Empty PRT Vehicles. *6th Conference on Automated People Movers*, Las Vegas, Nevada.

Andrèasson, I. 2003. Reallocation of empty personal rapid transit vehicles en route. *Transportation research record*, 1838:36-41

Chakrabarti, C.G. and De, K. 1997. Bolzman-entropy: Generalization and Application. *Journal of Biological Physics*, 23(3): 163-170.

Kestin, J. 1979. *A course in Thermodynamics*. Taylor & Francis; 1st edition. 617p.

CHAPITRE V

DISCUSSION GÉNÉRALE

Les trois axes développés s'inscrivent dans la perspective d'une meilleure compréhension de la mission d'un système de transport au service de l'usager, à savoir : comprendre la demande, assurer le déplacement et maintenir la cohérence du système. Si chaque volet de ce triptyque satisfait un enjeu associé à la mobilité individuelle, en revanche l'intégration des trois éléments selon une approche systémique répond aux spécificités structurelles et fonctionnelles d'un STC (propriétés d'ensemble). Par ailleurs, les résultats obtenus ont également une portée plus générale sur la mobilité des personnes.

Le chapitre V, discussion générale, aborde dans un premier temps, la portée des trois articles sur la compréhension de la mobilité urbaine et leur intégration dans un modèle comportemental du système de mobilité. La deuxième partie aborde le rôle des STC dans une approche multimodale de la mobilité et de développement des milieux urbains.

5.1 Modèle du système de mobilité

Le modèle, en tant qu'outil de représentation, permet de mettre en évidence les fonctionnalités dynamiques qui d'une part animent le système et, d'autre part en assurent la cohérence. Dans cette perspective, la démarche proposée repose non seulement sur la caractérisation des interrelations qu'entretiennent les sous-systèmes mais également sur les processus opératoires des véhicules dans le réseau qui favorisent une organisation du système apte à répondre à sa finalité, soit satisfaire le besoin individuel en déplacement.

5.1.1 Acquisition des données

L'analyse de la demande sous l'angle des phénomènes chaotiques permet d'établir un modèle du besoin en déplacement pour un centre d'activités et de services. Au-delà de l'intérêt à permettre la prévision, la démarche appliquée a démontré que le besoin n'est pas le fruit du hasard et qu'il peut être appréhendé comme un phénomène naturel tel que le climat. Tout comme pour la météorologie, la qualité de la prévision repose sur l'acquisition de données qui permettent une meilleure compréhension des interrelations entre les variables d'états. Dans le contexte d'un STC, l'acquisition de l'information est directement associée au lieu et à l'heure de la demande qui, contrairement aux modes traditionnels de transport, est une information *sine qua non*, pour initier le déplacement. Ainsi, le traitement des données historiques s'inscrit dans le principe de l'amélioration continue de la prévision et permet de mesurer l'effet d'événements spéciaux ponctuels (festival, congrès, etc.) sur le besoin. Dans ce contexte, les résultats des travaux réalisés sur

l'analyse non-linéaire des séries chronologiques ont montré que trois jours d'historique permettaient d'appréhender le besoin. Ceci dit, tout en étant suffisant, ce nombre de données composant la série semble être nécessaire. En effet, lors des manipulations de la série chronologique, les essais menés sur une série de deux jours ont menés à des résultats peu probants. Dans la perspective de caractériser l'ajustement entre la prévision et l'observation, l'utilisation de l'écart-type n'est pas concluant. Si les écarts relatifs par pas de temps de deux minutes peuvent être importants, en revanche, ils n'engendrent pas de conséquences majeures. En effet, une surévaluation de la demande implique que le véhicule restera en station plus longtemps pour satisfaire une demande ultérieure. À l'inverse, une sous-évaluation de la demande engendre une augmentation des temps d'attente en station de la part des usagers et donc une qualité de service moins grande. En d'autres termes, dans les deux cas de figures, l'utilisation des véhicules n'est tout simplement pas optimale. Dans ce contexte, la dynamique de la demande en déplacement associée à chaque centre d'activités et de services définit la nature des interrelations qu'entretient le sous-système humain avec le sous-système de mobilité STC.

5.1.2 Dynamique du système

Le système de mobilité STC est fondamentalement organisé en fonction d'une finalité : satisfaire le besoin en déplacement des usagers exprimé par la demande. Globalement, le STC est assujetti à la dynamique du besoin en mobilité de chacun des centres d'activités et de services. Pour le STC, la demande des usagers déclenche une modification de son équilibre interne à laquelle il réagit selon le

principe d'homéostasie des systèmes naturels, soit : dédier un véhicule pour répondre à la demande tout en assurant une stabilité de son organisation interne pour optimiser sa capacité à répondre aux prochaines modifications engendrées par les futures demandes. Tel qu'exprimé par la Figure 5.1, la dynamique du système global de mobilité des personnes en STC peut se définir comme deux sous-systèmes distincts en interaction : (1) sous-système humain et (2) sous-système STC.

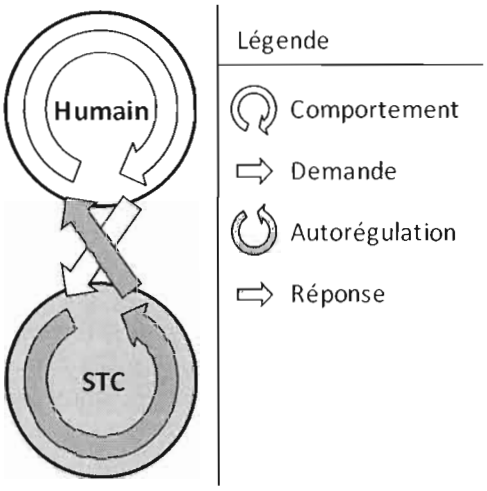


Figure 5.1 Schéma conceptuel de la dynamique usagers-STC

À l'échelle du périmètre urbain desservi par le réseau de transport, le besoin anticipé permet de définir une configuration des véhicules dans le réseau qui serait à même de satisfaire la demande. En d'autres termes, cette configuration anticipée correspond à l'état dans lequel l'offre serait en équilibre avec la demande pour un transfert maximal d'énergie du besoin (minimisation de l'énergie d'insatisfaction associée à l'attente). Ainsi, en considérant le système en configuration initiale réelle lors des demandes en déplacement formulées aux différents centres d'activités, la transformation doit tendre vers la configuration anticipée finale sous contraintes de respecter le déplacement des usagers de leur station de départ vers leur station d'arrivée. Compte-tenu des temps associés aux déplacements, soit le temps nécessaire pour que la transformation ait lieu ainsi que de l'écart qu'il peut exister entre la demande réelle et la demande anticipée, la configuration finale

réelle n'est pas, tout en s'en approchant, dans sa configuration optimale. Cette configuration finale réelle devient la nouvelle configuration initiale réelle et le processus peut se répéter. La Figure 5.2 illustre ce modèle de comportement du système de mobilité qui prend en considération le besoin en déplacement et les configurations successives des véhicules dans le réseau.

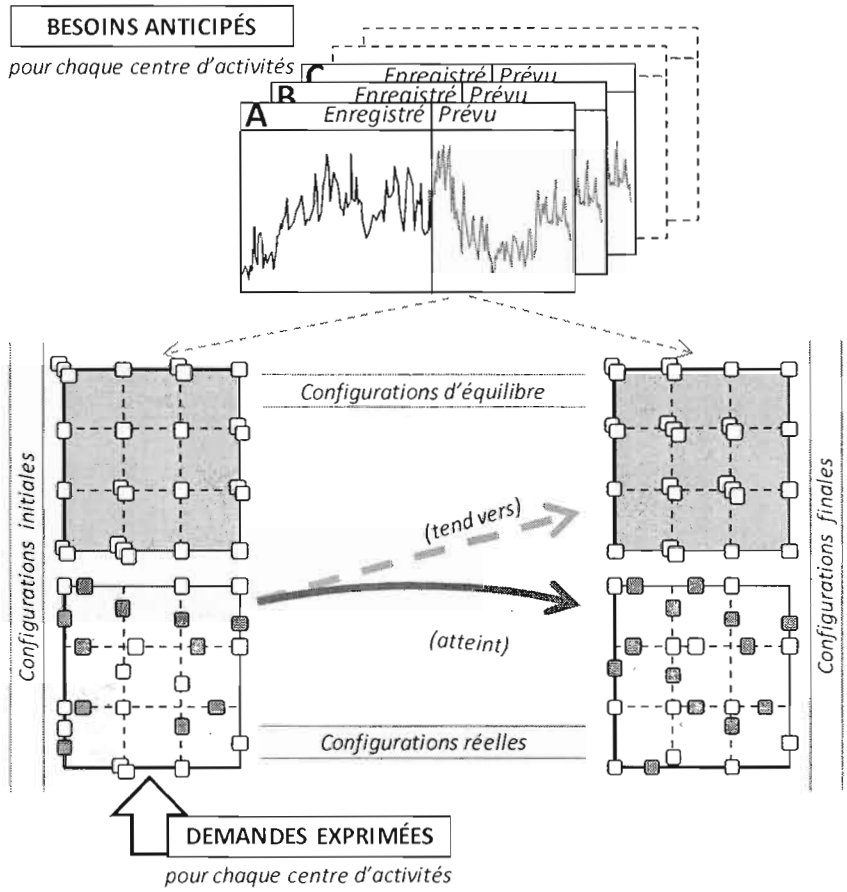


Figure 5.2 Schéma de principe du modèle associé à la dynamique du système de mobilité en STC

Tel qu'illustré schématiquement, les longueurs des tronçons qui composent les différentes mailles du réseau sont équivalentes. Ceci dit, dans un contexte urbain, qui permet rarement un découpage symétrique de son territoire, ce principe de

longueur équivalente revient à définir un « tronçon élémentaire » à partir duquel sont définis les différents tronçons. Dès lors, un « long » tronçon sera composé d'un nombre entier de tronçons élémentaires reliés par des intersections virtuelles auxquelles est appliquée la loi des nœuds. Ainsi l'approche par « tronçon élémentaire » permet de satisfaire la notion d'équiprobabilité du principe d'entropie. Par ailleurs, la définition d'une longueur élémentaire pour les tronçons fixe également un temps élémentaire. L'expérimentation permettrait de déterminer la fraction de la valeur du temps élémentaire correspondant à l'intervalle entre les calculs des états successifs du système.

Le système de mobilité est animé par des principes opératoires qui en assurent la cohérence. Ces principes opératoires s'appliquent aux véhicules en fonction de leur localisation ainsi que de la demande réelle et anticipée.

5.1.3 Principes opératoires

D'un point de vue opérationnalité des véhicules dans le réseau, la transformation de la configuration initiale réelle vers la configuration finale optimale passe par les étapes séquentielles d'attribution d'un véhicule à chaque demande et d'identification des itinéraires des véhicules (Figure 5.3). Selon ce schéma de principe, il existe trois grandes séquences. La première d'entre elles (Figure 5.3, section A) repose sur le besoin individuel en mobilité anticipé pour chaque centre d'activités. Cette prévision permet de positionner les véhicules libres sur le réseau préalablement aux demandes effectives en déplacement. La deuxième séquence du schéma de principe est engendrée par la commande d'un véhicule de la part

d'un usager (Figure 5.3, section B). L'origine de la demande en déplacement, formalisée lors de la commande, permet d'établir la requête sur la base de données afin d'identifier le véhicule à attribuer à la demande.

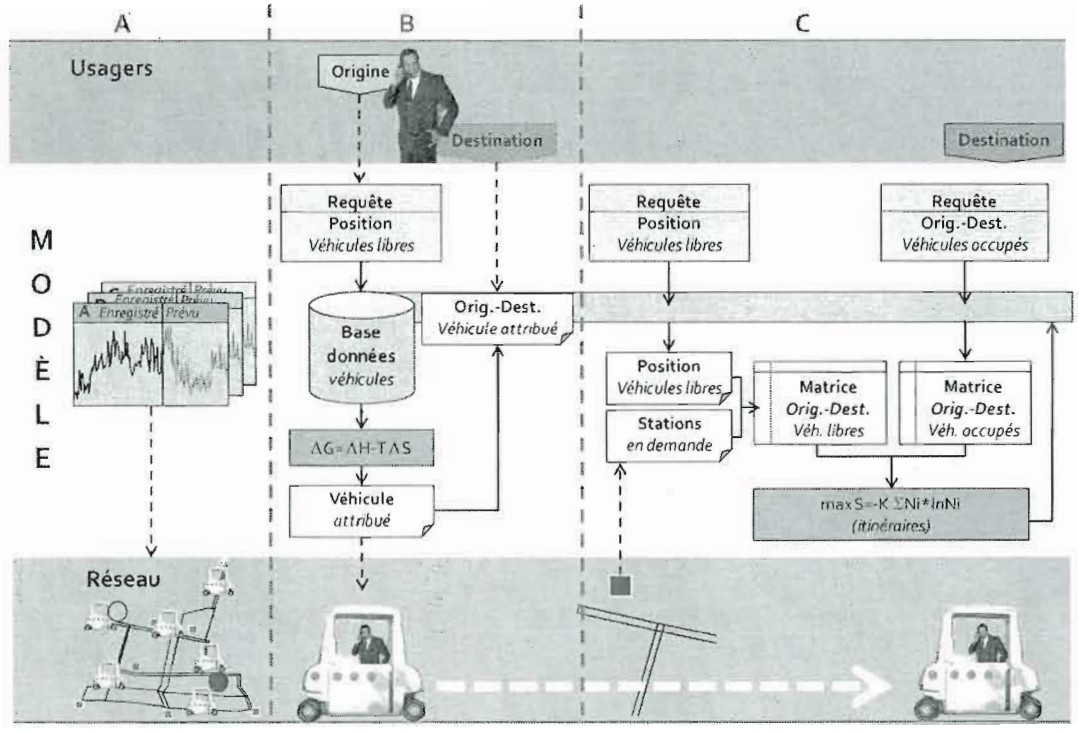


Figure 5.3 Schéma de principe du modèle opératoire d'attribution d'un véhicule à une demande individuelle en déplacement.

Pour l'attribution d'un véhicule à une demande, il y a trois cas : (1) un véhicule libre est en station, l'offre et la demande sont en équilibre ($\Delta G=0$); (2) un véhicule occupé a pour destination la station d'où provient la demande et aucun véhicule libre n'est plus proche ou à égale distance, il sera alors attribué à la demande ($\Delta G<0$); (3) plusieurs véhicules libres sont disponibles; dans ce cas, le véhicule à attribuer à cette demande est celui qui a l'énergie libre de Gibbs la plus basse

(transformation préférentielle) déterminée sur la base de la variation d'enthalpie ΔH (qui peut être ramenée à une énergie proportionnelle à la distance pour atteindre la station) et de la variation d'entropie ΔS dans le réseau. La situation où il y a plus de demandes que de véhicules libres à un instant donné n'est pas un cas de figure à retenir. En effet, dans ce cas, le principe d'attribution doit prendre en considération les véhicules qui vont se libérer à un temps t en un lieu du réseau. Cette particularité des véhicules libres « en devenir » est comprise dans la valeur de la variation d'enthalpie ΔH puisque ces véhicules doivent se déplacer jusqu'à leur destination préalablement à leur mise en disponibilité. Une fois le véhicule sélectionné, il est alors possible de lui attribuer l'origine et la destination de son déplacement sur la base de l'information recueillie lors de la demande de l'usager et d'enregistrer l'information au niveau de la base de données.

La troisième et dernière séquence du schéma de principe repose sur l'identification des itinéraires des véhicules se déplaçant dans le réseau (Figure 5.3, section C). Les itinéraires sont établis pour deux catégories de véhicules : (1) les véhicules libres redistribués des stations avec surplus vers les stations avec déficit pour correspondre à la configuration finale optimale; (2) les véhicules occupés qui doivent conduire les usagers des différentes stations de départ vers leur destination. Dans le cas des véhicules libres, la matrice des origines-destinations est construite à partir des origines des véhicules libres (requête des véhicules libres sur la base de données) et de la liste des stations en demande de véhicules. Par ailleurs, la fonction d'état de la variation d'entropie est intrinsèquement comprise dans la fonction de redistribution des véhicules. Ce postulat s'appuie sur le

raisonnement qu'une station en déficit est une station qui a un nombre limité de véhicules qui s'y rendent et qu'ainsi, les véhicules libres circulent à contre-sens du trafic. Dès lors, l'intérêt de la redistribution des véhicules repose sur la minimisation de la variation d'enthalpie qui peut être associée à une distance parcourue. Dans ce cas, l'identification de la matrice des origines-destinations des véhicules libres repose sur une minimisation des distances parcourues par les véhicules libres redistribués. Ce processus d'optimisation peut être réalisé par application de la méthode simplexe au système linéaire suivant :

$$\boldsymbol{minimiser} \sum_{i,j} a_{ij} x_{ij}$$

a_{ij} représente la distance entre la station en surplus (i) et la station en demande (j);

x_{ij} le nombre de véhicules allant de la station en surplus (i) à la station en déficit (j).

Sous contraintes : $\sum_{j} x_{ij} \leq b_i \quad avec \quad x_{ij} \geq 0$

b_i représente le nombre de véhicules disponibles à la station en surplus (i)

Dans le cas des véhicules occupés, les stations de départ et d'arrivée sont entièrement définies par la demande des usagers (requête des véhicules occupés sur la base de données) ce qui fixe la matrice des origines-destinations de cette catégorie de véhicules. Dès lors, la matrice des stations de départ et des stations d'arrivée de l'ensemble des véhicules qui doivent se déplacer (occupés et libres) est déterminée. Le processus d'identification des itinéraires selon le principe du maximum d'entropie peut être appliqué à l'ensemble de ces véhicules en vue d'atteindre la configuration d'équilibre anticipée.

Du point de vue du système, il appartient de définir la variable T afin de déterminer la relation entre la variation d'enthalpie et la variation d'entropie. La définition de la variable d'état T en fonction d'un degré de congestion du réseau peut se réaliser expérimentalement par simulation de différents scénarios de mobilité en STC pour un milieu urbain particulier. Dans ce cas, différentes fonctions de T peuvent être testées (Figure 5.4) afin de mesurer la meilleure réponse du système de transport, en terme de service aux usagers (temps d'attente, temps de déplacement), lorsque la variation d'entropie ΔS influence le choix du véhicule au détriment de la seule variation d'enthalpie. Dans le processus de sélection des véhicules pour desservir des demandes, la relation exprimée par la courbe [1] de la Figure 5.4 (relativement à la courbe [2]) donne plus de poids à l'état de dispersion des véhicules dans le réseau (ΔS).

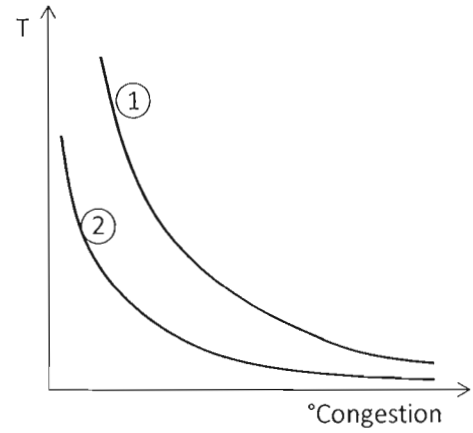


Figure 5.4 Expression de la variable T en fonction du degré de congestion

La dynamique du modèle de mobilité est fondamentalement orientée sur l'adaptation de la configuration des véhicules dans le réseau pour satisfaire au mieux le besoin en déplacement qui s'exprime dans le temps et dans l'espace. Lorsque la répartition des véhicules est quasi-uniforme, la variation d'entropie est proche de 0. Dès lors, le scénario préférentiel est celui qui minimise l'enthalpie ΔH, soit le véhicule le plus proche de la demande. Dans le cas d'une configuration où les véhicules sont mal distribués, le choix peut se porter sur un véhicule plus

éloigné qu'un autre de la demande s'il est situé dans une zone où il y a une forte concentration de véhicules. Dans ce cas, le choix se fait au détriment du temps d'attente mais au bénéfice de l'état général du système.

Dès lors, la flexibilité de la démarche permet de prendre en considération les spécificités du milieu urbain desservi et en particulier la dynamique des entités fonctionnelles qui le constituent. Plus particulièrement, les milieux urbains sont animés par des systèmes de transports existants qui doivent être pris en considération dans une stratégie d'amélioration de la mobilité des personnes.

5.2 STC et multi-modalité

L'approche d'une mobilité des personnes basée sur une offre multimodale vise à ne plus aborder le transport en termes d'opposition de mode : le transport en commun ou la voiture individuelle. Cette approche est sous-jacente aux principes d'un transport durable. Cependant, les initiatives proposées selon ces principes ont un impact négligeable sur la part modale des déplacements en voiture. En effet, que ce soit les modes alternatifs (marche, vélo, etc.) ou les nouveaux transports collectifs tels que le tramway, le train léger et le tram-train, ils ne rejoignent pas les préoccupations et les besoins des utilisateurs de la voiture. Dans le cas des modes alternatifs, ils s'adressent à la catégorie de la population qui non seulement, est physiquement active, mais également qui exerce une activité et un emploi du temps leur permettant de les pratiquer. Par ailleurs, ces modes sont fortement tributaires des conditions météorologiques. En ce qui concerne les nouveaux transports collectifs, ils ne sont finalement qu'une autre forme de transport de

masse décliné sous différentes variantes. Que cela soit le métro, le tramway, le train léger ou le tram-train, leurs différences reposent sur des aspects technico-économiques (emprise sur l'espace urbain et coûts de mise en œuvre) et représentent pour les usagers la même offre en mobilité. Ainsi, l'enjeu d'une offre de mobilité multimodale qui intègre les STC repose sur le décloisonnement des modes de transport pour améliorer l'offre globale en mobilité et en accessibilité aux centres d'activités et de services.

5.2.1 Dispositif par périmètre

L'approche par périmètre vise à intégrer un STC à l'intérieur d'une zone urbaine de forte activité où une importante part des déplacements ont lieu entre les différents centres de services et d'activités qui s'y trouvent. Les périmètres propices à cette approche sont les centres-villes, les zones industrielles, les complexes commerciaux ou encore les pôles de divertissements. Dans ce contexte, la flexibilité du STC répond aux besoins en déplacement de proximité tout au long du séjour à l'intérieur du périmètre.

Le lien avec les transports de masse se réalise naturellement en intégrant la (ou les) station(s) située(s) à l'intérieur ou aux abords du périmètre. De la même façon, la démarche s'applique aux usagers de la voiture en y intégrant les stationnements. Au-delà du raccordement du STC aux différents modes, l'attrait de son intégration dans une zone urbaine repose sur la capacité à optimiser l'opérationnalité du système pour offrir le meilleur scénario de mobilité à l'ensemble des usagers (minimisation de l'énergie mise en jeu et maximisation de l'utilisation des voies).

Fondamentalement, le STC ne représente pas le prolongement du transport de masse (corridor de déplacement) mais bien le moyen de relier entre eux les différents lieux d'activités et de services de la zone desservie (approche réseau). Ainsi, au même titre que les différents lieux d'activités et de services, les stations de métro et les stationnements de voitures sont des lieux générateurs de demandes en déplacement et le besoin peut être anticipé par l'analyse des séries chronologiques. La Figure 5.5 présente le schéma de principe du dispositif d'implantation d'un STC pour un périmètre urbain.

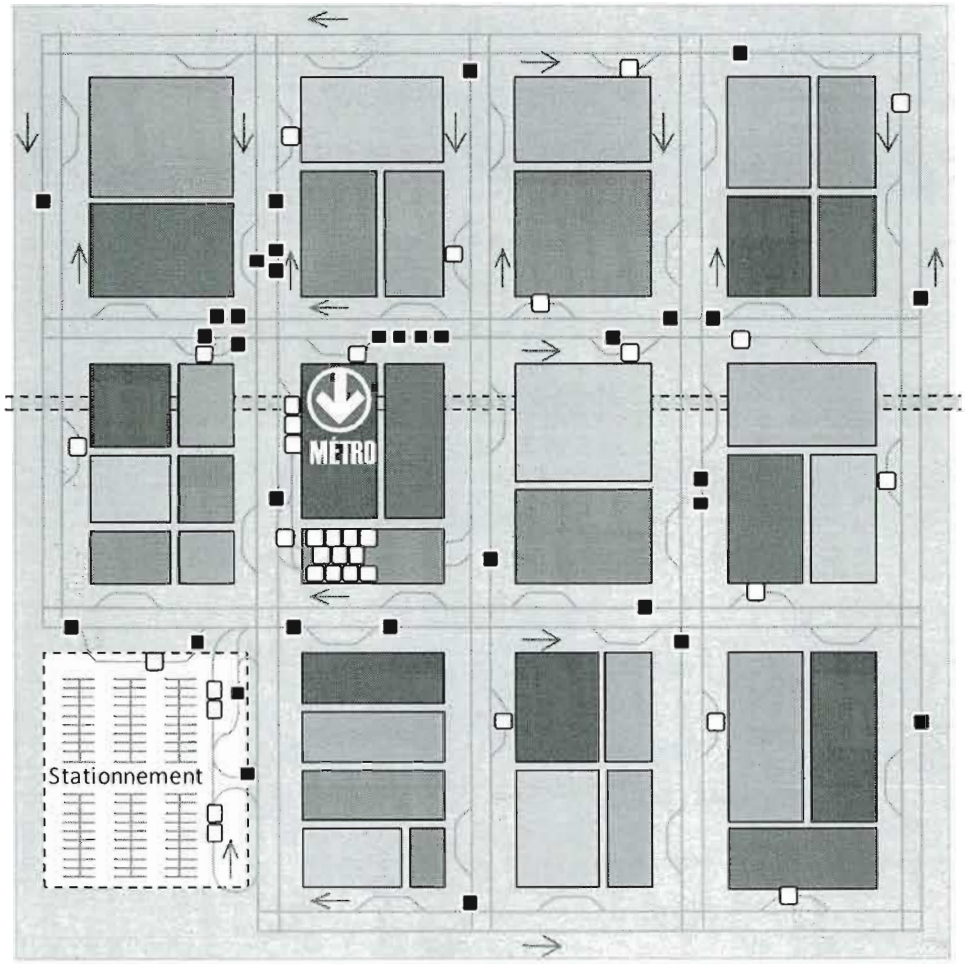


Figure 5.5 Schéma de principe de l'intégration d'un STC dans un périmètre à forte activité.

Le schéma de principe de la Figure 5.5 illustre une configuration de zone urbaine sans voiture. Cependant, dans une première étape, le STC peut s'intégrer dans une perspective de minimisation de la circulation routière et d'amélioration de l'accessibilité aux différents centres de services et d'activités. Dans cette configuration, le réseau peut être moins dense en choisissant un seul sens de déplacement par rue ou encore une rue sur deux. Dans ce cas, le partage de l'espace urbain avec les automobiles peut se réaliser soit, par marquage au sol, de la même manière que dans le cas des pistes cyclables ou des zones de stationnement le long des trottoirs soit, en définissant un site propre au STC.

Dans cette configuration, le transport linéaire (métro, tramway, train léger) ou la voiture répond aux besoins de déplacement « primaires », soit du lieu de résidence vers le périmètre d'activités, tandis que le STC facilite les déplacements locaux « secondaires » qui ont lieu tout au long du séjour de l'usager à l'intérieur du périmètre. Ces déplacements « secondaires » sont caractérisés par une mobilité de proximité de type « multiples-multiples » (multiples points d'origines vers de multiples points de destinations). Cette association entre STC et transports linéaires, se caractérise comme une mesure attractive en aval des déplacements « primaires » propices à favoriser le transfert modal vers le transport de masse. Par analogie thermodynamique, le STC représente un moyen de minimiser « l'énergie d'insatisfaction » associée aux déplacements des personnes à l'intérieur du périmètre et ainsi maximiser « l'énergie du besoin » disponible transmise au système de transport pour réaliser le changement d'état à la satisfaction du besoin des utilisateurs.

5.2.2 Approche par complémentarité des modes de transport

Le premier problème des transports linéaires (métro, tramway, train léger) n'est pas le trajet mais la difficulté de rejoindre les gens. À Montréal, si 60 % des déplacements se font en métro lorsque les usagers y ont un accès direct, en revanche, la part modale chute à moins de 20 % dès qu'ils doivent emprunter l'autobus pour se rendre à une station (Bergeron, 1999). Pour minimiser « l'énergie d'insatisfaction » associée à l'utilisation de l'autobus (perte de temps, conditions de transport), le STC peut être implanté autour de chaque station située le long du corridor de transport de masse linéaire et jouer le rôle de « concentrateur » aux stations de départ et de « diffuseur » aux stations d'arrivée (Figure 5.6).

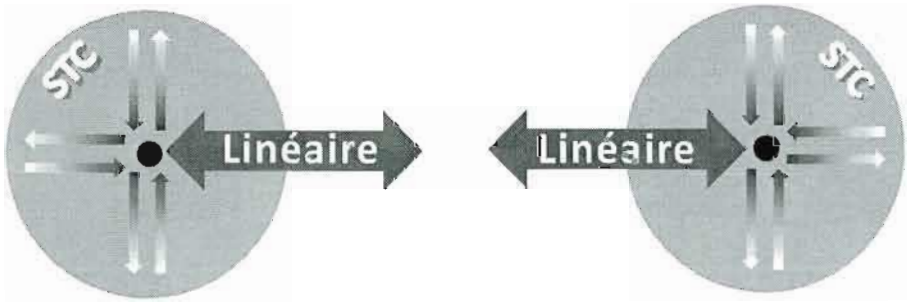


Figure 5.6 Schéma de déplacements « STC-transport linéaire-STC »

La configuration de la Figure 5.6 correspond à un schéma de déplacement « STC-transport linéaire-STC » où l'usager bénéficie du service du STC en amont et en aval du transport de masse. Cette synergie permet d'améliorer la qualité du service associée à la mobilité des personnes en diminuant les temps de parcours pour accéder aux stations du transport linéaire. Ainsi « l'énergie du besoin » effectivement transmise au système, et consacrée à la transformation de la configuration des véhicules dans le réseau, est plus élevée.

Le gain de cette association entre les deux modes de transport urbain peut être évalué sur la base de la démarche de Lowson (2003b) afin de déterminer les temps de parcours pour différents scénarios de transport en fonction de la distance entre les arrêts d'un mode de transport conventionnel. La Figure 5.7 présente, pour une distance moyenne de 8 kilomètres, la courbe des temps de parcours d'un scénario de transport basé sur l'utilisation du STC-Serpentine et du métro en fonction de la distance entre les stations de ce dernier ainsi que les courbes des temps de parcours pour les scénarios métro et voiture individuelle.

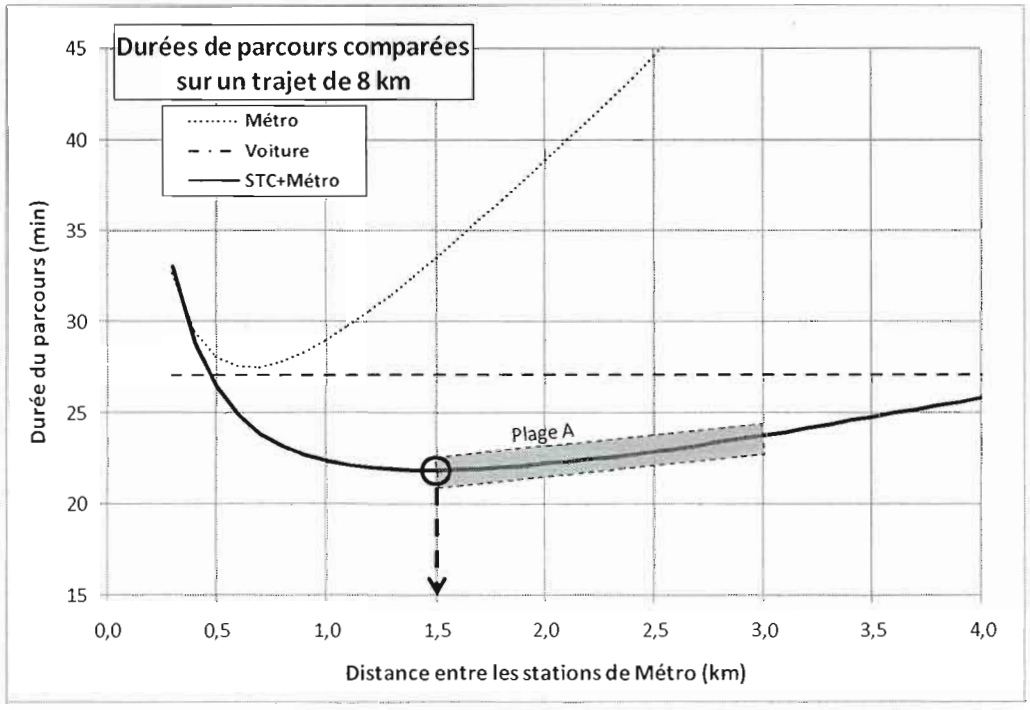


Figure 5.7 Durées de parcours comparées entre le métro, la voiture et une combinaison des modes STC-Serpentine+métro en fonction de la distance entre les stations de métro [Adapté de Lowson, 2003b]

La Figure 5.7 montre que dans la configuration « STC-Serpentine+métro », la distance optimale entre les stations de métro est de 1,5 km pour effectuer un déplacement de 8 kilomètres en un peu moins de 22 minutes. L'analyse comparative des courbes permet de mettre en évidence que, par rapport à la configuration « métro », qui correspond à celle où l'usager se rend à pied à la station, la combinaison des deux modes permet d'allonger la distance entre les stations d'un facteur deux. Cette différence engendre des arrêts moins fréquents sur la ligne de métro, d'où des gains de temps (périodes d'arrêt et phases d'accélération/décélération). La Figure 5.7 montre également que la variation de la distance entre les arrêts est peu pénalisante sur la durée totale du trajet (Plage A, Figure 5.7). Ainsi, tout en diminuant le temps de transport, l'augmentation de la vitesse moyenne des rames de métro permet également d'accroître la capacité de transport. Par ailleurs, la configuration bimodale permet de concurrencer la voiture individuelle qui, dans ce scénario, se déplace à une vitesse moyenne de 20 km/h.

En utilisant le STC pour amener les usagers aux stations de départ puis les diffuser une fois aux stations d'arrivée, la contrainte est sur le transport linéaire. En effet, au-delà des déplacements internes à chaque zone STC, l'accès facilité au transport de masse risque d'entraîner la congestion des corridors de déplacements. Par analogie avec les principes hydrauliques, le corridor dans lequel se déplace le transport linéaire correspond à une canalisation qui se met en charge. En termes de débits, elle représente l'élément limitant de la diffusion des personnes à l'intérieur du système de mobilité. Pour éviter cette conséquence, la solution réside dans l'ouverture d'autres mesures attractives de mobilité reposant sur la

flexibilité du STC et son utilisation sur des déplacements de proximité. Ainsi, il est envisageable de dédier le transport linéaire aux déplacements de plus longues distances et favoriser ainsi le STC pour les déplacements de proximité (Figure 5.8).

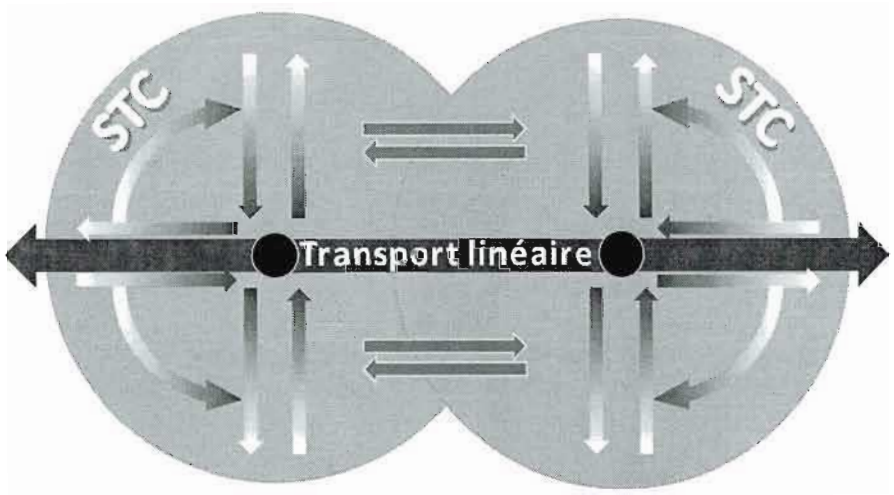


Figure 5.8 Schéma des déplacements associés à une offre diversifiée en mobilité

La Figure 5.8 illustre le transfert d'usagers d'une zone STC à une autre sans passer par le corridor du transport linéaire. La diversité de modes pour se déplacer selon le type de trajet engendre une meilleure offre globale de la mobilité (baisse de la variation d'enthalpie pour atteindre une configuration qui satisfait le besoin) et minimise les risques d'engorgement (une plus grande entropie grâce à une meilleure distribution des véhicules dans le périmètre urbain). Ainsi, l'offre n'est plus basée sur l'optimisation d'une solution de transport, mais bien sur une diversité des moyens pour se déplacer entre de multiples points d'origines vers de multiples points de destinations selon le type de besoin. Basé sur la démarche de Lowson (2003b), la Figure 5.9 présente la durée du parcours en fonction de la longueur du trajet pour différents scénarios de mobilité.

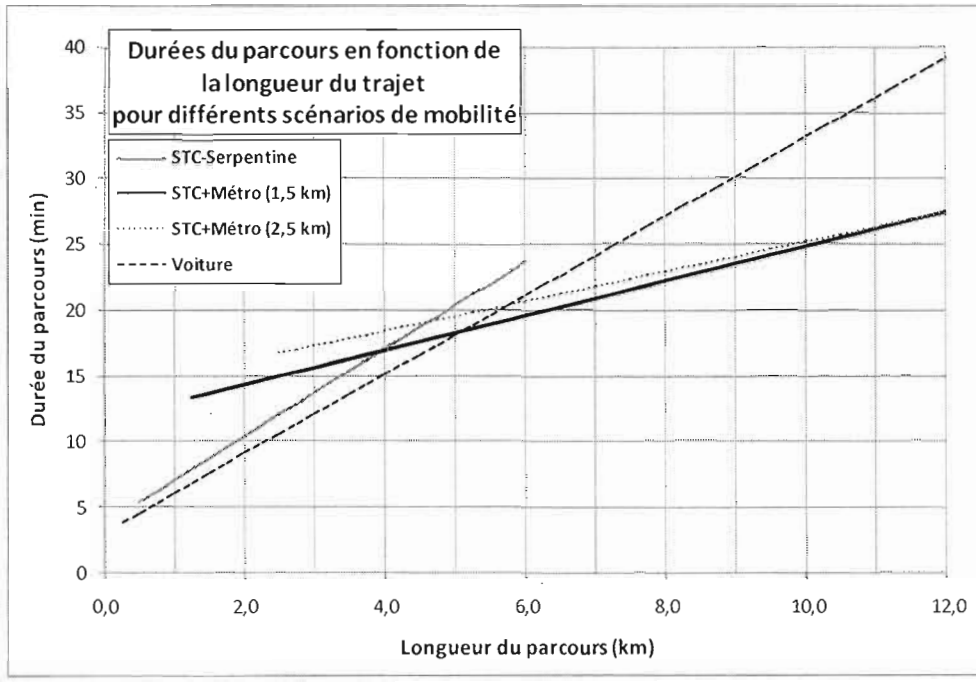


Figure 5.9 Durées de parcours en fonction de la longueur du trajet pour différents scénarios de mobilité [Adapté de Lowson, 2003b]

Les courbes en trait continu « STC-Serpentine » et « STC-Métro (1,5 km) » de la Figure 5.9 indiquent que le « STC-Serpentine » est plus rapide pour des trajets inférieurs à 4 kilomètres, tandis que la combinaison des deux moyens de transport (avec une distance de 1,5 km entre les stations de métro) est favorable pour des distances plus grandes. Par rapport à la voiture (courbe en pointillé noir), la distance la plus défavorable aux transports collectifs est de 4 kilomètres, représentant une différence de 2 minutes en faveur de l'automobile. En revanche, à partir d'un trajet de 5 kilomètres ou plus, l'utilisation de la voiture est défavorable. Cela dit, la voiture est particulièrement sensible aux phénomènes d'engorgement du réseau routier, ce qui a pour effet d'abaisser la vitesse moyenne

(considérée à 20 km/h pour la comparaison de la Figure 5.9). En revanche, comme tout système dynamique, le transfert d'une partie des usagers de la voiture vers les moyens collectifs de mobilité soulagerait le réseau routier et fluidifierait le trafic automobile. Par ailleurs, la courbe pointillée grise de la Figure 5.9, qui représente le scénario de transport « STC-Métro (2,5 km) » (distance de 2,5 km entre les stations de métro), indique que l'effet de l'allongement de la distance entre les stations a un faible impact sur la qualité de l'offre en mobilité.

À une échelle régionale, nationale voir internationale qui impliquent d'autres moyens de déplacement tels que les trains, les trains à grande vitesse et les avions, la synergie entre les modes de transport peut être à plusieurs niveaux. Dans le cas d'un aéroport, le STC peut être implanté dans le site aéroportuaire pour faciliter la mobilité des voyageurs et de leurs bagages entre les différents points de services et les lieux d'embarquement. Il peut également servir de relais avec les modes de transports existants en assurant un lien vers les stationnements des voitures qui, bien souvent occupent plusieurs sites répartis autour de l'aéroport, vers les stations de métro pour un accès facilité au centre-ville ou encore la gare ferroviaire qui permet de rejoindre d'autres villes. Dans le cas des transports linéaires (métro, train), un STC peut reprendre le relais aux stations d'arrivées afin de rediffuser les usagers vers leur destination finale. Ainsi, dans une approche plus générale de la mobilité multimodale, le STC peut se situer soit en début ou en fin de chaîne, soit à l'interface de modes conventionnels de transport. Dans tous les cas, le STC se présente comme un facilitateur de mobilité en diminuant l'enthalpie nécessaire

pour assurer la satisfaction du besoin en déplacement grâce à ses principes opératoires qui en assurent la cohérence dans le temps et dans l'espace.

5.2.3 Limites

Dû à la capacité à déplacer un grand nombre de personnes dans un espace à deux dimensions plutôt que le long d'un corridor, l'approche conceptuelle des déplacements par STC repousse les limites généralement admises pour les modes de transport en commun conventionnel. Cependant, l'absence actuellement de STC en opération dans un milieu urbain permet difficilement de mettre en évidence les contraintes intrinsèques associées à l'opération de ce mode de déplacement et surtout de mesurer leur effet sur la qualité du service offert aux usagers.

Les limites associées aux déplacements conduisent généralement le système de transport à la saturation, soit lorsque la demande en déplacement est supérieure à l'offre. Les phénomènes de saturation peuvent être la conséquence d'événements fortuits (bris mécanique par exemple) qui se traduisent par une perte momentanée de la qualité du service sur une partie du réseau. Dans ce cas, les approches associées aux mesures envisagées en gestion du risque dans les réseaux de services (téléphonie, électricité) peuvent être appliquées afin de minimiser les conséquences de ces événements accidentels. Dans ce contexte, un réseau maillé privilégiant la pluralité des chemins pour relier les différents centres desservis minimiserait les risques de perte de qualité du service.

Dans le cas des phénomènes récurrents de saturation, les événements peuvent avoir lieu dans deux cas de figure : (1) lorsqu'il y a un manque de disponibilité en véhicules libres dans un délai rapproché pour la zone du réseau considérée; (2) lorsque la capacité des infrastructures fixes (voies de guidage et stations d'arrêt) ne peuvent supporter le flux de véhicules. Dans le premier cas, si la baisse de la qualité de service engendrée par les temps d'attente en station est jugée inacceptable (temps d'attente trop long sur de trop longues périodes au cours de la journée), il s'agit de corriger la situation en introduisant plus de véhicules dans le réseau. Par contre, dans le deuxième cas de figure, si le nombre de véhicules est suffisant en regard de la demande, en revanche la convergence spatio-temporelle des déplacements crée une saturation. Dans ce cas, la limite associée aux STC est une limite en lien avec le milieu construit, soit l'espace disponible pour installer les infrastructures (voies de guidage et stations) ainsi que les activités urbaines qui y sont rattachées. Dans la mesure où ce type de limites ne sont pas intrinsèques à la technologie des STC mais bien contextuelle, les solutions doivent émerger d'un urbanisme repensé afin de favoriser la coexistence des différentes activités anthropiques et pour laquelle les STC représente un moyen d'y parvenir.

5.2.4 Perspectives

Dans une perspective plus large des activités anthropiques, la mobilité des personnes n'est pas une fin en soi mais bien le moyen pour accéder aux différents centres d'activités et de services. Ainsi, ultimement la mobilité doit être pensée en termes d'accessibilité et, de ce point de vue, le transport est indissociable de l'urbanisme qui doit jouer le rôle de fonction régulatrice du système urbain pour

qu'il puisse répondre à sa finalité, soit maximiser les interactions sociales entre les individus.

Un urbanisme axé sur une spécialisation fonctionnelle des agglomérations, avec des zones d'habitats, de commerces, d'emplois et de loisirs, conduit à une augmentation des distances parcourues et à une dépendance à l'automobile qui accélèrent la dislocation de la structure urbaine. Ainsi, la singularité de l'offre (tant en transport qu'en fonctionnalité intra-zonale) engendre un appauvrissement des options disponibles pour satisfaire les besoins individuels et peut entraîner le système de mobilité dans une spirale d'auto-engorgement du réseau. Dès lors, la démarche développée favorisant une diversification de l'offre en transport propice à satisfaire l'éclatement des mobiles de déplacements trouve un écho en urbanisme à travers la structuration des fonctionnalités des milieux urbains.

Par analogie avec la démarche proposée pour la mobilité, le besoin en déplacement devient le besoin à accéder à un service ou à une activité qui peut être analysé sous l'angle des principes associés aux phénomènes chaotiques. Dans ce contexte, la mixité des fonctions dans une zone urbaine minimise l'enthalpie nécessaire pour satisfaire le besoin et leur diversité peut être appréhendée par le principe d'entropie. Certes, un urbanisme visant à rapprocher habitats, emplois, commerces, services et loisirs, grâce à une plus grande diversité des fonctions urbaines au contraire du zonage, n'est pas garante de distances parcourues moins grandes (Castel, 2007). Cependant, elle offre une diversification des points d'accès auprès des citadins propices à une utilisation des différents moyens de

déplacements, minimisant ainsi les risques d'engorgements. Ainsi, multifonctionnalité du milieu et mobilité multimodale de proximité développées sur le principe d'une offre diversifiée et dynamique construisent un contexte urbain à partir desquels l'individuation des besoins peut s'exprimer dans le temps et dans l'espace.

D'un point de vue recherche et développement, les perspectives s'inscrivent dans l'informatisation du schéma de principe (Figure 5.3, p. 100) développé à partir des lois de comportement des systèmes naturels. Cette première étape d'informatisation doit faciliter la simulation de différents scénarios et permettre d'évaluer la réponse de différentes configurations de réseaux sur le besoin individuel en mobilité. Dès lors, différentes perspectives de recherche peuvent être envisagées afin d'améliorer la compréhension de la dynamique du système usagers-transports et ainsi faciliter la prise de décision. Basée sur le principe d'une évaluation de différents scénarios de transport, la recherche portera sur la définition et la réalisation des étapes associées à l'acquisition des données (base de données et catalogue de l'information), au traitement des informations (algorithmes) et à la représentation des résultats (tableaux, graphes et cartographie). Dans la mesure où cette plateforme informatique doit permettre d'évaluer et de comparer différents scénarios de mobilité, il convient de définir les critères socio-économiques et environnementaux, les unités de référence et de caractériser les différentes technologies de transport en fonction des paramètres retenus. En ce qui concerne les critères environnementaux, il apparaît intéressant de les appréhender selon les principes de l'analyse de cycle de vie (ACV). En effet,

cette approche permet d'intégrer les impacts des différentes activités nécessaires à la mise en œuvre du scénario considéré. La démarche s'inscrit donc dans une approche globale des activités associées à la mobilité et permet ainsi d'éviter de réduire l'évaluation aux simples déplacements des personnes. Dans une vision à long terme, les perspectives de recherche porteront sur l'identification des mesures urbanistiques à envisager et l'évaluation de leurs effets sur la mobilité individuelle.

Dans un autre domaine de recherche, les perspectives de développement peuvent porter sur des aspects opérationnels des STC en climat nordique. En particulier, la question des précipitations neigeuses peut être abordée en regard des spécificités des STC. Ainsi, le programme de recherche permettrait d'évaluer différentes options telles qu'un programme de véhicules STC qui tournent automatiquement et selon une fréquence adaptée à l'accumulation de neige au sol qui chassent la neige ou la ramassent ou encore une piste couverte qui empêche les accumulations de neige. Pour chacune des options retenues, il s'agit également de tenir compte des températures et du facteur éolien. Dans tout les cas, ces perspectives de recherche s'inscrivent dans la volonté de faciliter l'intégration et l'opération des STC dans l'offre en transport en milieu urbain.

CONCLUSION

Dans un milieu urbain animé par une mobilité complexe et individualisée, la condition *sine qua non* pour réduire la part de l'automobile dans les déplacements en milieu urbain repose sur une offre en transport collectif qui se doit d'être proactive, flexible et apte à s'organiser pour satisfaire les besoins individuels en déplacement. Dans ce contexte, les STC, par leurs caractéristiques structurelles et opérationnelles, s'imposent comme la solution technologique permettant de rejoindre les individus sans les asservir *de facto* au *modus operandi* des transports de masse linéaire. Ainsi, les STC présentent l'avantage de ne pas réduire, *a priori*, la mobilité aux contraintes opérationnelles mais bien d'exploiter sa complexité pour mieux satisfaire le besoin individuel en déplacement.

Inscrite dans une démarche systémique, l'approche basée sur les lois comportementales des systèmes naturels initie un changement de paradigme dans le domaine de la mobilité des personnes en milieu urbain. Ce changement repose sur trois notions fondamentales. La première est la compréhension de la dynamique du besoin individuel en mobilité pour un centre d'activités et de services en milieu urbain sous l'angle des phénomènes chaotiques. Tel que démontré, en reconstruisant l'espace d'encastrement du sous-système associé à la demande en mobilité à partir des séries chronologiques pour chaque centre d'activités et de services, il est alors possible d'anticiper le besoin sur un pas de temps de deux minutes. La retombée majeure de la démarche repose sur la

propriété déterministe des systèmes chaotiques qui établit que le devenir du système est contenu dans l'information (séries chronologiques). Ainsi, même s'il y a une incertitude sur la valeur prédite et une difficulté à prévoir à long terme, les valeurs projetées peuvent être déterminées dynamiquement à partir du profil des événements chronologiques enregistrés. Cette anticipation du besoin pour chaque centre permet de caractériser la dynamique des interactions entre la demande (sous-système humain) et l'offre (sous-système transport). Les deuxième et troisième notions concernent les processus opératoires des véhicules développés sur les principes thermodynamiques. Par opposition au principe du plus court chemin pour le choix de l'itinéraire, le principe du maximum d'entropie prend en compte plusieurs scénarios dont le choix des itinéraires individuels est basé sur des propriétés d'ensemble permettant de minimiser les risques d'engorgements tout en s'assurant du respect des déplacements individuels. Cette démarche associée à l'identification des itinéraires des véhicules peut être appliquée dans la mesure où les stations de départ et d'arrivée de chaque demande sont connues préalablement aux déplacements (propriété fonctionnelle des STC). Par ailleurs, les principes thermodynamiques qui gouvernent l'évolution des systèmes naturels permettent d'identifier les transformations préférentielles de la configuration des véhicules dans le réseau. *A contrario* de l'approche conventionnelle basée uniquement sur les principes de proximité du véhicule par rapport à la demande et du chemin le plus court qui a tendance à déséquilibrer le système et engorger le réseau, le processus d'une évolution thermodynamique permet de maintenir un état des véhicules dans le réseau proche d'un état d'équilibre dynamique souhaité pour satisfaire la demande.

Le modèle développé appliqué aux STC permet de rejoindre la satisfaction des besoins individuels dans le temps et dans l'espace pour une mobilité dynamique de proximité. Cette flexibilité des STC leur permet de s'adapter aux caractéristiques du milieu dans lequel ils s'inscrivent. Ainsi, dans une perspective plus large de la mobilité urbaine, le couplage des STC avec les transports de masse linéaires génère une synergie apte à s'adapter aux multiples dimensions de la mobilité. Ces dimensions peuvent s'exprimer au travers de la variation des distances à parcourir et de la variation de flux de personnes à déplacer. En effet, le transport de masse linéaire prend tout son sens aux heures de pointe lorsque les personnes se rendent au centre-ville le matin (ou en reviennent le soir), pour autant que l'accessibilité aux stations le long des corridors de déplacements en soit facilitée par un STC. Dans ce contexte, la complémentarité des fonctions par une approche multimodale de la mobilité offre une alternative positive à la voiture individuelle. Finalement, axé sur la mobilité individuelle des personnes en milieu urbain, la démarche développée s'inscrit également dans une vision urbanistique basée sur la multifonctionnalité des différentes zones urbaines visant à privilégier des déplacements de proximité diffus et variés, propices à maximiser l'espace disponible et éviter des zones d'engorgement.

BIBLIOGRAPHIE

ABARBANEL, H.D.I. (1996). Analysis of Observed Data, Spinger-Verlag, New-York.

AMT (2005). ENQUÊTE ORIGINE-DESTINATION 2003 : La mobilité des personnes dans la région de Montréal. Secrétariat à l'enquête Origine-Destination, réalisée conjointement par l'Agence métropolitaine de transport, la Société de transport de Montréal, le Réseau de transport de Longueuil, la Société de transport de Laval, l'Association des Conseils intermunicipaux de transport, le ministère des Transports du Québec et le ministère des Affaires municipales, du Sport et du Loisir. 176p.

ANDERSON, J.E. (1996). Some Lessons from the History of Personal Rapid Transit (PRT). International Conference on Personal Rapid Transit (PRT) and Emerging Transportation Systems. Minneapolis, MN. 18-20 Novembre 1996

ANDRÉASSON, I. (1997). Quasi-Optimum Redistribution of Empty PRT Vehicles. 6th Conference on Automated People Movers.

ANDRÈASSON, I. (2003). Reallocation of empty personal rapid transit vehicles en route. Transportation research record, 1838:36-41

ASCHER F. (2002). Le transport a la demande: Individualisation des mobilités urbaines et personnalisation des services publics. Annales des Télécommunications, 57:3-4, pp. 277-288.

ATRA (2003). Personal Automated Transportation: Status and Potential of Personal Rapid Transit. Rapport principal de *Advanced Transit Association.* Palo Alto (Californie). 37p.

BANOS, A. (2001). Le lieu, le moment, le mouvement : pour une exploration spatio-temporelle désagrégée de la demande de transport en commun en milieu urbain. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté, Besançon (France).

BEAUCIRE, F. (1996). Les transports publics et la ville. Les Essentiels Milan, Paris, 63p.

BERGERON, R. (1999). Le livre noir de l'automobile. Edition Hypothèse. Montréal (Canada). 455p.

BERNARD, L. (2003). Révision du cadre financier du transport en commun au Québec – Montréal. Rapport du mandat du Ministre des transports du Québec. Montréal (Canada). 133p.

BOITEUX, M. (2001). Transports : choix des investissements et coût des nuisances. Commissariat général du plan, France. 325p.

CAO, L. (1997). Practical Method for Determining the Minimum Embedding Dimension of a Scalar Time Series. Physica D, 110:43-50.

CARB (2007). The California Low-Emission Vehicle Regulations. California Air Ressources Board. 114p.

CASTEL, J.-C. (2007). Quand la mobilité oblige à repenser l'urbanisme. Conseil français des urbanistes. 17p.

CDD (2001). Rapport du Groupe de travail spécial intersessions sur les transports et l'atmosphère. Commission du développement durable des Nations Unies, neuvième session, 16-27 avril 2001. 25 p.

CERVERO, R. (1998). The Transit Metropolis: A Global Inquiry. Island Press, Washington D.C. (États-Unis), 464 p

CEVEQ (2000). Projet véhicules électrique Montréal 2000. Rapport final préparé sous l'autorité du comité directeur du projet. Montréal (Canada). 63p.

CHAKRABARTI, C.G. AND DE, K. (1997). Bolzman-entropy: Generalization and Application. Journal of Biological Physics, 23(3): 163-170

CN SERPENTINE SA (2003). Le système Serpentine : un moyen de transport public économique, écologique et efficace. Rapport technique. 24p.

CYBERCARS (2005). Cybernetic Cars for a New Transportation System in the Cities. Final Report, Deliverable D8, 40p.

DAGANZO, C.F. (1977). Some Statistical Problems in Connection with Traffic Assignment. Transportation research, 11(6):385-389

DAS, N.C., CHAKRABARTI, C.G. AND MAZUMDER, S.K. (2000). Traffic Network and Distribution of Cars: Maximum-Entropy Approach. Journal of Transportation Engineering, 126(1):89-92

DAVIS, G.A. AND NIHAN, N.L. (1991). Noparametric regression and short-term freeway traffic forecasting. Journal of Transportation Engineering, 177(2):178-88.

DE ROSNAY, J. (1975). Le macroscope: vers une vision globale. Editions du Seuil, Paris (France).

DUPUY, G. (1999). La dépendance automobile. Anthropos-Economica, Paris (France). 166p.

EDICT (2004). Evaluation and Demonstration of Innovative City Transport. Fifth Framework Programme: City of tomorrow and cultural heritage. Final Report, Deliverable 10. 46p.

FRAZIER, C. AND KOCKELMAN, K.M. (2004). Chaos Theory and Transportation Systems. presented at 83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington D.C., January.

FRONTIER, S., PICHOD-VIALE, D. (1999). Ecosystèmes : structure, fonctionnement, évolution, dans Les écosystèmes, Serge Frontier, PUF, Paris (France).

GLAUS, M. (2004). Pourquoi La Serpentine, citée comme un exemple de nouvelle technologie en transport, n'arrive pas à percer le marché du transport en commun?. Rapports de synthèse, Université du Québec à Montréal, 24p.

GLEICK, J. (1989). Chaos: Making a new science. Viking Press, New York. 368p.

GOURVIL, L. ET JOUBERT, F. (2004). Évaluation de la congestion routière dans la région de Montréal. Rapport réalisé pour le ministère des Transports du Québec. 88p.

HANDY, S. (1993). A cycle of dependence : automobiles, accessibility and the evolution of the transportation and retail hierarchies. Berkeley Planning Journal, Vol. 8, pp. 21-43.

HANNA, D (1993). Transport des personnes et développement du territoire de l'agglomération montréalaise: un essai d'interprétation historique. Rapport à l'attention du Service de la planification du territoire de la Communauté urbaine de Montréal. 81p.

HBL DECISION ECONOMICS (2002). Modèle coûts-avantages appliqué à l'évaluation de projets d'investissement dans les transports publics et les routes. Rapport pour Transports Canada. 175p.

HILBORN, R.C. (2001). Chaos and Nonlinear Dynamics: An Introduction for Scientists and Engineers, 2nd Ed., Oxford University Press.

IBI GROUP (2001). Vision nationale des transports en commun jusqu'en 2020. Rapport final pour Transports Canada. 103p.

JAYNES, E.T. (1957). Information Theory and Statistical Mechanics. Physical Review, 106(4):620-630.

JUNCA-ADENOT, F. (2003). Transport durable dans un contexte de développement urbain. Stratégie de l'AMT. Americana 2003, session développement urbain. 19 mars 2003.

KANTZ, H. AND SCHREIBER, T. (1994). Nonlinear Time Series Analysis. Cambridge University Press (1994).

KAPUR, J.N. (1990). Maximum Entropy Models in Science and Engineering. Wiley Eastern, New Dehli.

KENWORTHY, J.R., LAUBE, F.B. (1999). Patterns of automobile dependence in cities: an international overview of key physical and economic dimensions with some implications for urban policy. Transportation Research Part A, **33**(7-8): 691-723.

KESTIN, J. (1979). A course in Thermodynamics. Taylor & Francis; 1st edition. 617p.

LATOUR, B. (1992).Aramis ou l'amour des techniques. Édition La Découverte. Paris (France). 241p.

LEIS U., HELMREICH, W. AND JAUERNIG, G (2006). Second Annual Thematic Research Summary – Other modes. DG Energy and Transport, Deliverable D2.D-2.5: issue 1.0. 12p.

LITMAN, T. A. (2003a). Reinventing Transportation: Exploring the Paradigm Shift Needed to Reconcile Transportation and Sustainability Objectives. Victoria Transport Policy Institute. Victoria (CB), Canada. 12p.

LITMAN, T. A. (2003b). Transportation Market Distortions: A Survey. Victoria Transport Policy Institute. Victoria (Canada). 29p.

LITMAN, T. A., BURWELL, D. (2003c). Issues In Sustainable Transportation. Victoria Transport Policy Institute. Victoria (Canada). 21p.

LOWSON, M. (2003a). A New Approach to Effective and Sustainable Urban Transport. Transportation Research Board 2003: Paper 03-2140. University of Bristol and Advanced Transport Systems Ltd, Bristol (Angleterre). 14p.

LOWSON, M. (2003b). Service effectiveness of PRT vs Collective-Corridor Transport. Journal of advanced Transportation, 37 (3):231-241.

MCDONALD, M., VÖGE, T. (2002). User Needs Analysis and Analysis of Key Technologies. D1 Part1 – Report on User Needs for Cybernetic Transport Systems (CTS). Rapport final réalisé dans le cadre du projet européen CyberCars. 87p.

MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT DU QUÉBEC (2002). Modernisation de la rue Notre-Dame, entre la rue Amherst et l'échangeur de l'autoroute 25, par le MTQ. Ministère de l'Environnement, Direction des évaluations environnementales. Analyse environnementale. 133p

NAIR, A.S., JYH-CHARN, L., LAURENCE, R. AND SAURABH, G. (2001). Non-Linear Analysis of Traffic Flow. Proc. of the 4th International IEEE Conference on ITS, Oakland, August.

NEWMAN P., W.G., KENWORTHY J., R. (1989). Cities and Automobile Dependence. An international Sourcebook, Gower Technical, Sidney, 406p.

NEWMAN, P., W.G. AND KENWORTHY, J., R. (1996). Formes de la ville et transports : vers un nouvel urbanisme. Cahiers de l'IAURIF, n° 114-115, pp. 98-109

ONU (1997). Protocole de Kyoto à la Convention-cadre des Nations Unies sur les changements climatiques. Organisation des Nations Unies, Kyoto (Japon).

PARENT, M., FAUCONNIER, S., LISOWSKI, L. (1996). PRAXI: A Small Electric Vehicle Specific for Urban Transport. 13th International EV Symposium (EVS-13). Osaka, Japon. 13-16 octobre 1996.

PRADES, J., LOULOU, R. ET WAAUB, J.-P. (1998). Stratégie de gestion des gaz à effet de serre. Rapport du GREIGE, UQAM, Montréal (Québec).

RAKHA, H. AND VAN AERDE, M. (1994). Statistical Analysis of Day-to-Day Variations in Real-Time Traffic Flow Data. Transportation Research Record 1510:26-34.

RESSOURCES NATURELLES CANADA (2000). Améliorer le rendement énergétique au Canada. Rapport au Parlement en vertu de la Loi sur l'efficacité énergétique. Ottawa, Canada. 90 p.

SAUGY, B. (2001). The Serpentine – sustainable urban mobility. The tenth international conference on management of technology. Lausanne (Suisse), 19 mars.

SAUGY, B., DRAYER F., CARDIS B., GLAUS, M., SAUGY, P.-Y. (1997). The Serpentine : Automated Individual Urban Public Transport. 6th International Conference on Automated People Movers. Las Vegas, Nevada (Étas-Unis), 9-13 avril 1997.

SCHNEIDER, J.B. (1992). A PRT Deployment Strategy to Support Regional Land Use and Rail Transit Objectives. Transportation Quarterly, 46:1, pp 135-153.

SHANNON, C.F. (1948). Mathematical Theory of Communication. Bell System Technical Journal, 27:379–423,623-656.

SPIESS, H. (1987). A Maximum Likelihood Model for Estimatings Origin-Destination Matrices. Transportation Research, Part B: Methodological, 21(5):395-412.

STEWART, S. (1999). Electronic tolling and traffic management (ETTM) the 407 ETR - The experience, the opportunity and a concept. IEE Colloquium, Digest : 92, pp. 39-54

SZILLAT, M.T. (2001). A Low-level PRT Microsimulation, Ph.D. thesis, Université de Bristol, England (2001).

TEGNÉR, G. (2005). PRT Costs Compared to Bus, LRT and Heavy Rail –Some Recent Findings. AATS European Conference, Proceedings of advanced automated transit systems designed to out- perform the car 2005, Bologne (Italie), 7-8 Novembre

TOMLIN, J. A., AND TOMLIN, S. G. (1968). Traffic distribution and entropy. Nature, 220:97–99.

TRANSPORT CANADA (2001). Le transport durable : le contexte canadien. Gouvernement du Canada. Ottawa, Canada. 24 p.

TURCOTTE, M. (2005). Le temps pour se rendre au travail et en revenir. Enquête sociale générale sur l'emploi du temps : cycle 19 pour Statistique Canada, 89-622-XIF, 25p.

WANG, D.H., YAO, R.H. AND JING, C. (2006). Entropy Models of Trip Distribution. Journal of Urban Planning and Development, 132(1): 29-35

WIEL M. (1999). La transition urbaine ou le passage de la ville pédestre à la ville motorisée. Pierre Mardaga Editeur, 149 p.

WIEL M. (2001). Ville et automobile. Descartes & Cie, Paris, 140p.

WILSON, A.G. (1970). Entropy in Urban and Regional Modelling. Pion, London.

ZAHAVI, Y. (1976). Travel Characteristics in Cities of Developing and Developed Countries. Staff Working Paper No. 230, World Bank, Washington, D.C., 84 p.

ANNEXE A

NON-LINEAR ANALYSIS OF MOBILITY DEMAND ADAPTED TO AN INDIVIDUALISED TRANSPORTATION SYSTEM

Mathias Glaus[1], Robert Hausler[1] and Jacques Bourgois[2]

[1] *Ecole de Technologie Supérieure, Département de la construction, STEPPE-ETS, 1100 Notre-Dame O., Montréal, Canada H3C 1K3 and*

[2] *Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Centre SITE, 158 Cours Fauriel, 42023 St-Etienne cedex 2, France.*

Article soumis

Journal of Advanced Transportation 2006

Keywords : Individual mobility, Urban Transportation, Time Series, Non-Linear Analysis, Chaotic Behaviour.

Abstract

The Cyber Transportation Systems (CTS) have the flexibility of an automobile as well as the capacity of mass transportation. It individualizes and revolutionizes the public transportation and represents a genuine positive strategy to reinforce global mobility supply. Based on this functional rupture, the developed approach aims to characterize the individual displacement needs, for an urban activity center by applying the method of non-linear time series analysis. The experiment analyses collected data from a public activity center in the city of Montreal (Canada). The results demonstrate that the individual mobility needs behave in the same fashion as a chaotic process. This behaviour permits to apply the techniques associated with the phase space in order to predict the needs. Deterministic characteristics pave the way to developing a global reference system of the individual mobility in an urban area, allowing to evaluate the benefits of a CTS global mobility supply.

Introduction

One of the key factors in urban development is its ability to satisfy individual mobility needs. Taking into account urban spreading and diversified individual needs (Banos, 2001), the application of Cyber Transportation Systems – CTS (Lowson, 2003) represents an ideal solution capable of improving on individual mobility and increase the use of public transportation. In this context, one of the most promising CTS is the transportation system *Serpentine* (Saugy, 2001) due to its conceptual and technological characteristics (weak land requirements, no contact energy transfer, energy efficiency, etc.).

The CTS distinguishes itself from conventional transportation due to its specific characteristics: ability to move automatically without a human conductor, reduced vehicles size (1 to 6 people), no intermediate stops and transfers, on call 24 hour service (Szillat, 2001). These differences cause a rupture to occur both at the functional and operational level between CTS and traditional transportation modes. On a functional level for example, the subway seeks to displace the largest number of people at the same time using the same route while a CTS aims to offer a dynamic response to an individual need communicated by the user. On an operational level, the pre-established route and schedule of the subway, which is independent of its users, define its spatial and temporal position while the CTS has no pre-assigned location. This flexibility avoids having vehicles circulating vacant and permits to strategically position the vehicles within the network to respond in the delay of one minute to an individual mobility request expressed on a spatial-temporal level.

The pre-positioning of the vehicles within the network is strongly dependant on the ability to anticipate the individual displacement needs. In this context the aim of this study is to develop a new approach to determine the temporal profile of individual displacement needs. Contrary to the statistics techniques (Davis *et al.*, 1991 ; Rakha *et al.*, 1994) widely used in conventional transportation systems, which presupposes a stochastic system behaviour, the approach developed here is based on deterministic characteristic of individual displacement needs. In other words, each individual depending on its specific needs plans his/her displacements. However, the diversity and the interactions between the personal needs (Banos, 2001) can generate displacements that can not be entirely determined. For an activity center in an urban area, the individual mobility need expression is based on physical and human variables which are not readily identifiable and the interrelations between the variables are complex. In this study, similar to numerous science domains (Gleick, 1987), the non-linear analysis and the deterministic chaos theory will be used to evaluate and characterise the non stochastic behaviour of a complex system.

Section I presents the method utilized to analyze the time series of the individual mobility demand. Section II presents the actual analysis of the data in order to identify the presence of chaotic behaviour. Based on this information, section III presents the results of the predicted individual mobility expression. Sections IV and V deal with discussion elements and the application of the results.

I. Non-linear time series analysis method

In this study, non linear analysis techniques associated with chaotic phenomenon where applied to time series flows of persons exiting an activity center in the same manner that Nair et al. (2001), Frazier *et al.* (2004) et Shang *et al.* (2005) applied it to automobile flows on the highway. For an activity center in an urban area the need for mobility of an individual is expressed once the individual leaves the location. In this study, the exact time to the second, a person passed through the doors of a building in the city of Montreal was recorded during its opening hours for the summer season. Noting the exact time to the second permitted to generate time series on a 2 minute interval of individual displacement needs.

The aim of the first step in evaluating the time series is to reconstruct the embedding space of the system using the time series $\{x_i , i=1,...,N\}$. By using the time delay procedure, the dynamic system can be reconstructed into a d-dimensional vector series:

$$Y(t) = [s(t); s(t+T); s(t+2T); ...; s(t+(d-1)T)] \quad (1)$$

where **T** represents the time lag and **d** the embedding dimension.

This method is based on Takens's theorem (1981) which states that for sufficiently large **d,** the vector series Y(t) will reproduce the dynamic characteristics of the original series $\{x_i\}$. Moreover, the embedding space is equivalent to the phase space of the attractor and the evolution of the time $\{x_i\}$ corresponds to the dynamic

of the system studied. Furthermore, by defining the scalar data measurement s(t), it becomes possible to describe the system and study its properties.

Effective application of the time delay procedure is dependant on properly determining the **T** (time lag) and **d** (embedding dimension) values. The first minimum of the average mutual information function applied to a time series permits to graphically determine the value of the time lag T (Abarbanel, 1996). This function calculates using probability, the average amount of information shared by adjacent elements. Introducing the time lag allows to minimize the correlation that can exist between two adjacent elements caused by a large sampling interval rate.

The embedding dimension **d** is related to the state space dimension whereby the attractor of the system in question is in multidimensional projection (one attractor point correspond to solely one system's state). Cao's (1997) method which is based on the false nearest-neighbours procedure (Arbanel, 1996) permits to graphically determine the minimum embedding dimension **d** of the dynamic system defined by a time series.

The method used to determine the presence of chaotic behaviour in this study is the *Fourier power spectrum* calculation (Equation 2).

$$P(\omega) = \frac{1}{N^2}\left|\sum_{t=0}^{N-1} s(t)(e^{-i(2\pi/N)t\omega})\right|^2 \qquad (2)$$

P(ω) expresses the power spectrum, N is the number of points of the time series and s(t) is the scalar function expressed in the embedding space.

This spectrum analyzes the frequency characteristic peaks for periodic systems or irregular non periodic systems. The presence of irregular peaks, which is observed by broadband and broad peaks, is an indicator of a system having chaotic characteristics.

In order avoid that the signal noise be mistaken as having chaotic behaviour the *largest Lyapunov exponent* method (Equation 3) was applied to the time series.

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{N\Delta t}\sum_{t=o}^{N-1} \ln\left|\frac{s(t+\Delta t)-s'(t+\Delta t)}{s(t)-s'(t)}\right| \tag{3}$$

where λ_{max} represents the largest Lyapunov exponent; N represents the number of points in a time series; s(t) is the coordinates of the time series at time t expressed in the m dimension's embedding space; s'(t) is the coordinates of a distinct point close to s(t); Δt corresponds to the time lag T.

In a chaotic system, two initially close trajectory lines tend to diverge and the distance between the two increases exponentially. Lyapunov exponent corresponds to a divergence/convergence factor expressing the sensibility at the initial conditions of a dynamic system. Mathematically, if the largest Lyapunov exponent is positive, the system exhibits chaotic behaviour.

Contrary to stochastic systems, chaotic systems follow a deterministic behaviour that to some extent, allows to predict its evolution. In this study, the method utilized to predict the individual mobility demand is based on the attractor in the

state space of the system defined by the time series. Based on the local model principle (Abarbanel, 1996), the method selects, for an initial point $y(t_0)$, the k nearest trajectories on the attractor and the k nearest points of $y(t_0)$, one on each trajectory. The average k of the nearest neighbours corresponds to the value $y(t_0+dt)$ of the projected trajectory. The procedure is repeated considering the projected point as the new initial point. It takes into account the fact that the information is contained within the data and it can be used for short term predictions.

All data calculations were conducted using the *TSTOOL* functions developed at the Institute of physics at the Unversity of Gőttingen (Germany). The functions of *TSTOOL* are specific for analyzing non linear time series and are accessible through the *Matlab* software.

II. Embedding dimensions

Base on the data collected per second of the exact moment a person crossed the entrance door of a Montreal activity center, a time series corresponding to the aggregation of the number of individuals for a time interval of 2 minutes was constructed for the four days of observation (Figure 1).

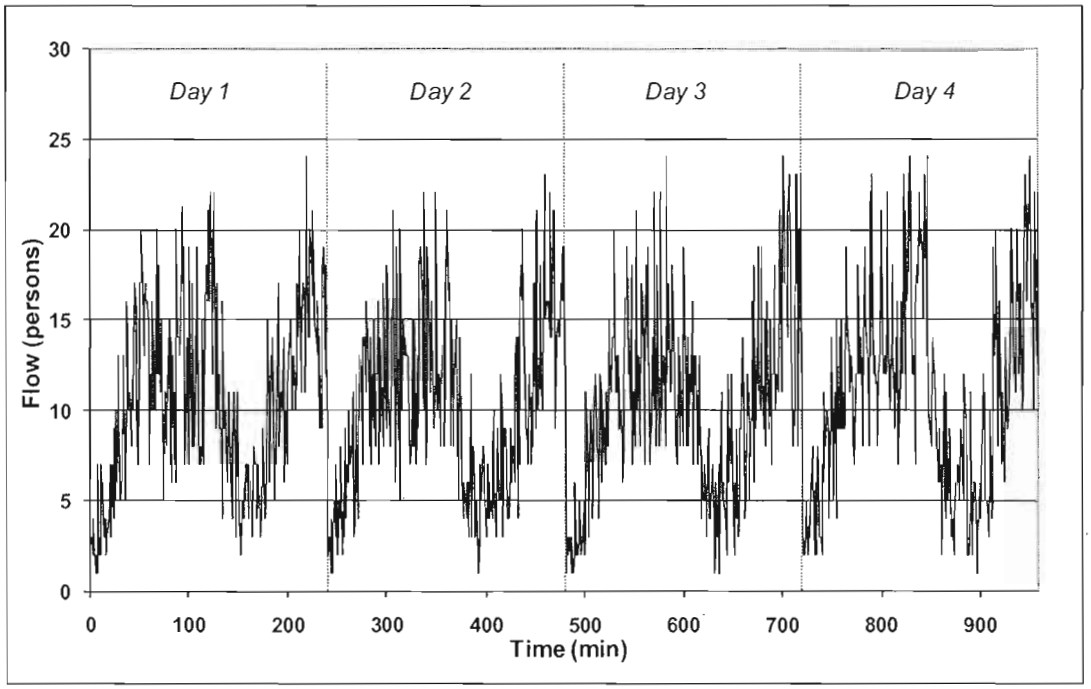


Figure 1 Time series of the number of persons per 2 minute interval for the four days of observation that crossed the entrance door.

It appears that this time series (Figure 1) follows a certain periodicity, therefore it can be considered as having non-stochastic behaviour.

In order to reconstruct the embedding space of the system (equation 1), the time delay procedure is used. The process involved in reconstructing the embedding space is based on two parameters, **T** (time lag) and **d** (embedding dimension). Applying the average mutual information function enables the construction of a graph that links the average quantity of information (bits) shared by two neighbouring values and the value of the time lag (Figure 2).

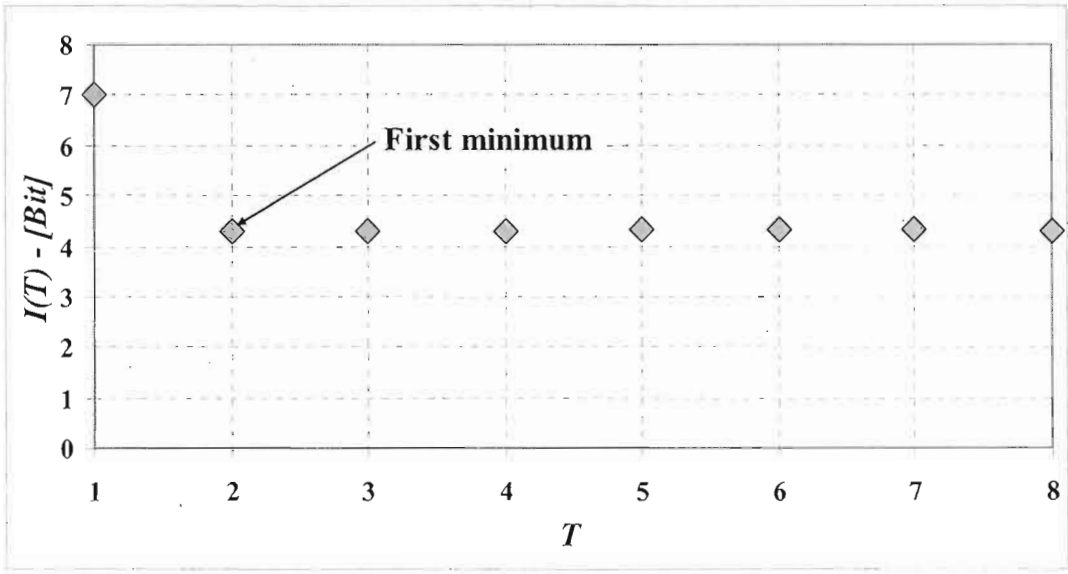


Figure 2 The average mutual information between neighboring values in function of the time lag.

The first minimum of the graph from Figure 2 appears at 2, this corresponds to 4 minutes when taking into account the time interval of 2 minutes between the values. Figure 3 graphically presents the results obtained when Cao procedure is applied to the time series.

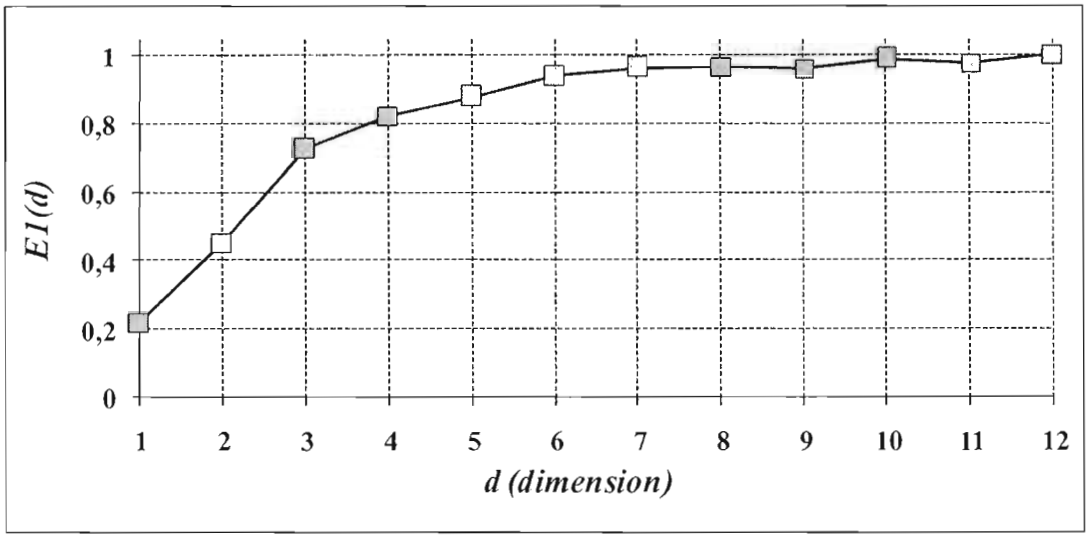


Figure 3 The minimum embedding dimension according to Cao procedure.

The minimum embedding dimension is graphically defined by the dimension value whereby the curve begins to level off, which in this case is equal to 7.

III. Presence of chaos analysis

The *Fourier power spectrum* (equation 2) and the calculated values of the *largest Lyapunov exponent* (equation 3), associated to the time series is for the activity center depicted in Figures 4 and 5 respectively.

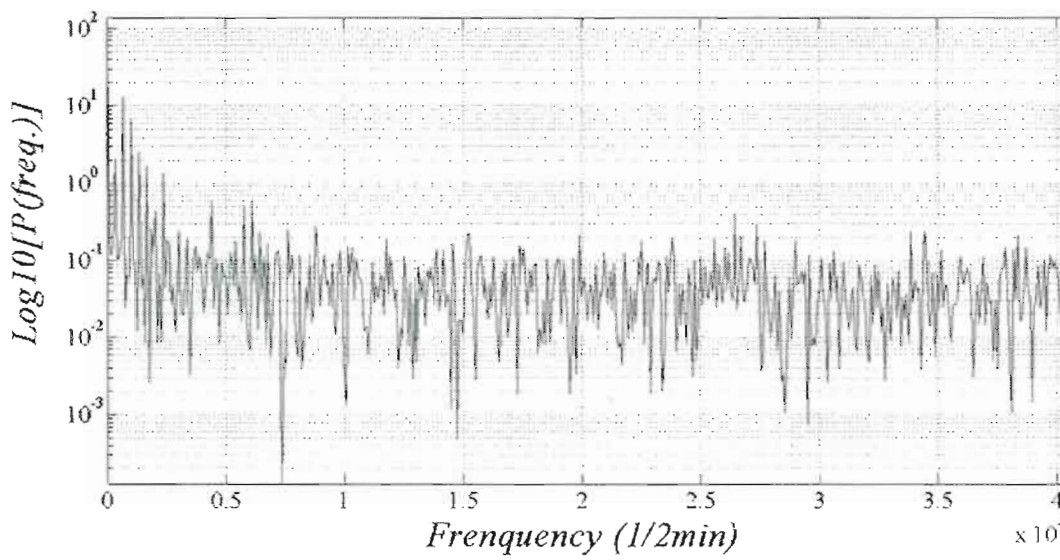


Figure 4 The Fourier power spectrum time series.

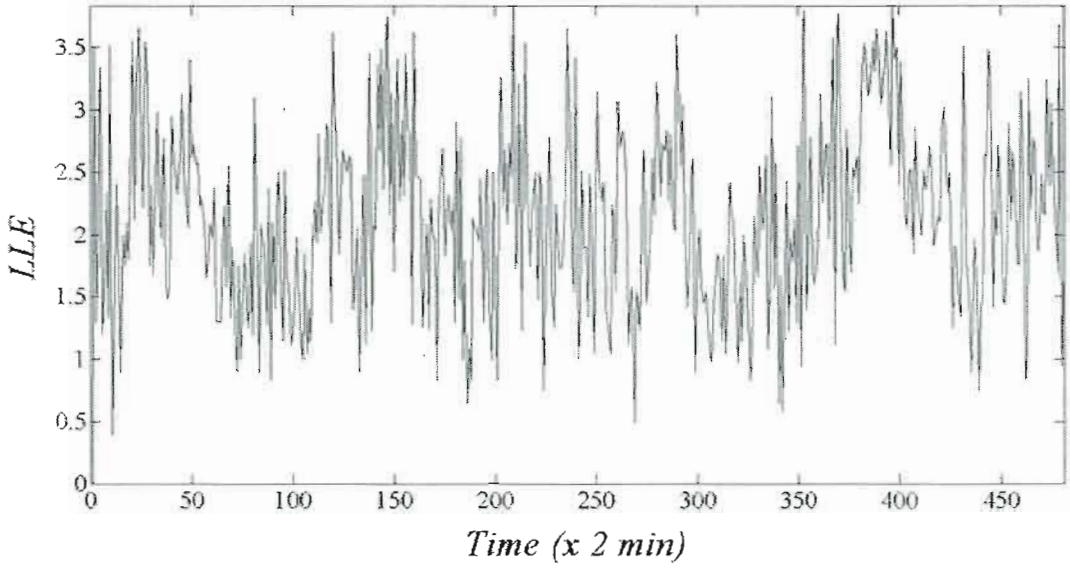


Figure 5 The largest Lyapunov exponent time series.

The irregularities (broadband) observed in the *Fourier power spectrum* and the positive value obtained (with the values averaging between 1 and 3.5) for the *largest Lyapunov exponent* (Figure 5) seem to indicate that the need for mobility of an individual behaves in the same fashion as a chaotic system.

IV. Prediction of the mobility expression

Beyond determining the presence of chaos, the interest of the processes associated with a chaotic system lies in predicting the system's behaviour based on the phase space having d dimension. Figure 6 presents the predicted values calculated by the local model principle of the last day based on the data from the first three days.

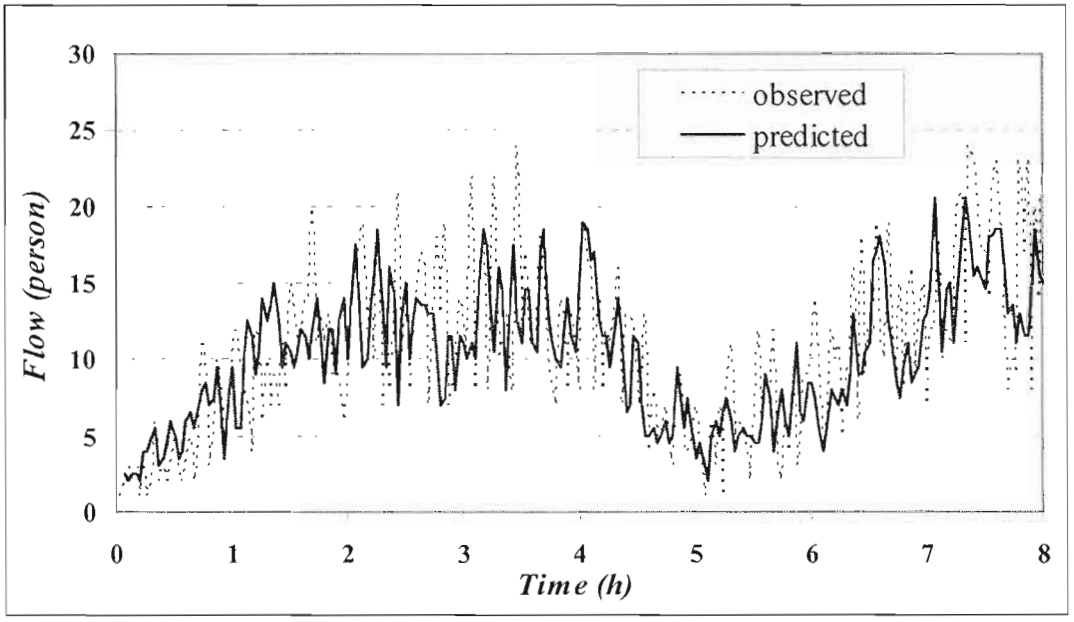


Figure 6 Comparison of the observed and predicted time series for the 4th day.

Figure 6 illustrates that the general behaviour of the predicted time series is similar to the observed time series. The total number of predicted people for one day is 8 units more than that of the total observed. Significant differences are observed for certain time intervals. These differences are due to the difficult surrounding the prediction of demand peaks, which could be explained by the bulk of the data which is approximately a dozen people (per 2 minute interval) which tends to amplify the effect of single values.

V. Discussion

Conventional public transportation operates on both pre-established schedules and lines and generates the following effects: waiting periods, frequent stops, different transportation modes to arrive at the destination and uncomfortable and crowded

conditions leading to negative perceptions by the user discouraging its use. Contrary to conventional public transportation, CTS offers flexibility through the use of an approach that is focused on individuality, allowing the user to decide the time of departure and as well as the route taken. By consequence, it seems logical to initiate a rupture in the present approach associated with defining mobility needs.

The statistic approach applies particularly well to analysis data stemming from an origin destination survey, a tool often used in conventional public transportation planning. However, this approach does not permit to express and characterize the dynamic of the individual needs whereby the equilibrium state of the need-resource system at a time "t" is dependant on the state of the system at time "t-1". Thus, by demonstrating that the individual demand as a deterministic characteristic, it becomes possible to dynamically structure the individual transportation system's response in function of the expression of displacement needs in time (auto-organisation property of the transportation system).

Due to the fact that CTS vehicles do not have a predetermined spatial-temporal position, different possible routes exist to move from one point to another in the network. One way to optimise their position to rapidly respond to the demand lies in utilizing the notions of thermodynamic probability and entropy. In this case, the maximum entropy approach allows to determine the vehicles distribution in the network, taking into account available information.

Finally, independent of the conceptual and theoretical approach presented, CTS like the *Serpentine* possesses structural and functional characteristics capable of

responding to individual displacement needs in an urban area. Its implementation and operation permits to collect actual data in real-time at different activity centers serviced by the transportation system and the preferred links between the different centers. Taking into account the deterministic characteristic of the individual needs, these values facilitate the comprehension of the dynamic needs and displacements in function of the elements that constitutes the global mobility system.

Conclusion

Contrary to mass transportation, which confines users, CTS are known to have the ability to respond to individual needs. The developed approach inserts itself in the desire to respond to this functional rupture in the urban mobility domain. Truly innovative, this approach allows to characterise the individual demand, in a given area to anticipate the effective needs and also to maximise the response of the system by assigning dynamically a spatial and temporal position to the vehicle in the network. More fundamentally, the approach has permitted to seize the mobility demand as discrete events where the occurrence in time follows a deterministic behaviour. This behaviour inserts itself in an embedding space at seven dimensions, whereby these can be expressed by tangible parameters and become the global reference space to express the displacement demand at different activity poles for the area studied. This avenue will facilitate the understanding of the CTS benefits in global mobility supply; the only way to increase the fraction of public transportation mode usage.

References

Abarbanel, H.D.I. 1996. *Analysis of Observed Data*, Spinger-Verlag, New-York.

Banos, A. 2001. *Le lieu, le moment, le mouvement : pour une exploration spatio-temporelle désagrégée de la demande de transport en commun en milieu urbain.* Ph.D. thesis, Université de Franche-Comté, Besançon (France).

Cao, L. 1997. Practical Method for Determining the Minimum Embedding Dimension of a Scalar Time Series. *Physica D* 110:43-50.

Davis, G.A. and Nihan, N.L. 1991. Noparametric regression and short-term freeway traffic forecasting. *Journal of Transportation Engineering*, 177(2):178-88.

Frazier, C. and Kockelman, K.M. 2004. Chaos Theory and Transportation Systems. presented at *83rd Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington D.C., January.

Gleick, J. 1989. *Chaos: Making a new science*. Viking Press, New York.

Hilborn, R.C. 2001. *Chaos and Nonlinear Dynamics: An Introduction for Scientists and Engineers*, 2nd Ed., Oxford University Press.

Kantz, H. and Schreiber, T. 1994. *Nonlinear Time Series Analysis.* Cambridge University Press (1994).

Lowson, M. 2003. A New Approach to Effective and Sustainable Urban Transport. *Transportation Research Record* 1838:42-49.

Nair, A.S., Jyh-Charn, L., Laurence, R. and Saurabh, G. 2001. Non-Linear Analysis of Traffic Flow. *Proc. of the 4th International IEEE Conference on ITS*, Oakland, August.

Rakha, H. and Van Aerde, M. 1994. Statistical Analysis of Day-to-Day Variations in Real-Time Traffic Flow Data. *Transportation Research Record* 1510:26-34.

Saugy, B. 2001. The Serpentine – sustainable urban mobility. presented at *The tenth international conference on management of technology*, Lausanne (Switzerland), March 2001.

Szillat, M.T. 2001. *A Low-level PRT Microsimulation*, Ph.D. thesis, Université de Bristol, England (2001).

ANNEXE B

ENTROPY THEORY FOR A NEW APPROACH TO ROUTE ASSIGNMENT FOR CYBER TRANSPORTATION SYSTEMS

Mathias Glaus[1], Jacques Bourgois[2], Robert Hausler[1] and Samir Lasfar[1]

[1] *Ecole de Technologie Supérieure, Département de la construction, STEPPE-ETS, 1100 Notre-Dame O., Montréal, Canada H3C 1K3 and*

[2] *Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Centre SITE, 158 Cours Fauriel, 42023 St-Etienne cedex 2, France.*

Article soumis

Journal of Advanced Transportation 2007

Keywords: Urban Transportation, CTS, Entropy, Route Assignment, Network.

Abstract

One of the properties of Cyber Transport Systems (CTS) is to allow vehicles to choose between all the routes that make up a given road network, so as to move passengers from one point to another without intermediate stopping or transfers. Based on this functional property and the principle of centralised fleet management, this paper presents by way of an example a route assignment approach based on the principle of maximum entropy. According to the notion of equiprobability in entropy, all sections in a grid network have *a priori*, equal probabilities of being taken by a vehicle. By taking into consideration the starting and end points requested by travellers, application of the maximum entropy principle leads to an optimised distribution of vehicles within the network, hence avoiding traffic jams while still accommodating for individual trip requirements.

Introduction

Shannon's entropy (Shannon and Weaver, 1948) has been shown by Tomlin & Tomlin (1968) to play a role in the modelling of vehicle flow in a road network. Jaynes' maximum entropy principle developed in 1957 (Jaynes, 1957) has since been modified to allow determination, *a posteriori*, of the normal distribution of vehicles on each section of a road network when no information is available regarding the system state (Das *et al*, 2000).

In the case of a cyber transport system (CTS), the vehicles have the ability to follow any route in a grid network in order to efficiently respond to passengers needs (ATRA, 2003). This conceptual scheme can be related to a road network. However, for the whole transport system, each request for a vehicle by a passenger enables the association of an origin and a destination to each vehicle over the whole transport system. From the perspective of global fleet management (Szillat, 2001), the determination of the optimum route must be made based not only on the origins and destinations of each passenger, but also based on the level of congestion of each road section.

According to the notion of equiprobability in entropy (all sections in a grid network have, *a priori*, equal probabilities of being taken), the vehicle flow distribution determined by maximum entropy is that which maximises the spread of vehicles over all sections of the network, considering the constraints imposed by the information available. It is in this context that the application of the maximum

entropy principle with regards to the route planning of a fleet of vehicles in a CTS is presented in this paper. This concept is developed based on the optimisation of the distribution of vehicles over the network, while considering the constraints imposed by the network configuration and information regarding origins and destinations of the passengers prior to travel.

Sections I & II introduce the general maximum entropy principle as applied to a system, followed by its application to a road network. Section III presents, through the use of an example, the application of the maximum entropy principle to optimal route selection for CTS vehicles where, for each destination, the origins are known. Finally, sections IV and V are a discussion of the results of this work and conclusion.

I. Maximum entropy principle

Consider a system consisting of N elements (molecules of gas, cells of an organism, etc.), classified into n classes, with N_i (i=1, 2, ..., n) being the occupation number of the ith class. The macrostate of the system is given by the set of occupation numbers $A_n = \{N_1, N_2, ..., N_n\}$. The distribution of elements among the different classes possesses a level of disorder whose statistical measure is given by the system entropy as follows:

$$S = -K \sum_{i=1}^{n} N_i \ln N_i \tag{1}$$

where K represents the Boltzmann constant ($1{,}381 * 10^{-23}$ J/K).

According to the second law of thermodynamics, which defines entropy as being a function of state, an isolated system will always tend towards a state of greater entropy. According to the Boltzmann entropy (Chakrabarti and De, 1997), the thermodynamic evolution of a system towards equilibrium corresponds to the path from an initial state to a statistically more probable state, where all possible micro-states leading to a given macro-state are equally probable. Hence, the most probable configuration of a system is that which exhibits maximum entropy for a given macro-state.

First developed by Jaynes (1957) and building on Shannon's information theory (Shannon, 1948), the maximum entropy principle is a way of optimising the distribution of elements in a system where information regarding these elements is incomplete.

$$S = -\sum_{i=1}^{n} p_i \ln p_i \tag{2}$$

where p_i represents the probability that an element of N belongs to class N_i.

Subject to linear constraints:

$$\sum_{i=1}^{n} p_i f_i^{(k)} = f_k \quad (k = 1, 2, \ldots, m)$$ where f_k is the weighted average of $f_i^{(k)}$. (3)

$$\sum_{i=1}^{n} p_i = 1 \tag{4}$$

The Lagrange multiplication method (Jaynes, 1957) allows the determination of p_i through the maximisation of entropy (equation 2), subject to constraints (3) and (4). Note that in equation 2 there is no equivalent of the Boltzmann constant (1). In this case, the entropy S is expressed in units of information measurement (bits). Relation (2) can also be expressed in terms of N_i:

$$S = -\sum_{i=1}^{n} N_i \ln N_i \tag{5}$$

This principle has been largely expanded and applied in a number of different fields of science and technology (Wilson 1970; Qu *et al.*, 2003, Kapur 1990). In the field of transport planning the maximum entropy principle has been applied more specifically to trip distribution research (Spiess, 1987; Wang *et al.*, 2006).

II. Maximum entropy and looped traffic networks

Das *et al.* (2000) showed that for the case of determining the traffic flow in a road network the formulation of Jaynes' maximum entropy principle can be modified and simplified in order to avoid the need to determine the Lagrange multipliers.

Application of Kirchhoff's junction rule allows the expression of N_i (i = 1, 2, ..., m) as a function of N_i (i = m+1, m+2, ..., n) corresponding to *m-n* independent system variables. Hence the entropy equation (5) can be expressed as follows:

$$S = -\sum_{i=m+1}^{n} N_i \ln N_i - \sum_{i=1}^{m} \Phi_i \ln \Phi_i \tag{6}$$

where n is the number of classes and m the number of constraints within the system. Φ_i (i = 1, 2, ..., m) is the relation expressing each N_i (i = 1, 2, ..., m) as a function of N_i (i = m+1, m+2, ..., n).

In order to maximise entropy, equation (6) must satisfy the following condition:

$$\frac{\partial S}{\partial N_j} = 0 \quad (j = m+1, m+2, ..., n) \tag{7}$$

Thus enabling equation (6) to be expressed as follows:

$$N_j \prod_{i=1}^{m} \Phi_i^{(\partial \Phi_i / \partial N_j)} = \exp\left[-\left\{ 1 + \sum_{i}^{m} \frac{\partial \Phi_i}{\partial N_i} \right\} \right] \quad (j = m+1. m+2, ..., n) \tag{8}$$

The expression (8) corresponds to a system of (n-m) equations with (n-m) unknowns which can be solved to obtain initially the values of N_i (j = m+1, m+2, ..., n), then using the relations Φ_i (i = 1, 2, ..., m) to obtain the values of N_i (i = 1, 2, ..., m).

Consider a system corresponding to a looped road network composed of 12 road sections and 9 junctions (nodes). Information available is the number of vehicles entering the network at A and B, and exiting at C and D, as well as the direction of flow of each road section (Figure 1). Maximisation of the system entropy, applying

Kirchhoff's junction rule and equation (8) allows the determination of the most probable distribution of vehicles for each section of the network (Figure 2).

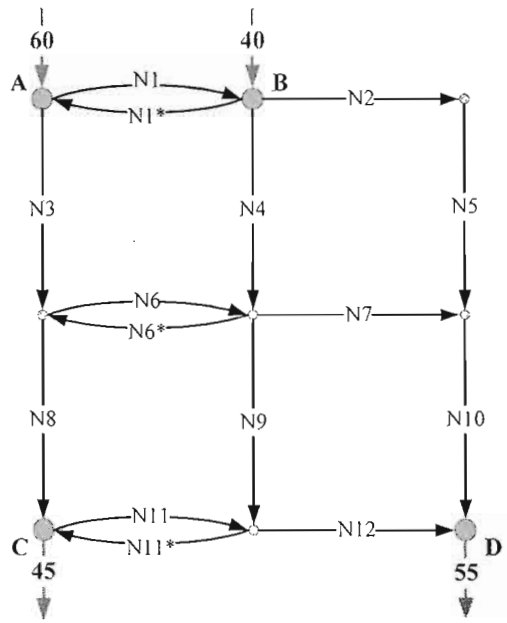


Figure 1 : Schematic road network with two entrances and two exits

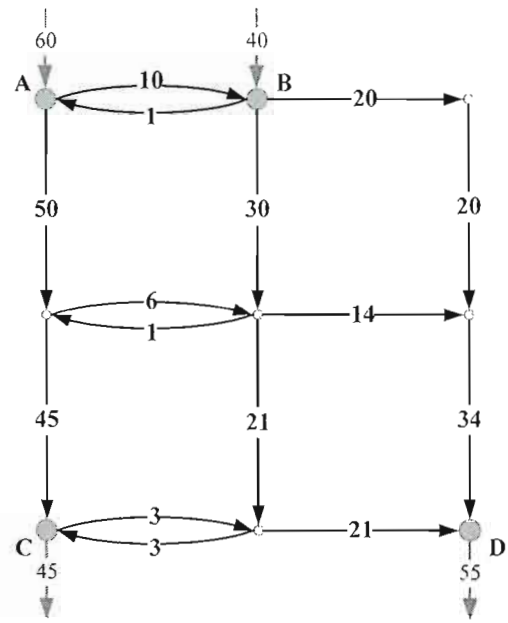


Figure 2 : Traffic flow as determined by the maximum entropy method for a road network

Considering the flow distribution for each section of the looped road network, the correspondence between the entrances (origins) and exits (destinations) is unknown. In other words, we have no knowledge of the origins of the vehicles exiting via the exits C & D. For example, the 20 vehicles on section N_2 could originate either entirely from the 40 vehicles entering at B, or partially from the 10 vehicles from section N_1.

III. Entropy and cyber transportation systems networks: Case study

Within the operational principles of CTS, there is a differentiation of the origin for each destination. Actually, the CTS fleet management system coordinates the fleet of vehicles depending on the individual passenger's requirements, expressed in terms of an origin – destination couple (O-D). Hence, vehicles located at a node of origin are assigned a destination. This information takes the form of an O-D matrix and corresponds, in mathematical terms, to additional constraints applied to the system. However, this information is not sufficient to completely determine the system state since in a looped network there are several possible equivalent routes to satisfy the transportation needs of passengers.

In the maximum entropy procedure for determining vehicle flow, differentiating the origins for each destination (a property of CTS) is interpreted mathematically by the application of Kirchhoff's junction rule for each origin separately.

Kirchhoff's junction rule:

For each of the *j* nodes in the network: $\sum N^{x}_{input} = \sum N^{x}_{output}$ (9)

where *x* is the identification of the origin. The relation (9) enables the definition of a system comprising (*j***x*) equations, where *j* represents the number of nodes and *x* the number of origins.

Consider, similarly to the road network discussed above, a CTS network composed of 12 sections and 9 crossings with 2 entrances (A & B) and 2 exits (C & D). The

principle of differentiating origins can be represented by breaking the network down into superimposed sub-networks specific to each origin (Figure 3).

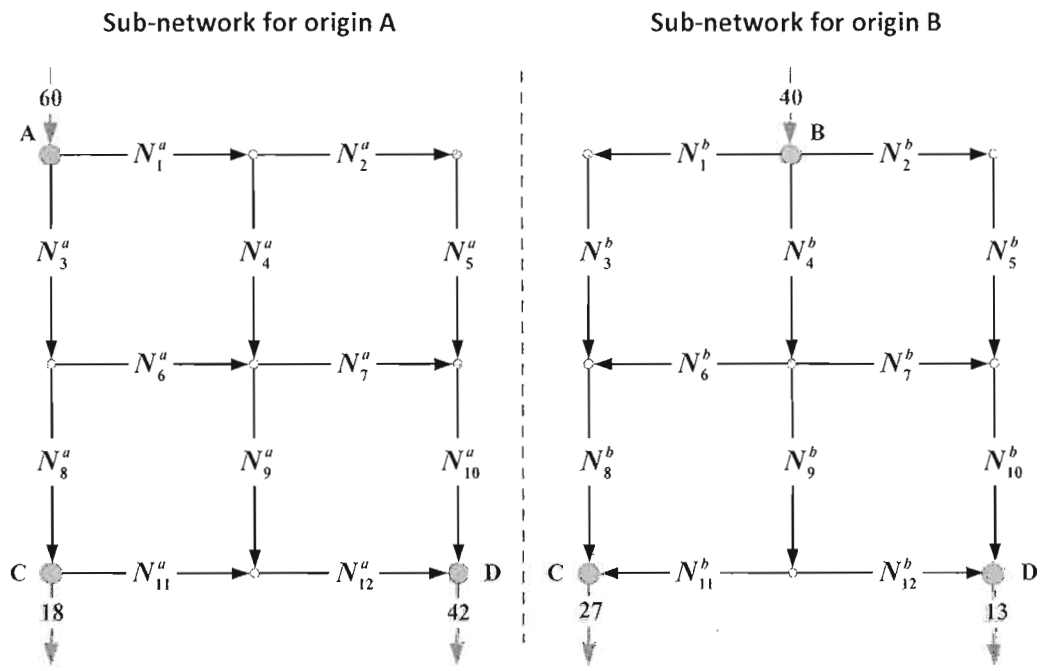


Figure 3 Breaking down the system into sub-networks associated with each origin

Through the application of Kirchhoff's junction rule each sub-system, which is composed of 12 unknowns and 8 constraints, can be expressed by a system of 8 independent equations (Φ_i) with 4 variables. Focussing on the 4 variables: $N_1; N_4; N_7; N_{11}$, the series of equations Φ_i^a et Φ_i^b can be written as follows:

$$
\begin{aligned}
N_2^a &= N_1^a - N_4^a & N_2^b &= 40 - N_1^b - N_4^b \\
N_3^a &= 60 - N_1^a & N_3^b &= N_1^b \\
N_5^a &= N_1^a - N_4^a & N_5^b &= 40 - N_1^b - N_4^b \\
N_6^a &= 60 - 18 - N_1^a - N_{11}^a & N_6^b &= 27 - N_1^b - N_{11}^b \\
N_8^a &= 18 + N_{11}^a & N_8^b &= 27 - N_{11}^b \\
N_9^a &= 42 - N_1^a + N_4^a - N_7^a - N_{11}^a & N_9^b &= 13 - 40 + N_1^b + N_4^b - N_7^b + N_{11}^b \\
N_{10}^a &= N_1^a - N_4^a + N_7^a & N_{10}^b &= 40 - N_1^b - N_4^b + N_7^b \\
N_{12}^a &= 42 - N_1^a + N_4^a - N_7^a & N_{12}^b &= 13 - 40 + N_1^b + N_4^b - N_7^b
\end{aligned}
\tag{10}
$$

Maximum entropy:

The maximum entropy function (6) is an example of a relation for which the principle of superposition does not apply : $\max S^A + \max S^B \neq \max S^{system}$. In order to calculate $\max S^{system}$, the number of vehicles travelling in the same direction on a section of the whole network must be considered. This can be summarised by considering the sum of the vehicles travelling on each section ($N_i^{a,b}$) as variables that allow the maximization of the entropy of the global system:

$$N_i^{a,b} = N_i^a + N_i^b \qquad (i = 1, 2, \ldots, 12) \tag{11}$$

The physical reality of relation (11) is the fact that vehicles from different origins occupy the same roadway. In fact, the two traffic directions between junctions are considered as being independent, as illustrated in Figure 4.

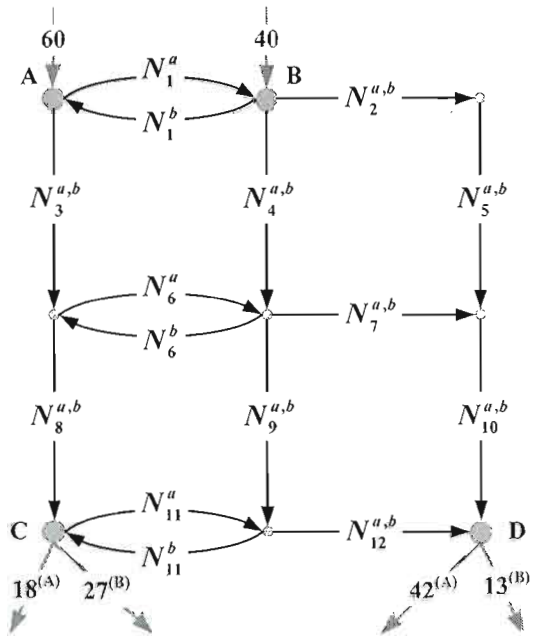


Figure 4 A representation of the global system with 2 entrances and differentiation between origins

Taking (11) into consideration, Φ_i^a and Φ_i^b (10) make it possible to write down the independent equations for the global system (Figure 4):

$$
\begin{aligned}
N_2^{a,b} &= 40 + N_1^a - N_1^b - N_4^{a,b} \\
N_3^{a,b} &= 60 - N_1^a + N_1^b \\
N_5^{a,b} &= 40 + N_1^a - N_1^b - N_4^{a,b} \\
N_6^a &= 60 - 18 - N_1^a - N_{11}^a \\
N_6^b &= 27 - N_1^b - N_{11}^b \\
N_8^{a,b} &= 18 + 27 + N_{11}^a - N_{11}^b \\
N_9^{a,b} &= 42 + 13 - 40 - N_1^a + N_1^b + N_4^{a,b} - N_7^{a,b} - N_{11}^a + N_{11}^b \\
N_{10}^{a,b} &= 40 - N_1^a - N_1^b - N_4^{a,b} + N_7^{a,b} \\
N_{12}^{a,b} &= 42 + 13 - 40 - N_1^a + N_1^b + N_4^{a,b} - N_7^{a,b}
\end{aligned}
\tag{12}
$$

From relation (8) it is possible to calculate the values for $N_1^a; N_1^b; N_4^{a,b}; N_7^{a,b}; N_{11}^a; N_{11}^b$ initially, according to the principle of maximum entropy for the global system. The remaining unknowns can be calculated using the relations in (12). The loads calculated for each section are shown in Figure 5. The sections drawn as a dashed line identify those whose sub-network loads have been determined. The results displayed in Figure 5 correspond to the distribution of vehicles on the various sections which make up the global network according to the principle of maximum entropy. At this point a comparison between Figure 5 and Figure 2 shows that although the values at the entrances (A & B) and exits (C &D) are the same, it is evident that the differentiation between origins for each destination has had an effect on the distribution of vehicles over the whole network.

At this point there are a number of sections for which the vehicle origins remain unknown (solid lines in Figure 5). For the part of the network for which the loads on the sub-networks are undetermined, the principle of maximum entropy can be applied in order to determine the most probable distribution. The sub-system described is shown in Figure 6.

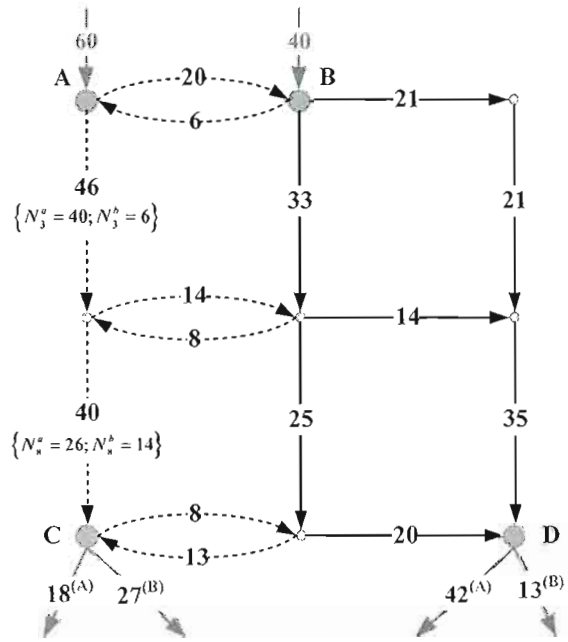


Figure 5 Results of vehicle flows as calculated by the maximum entropy principle for a global CTS network

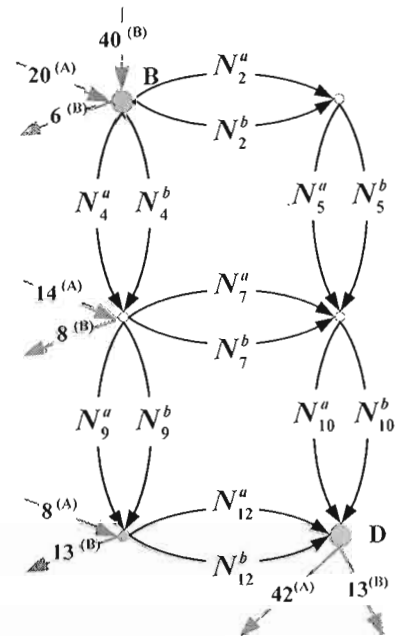


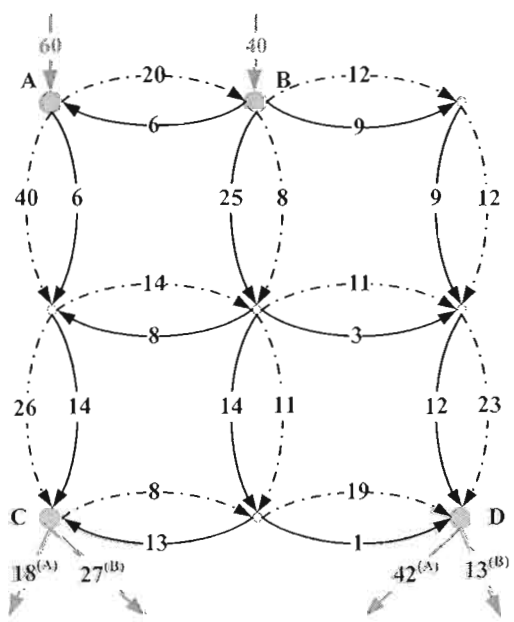
Figure 6 Sub-system for which vehicle origin remains undetermined

Applying Kirchhoff's junction rule to the sub-network A, which contains 7 unknowns and 5 constraints, it is possible to express the sub-network in terms of a system of 5 independent equations (Φ_i^a) as a function of 2 variables ($N_4^a; N_7^a$). The 7 unknowns in the sub-network B can likewise be expressed in terms of 7 independent equations (Φ_i^b) as a function of the 2 same variables through relation (10), which links the two sub-networks and assures the consistency of the global distribution values.

$$
\left.\begin{aligned}
N_2^a &= 20 - N_4^a \\
N_5^a &= 20 - N_4^a \\
N_9^a &= 14 + N_4^a - N_7^a \\
N_{10}^a &= 20 - N_4^a + N_7^a \\
N_{12}^a &= 14 + 8 + N_4^a - N_7^a
\end{aligned}\right\} \Phi_i^a
$$

$$
\left.\begin{aligned}
N_2^b &= 21 - (20 - N_4^a) \\
N_4^b &= 33 - N_4^a \\
N_5^b &= 21 - (20 - N_4^a) \\
N_7^b &= 14 - N_7^a \\
N_9^b &= 25 - (14 + N_4^a - N_7^a) \\
N_{10}^b &= 35 - (20 - N_4^a + N_7^a) \\
N_{12}^b &= 20 - (14 + 8 + N_4^a - N_7^a)
\end{aligned}\right\} \Phi_i^b \qquad (13)
$$

Applying relation (8) to obtain the values of the two variables $N_4^a; N_7^a$ and using the relations in (13) allows the resolution of all the unknowns in the sub-system. Figure 7 shows the results for the whole network.



Sub-network A (*dashed lines*)	Sub-network B (*solid lines*)
$N_1^a = 20$	$N_1^b = 6$
$N_2^a = 12$	$N_2^b = 9$
$N_3^a = 40$	$N_3^b = 6$
$N_4^a = 8$	$N_4^b = 25$
$N_5^a = 12$	$N_5^b = 9$
$N_6^a = 14$	$N_6^b = 8$
$N_7^a = 11$	$N_7^b = 3$
$N_8^a = 26$	$N_8^b = 14$
$N_9^a = 11$	$N_9^b = 14$
$N_{10}^a = 23$	$N_{10}^b = 12$
$N_{11}^a = 8$	$N_{11}^b = 13$
$N_{12}^a = 19$	$N_{12}^b = 1$

Figure 7 Vehicle distributions as a function of the origins and maximising global network entropy

Separating the loads on each section according to vehicle origin allows the determination of the number of vehicles that take different routes to get from origin to destination. Thus, Figure 8 illustrates the distribution of vehicles for different routes as a function of the constraints imposed by the network configuration.

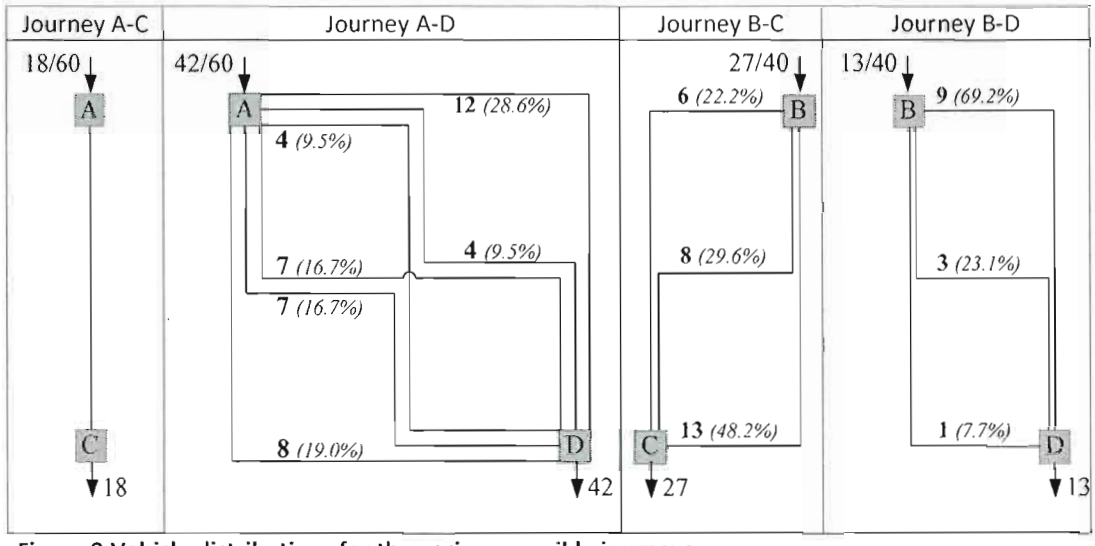


Figure 8 Vehicle distributions for the various possible journeys

It can be seen from Figure 8 that the number of vehicles for each different journey is not distributed proportionally. As such, the number of vehicles for a given journey depends on how each section that makes up that journey is shared between the other journeys over the network.

IV. Discussion

The procedure demonstrated above for a network consisting of 12 sections and 9 junctions with 2 entrances and 2 exits can be generalised for any given looped

network. Indeed, the solution for a given network can be obtained by following these 5 steps:

Step 1: Apply Kirchhoff's junction rule to each network entrance separately (relation 9)

Step 2: Transform the relations derived from step 1 so as to express all the unknowns in terms of independent variables (relation 10)

Step 3: For each section, sum the variables that express vehicle flow in the same direction. This allows the definition of some new variables (relations 11 & 12)

Step 4: Maximise system entropy using the new variables defined in the previous step (relation 8, Figure 5)

Step 5: In the case where the final system of equations is hyperstatic, the unresolved values can be found by applying the maximum entropy principle to determine the flows over the different sections for each origin (relation 13, Figure 7).

In the case of a journey by automobile, the driver chooses the route that he considers to be the fastest (Daganzo, 1977) to reach his destination, while being subjected to the phenomenon of traffic jams. Under such conditions, network equilibrium is reached *a posteriori* of congestion incidents through information transmitted earlier (traffic queues, information panels, radio broadcasts, etc.). In the case of a CTS, the route for each vehicle is assigned by the system. Hence, the capacity of associating an origin and a destination for all vehicles in the network at the moment of the request enables the optimisation of vehicle flow through the network. Thus, modelling vehicle flow by means of the maximum entropy principle

allows journeys to be planned that not only satisfy the passenger's travel requirements but also maintain system equilibrium and network fluidity.

The procedure has been presented through the use of a theoretical road network for which the different routes from one point to another on the network were of equal distance and hence equal duration. In the case of an urban transport network, distances will vary appreciably depending on the route taken. In this case it would be interesting to establish an acceptable difference limit in order to classify 2 different routes as being similar from a customer satisfaction perspective.

Conclusion

This paper has shown that a CTS network cannot be considered as a special case of a road network. As such, although the mode of travel in a CTS resembles that of an automobile, the maximum entropy approach as applied to road networks must be adapted to the operational specifics of CTS networks. Hence, the principle of maximum entropy has allowed the development of an approach for determining vehicle routes over a CTS based on optimising vehicle distribution with the constraint of satisfying individual passengers' travel needs (origin – destination). This approach corresponds perfectly with individual mobility in urban areas, more specifically in city centres, where travel needs are often of the "multiple-multiple" type (multiple origins going to multiple destinations). In this context, the approach proposed in this paper shows that CTS networks are particularly well adapted to respond to individual travel requirements. As such, neither conventional public transit systems (subway, bus, train), whose carriages are bound by a fixed route,

nor the automobile, whose route is determined by the individual, are able to assure a sound management of all individual travel needs. In conclusion, the application of thermodynamics and, in particular, the principle of entropy shows the potential usefulness of developing new approaches to traffic planning based on system equilibrium while taking into consideration each network component.

References

ATRA (2003). *Personal Automated Transportation: Status and Potential of Personal Rapid Transit*. Main Report of the Advanced Transit Association. Palo Alto (California). 37p.

Chakrabarti, C.G. and De, K. 1997. Bolzman-entropy: Generalization and Application. Journal of Biological Physics, 23(3): 163-170

Daganzo, C.F. 1977. Some Statistical Problems in Connection with Traffic Assignment. *Transportation Research*, 11(6):385-389

Das, N.C., Chakrabarti, C.G. and Mazumder, S.K. 2000. Traffic Network and Distribution of Cars: Maximum-Entropy Approach. *Journal of Transportation Engineering*, 126(1):89-92

Jaynes, E.T. 1957. Information Theory and Statistical Mechanics. *Physical Review*, 106(4):620-630.

Kapur, J.N. 1990. *Maximum Entropy Models in Science and Engineering*. Wiley Eastern, New Dehli.

Tomlin, J. A., and Tomlin, S. G. (1968). Traffic distribution and entropy. *Nature,* 220:97–99.

Shannon, C.F. 1948. Mathematical Theory of Communication. *Bell System Technical Journal*, 27:379–423,623-656.

Spiess, H. 1987. A Maximum Likelihood Model for Estimatings Origin-Destination Matrices. *Transportation Research, Part B: Methodological*, 21(5):395-412.

Szillat, M.T. 2001. *A Low-level PRT Microsimulation*, Ph.D. thesis, University of Bristol, England (2001).

Wang, D.H., Yao, R.H. and Jing, C. 2006. Entropy Models of Trip Distribution. *Journal of Urban Planning and Development*, 132(1): 29-35

Wilson, A.G. 1970. *Entropy in Urban and Regional Modelling*. Pion, London.

ANNEXE C

APPLICATION OF THE PRINCIPLES OF THERMODYNAMICS TO VEHICLE CONFIGURATION IN A CTS NETWORK

Mathias Glaus[1], Robert Hausler[1], Jacques Bourgois[2] and Samir Lasfar[1]

[1] *Ecole de Technologie Supérieure, Département de la construction, STEPPE-ETS, 1100 Notre-Dame O., Montréal, Canada H3C 1K3 and*

[2] *Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne, Centre SITE, 158 Cours Fauriel, 42023 St-Etienne cedex 2, France.*

Article soumis

Journal of Advanced Transportation 2007

Keywords: Vehicle, Network, Thermodynamics, Enthalpy, Entropy, Mobility, Satisfaction.

Abstract

Natural systems are able to adapt to changes by evolving towards a new state of equilibrium, while minimizing the energy involved. Analogous to this, the configuration of vehicles in a CTS network changes according to the requirements and evolves towards a new state of equilibrium that is able to satisfy travel needs. Based on this, the paper investigates the transposition of the principles of thermodynamics to CTS through a process of deductive reasoning. According to the proposed procedure, the principles of enthalpy and entropy can be used to formulate a relationship between travel needs and the system state. Moreover, the use of thermodynamics clarifies the idea of a vehicle configuration within a network based on criteria that are characterized by the global system state rather than on the individual processing of requests based on criteria of proximity and distance to be covered. From a wider perspective of urban mobility, the proposed procedure provides clarification of the preference of the automobile over conventional mass transit systems.

Introduction

A Cyber Transport System (CTS) is capable of offering great flexibility by means of its functional characteristics. In a gridded network of pathways, any route can be assigned to the vehicles to ensure efficient movement of passengers (ATRA, 2003). One of the particularities of CTS is its ability to allocate *a priori* any available vehicle to fulfil a request made at a specified time and place. The most logical approach is to assign the closest free vehicle to each successive request. However, the result of this mode of operation is a possible imbalance in the availability of vehicles within the network when the number of departures and arrivals for each station is imbalanced. Evidently, it is necessary to redistribute the available vehicles towards stations at the departure points of the routes so as to minimise the waiting times of future requests made to the various stations in the network (Andréasson, 1997; Andréasson, 2003).

This paper presents the application of the principles of the thermodynamics of natural processes in order to gain a better understanding of personal mobility systems. Applied to CTS, the procedure is based fundamentally on the ability of natural systems to adapt to changes by evolving or by transforming themselves so as to reach a new state of equilibrium, while minimizing the energy involved. Section I presents the basic principles of classical thermodynamics as applied to natural systems. Section II presents the transposition of these principles to a CTS through the use of deductive reasoning. Finally, Section III discusses the contribution of this work not only to the understanding of mobility systems, but

also in a more general perspective, the satisfaction of the travel needs of individuals.

I. Background

Thermodynamics involves the study and description, on a macroscopic scale, of the evolution or transformation of matter or energy through consideration of variations between system states (Kestin, 1979). Each system is defined by variables describing its state, for example: n (number of elements in the system), P (pressure), V (volume) and T (temperature).

First principle : Enthalpy

According to the first law of thermodynamics, the internal energy U of an isolated system (no exchange with the exterior) remains constant, but can be transformed. Accordingly, the variation of the internal energy (ΔU) between two states of the system are caused by variations of heat (ΔQ) and work (ΔW) that are supplied by the exterior. By considering a system at constant pressure, the change in work done (ΔW) is equal to the product of the pressure and the change in volume (P*ΔV). Hence, the change in internal energy can be expressed as in equation (1).

$$\Delta U = Q - P\Delta V \qquad (1)$$

Enthalpy (H) is a function of state and can be defined as the sum of the internal energy (U) and the product of the pressure and volume (P*V). At constant pressure, change in enthalpy can be expressed as in equation (2).

$$\Delta H = \Delta U + P\Delta V \qquad (2)$$

The addition of equations (1) & (2) produces equation (3), which states that the change in enthalpy (ΔH) is equal to the change in heat supplied to the system by the exterior (Q).

$$\Delta H = Q \qquad \text{(expressed in Joules)} \qquad (3)$$

If the change in enthalpy between two system states is positive, the transformation is endothermic, as opposed to a negative variation, which is exothermic. In most natural systems, pressure can be considered to be constant, and enthalpy becomes one of the principal parameters for characterizing natural phenomena.

Second principle: Entropy

Entropy (S) is a measure of the degree of disorder of a macroscopic system. According to this principle, a system tends to evolve towards a state of greater entropy. Boltzmann entropy (Chakrabarti and De, 1997) states that the thermodynamic evolution of a system towards equilibrium corresponds to the progression from an initial state to a statistically more probable state, where all possible micro-states leading to a given macro-state are equally probable. Hence, the most probable configuration of a system is that which exhibits maximum entropy for a given macro-state.

$$S = k \log W \tag{4}$$

W represents the total number of microscopic states possible in the system (number of different constitutions or configurations) and k represents Boltzmann's constant ($1{,}381*10^{-23}$ J/K).

For a system comprised of N elements (molecules of gas, cells of an organism, etc.), classified into n classes, with N_i (i=1,2, ..., n) being the occupation number of the ith class. The macrostate of the system is given by the set of occupation numbers A_n = $\{N_1, N_2, ..., N_n\}$. The distribution of elements among the different classes possesses a level of disorder whose statistical measure is given by the system entropy according to equation (5).

$$S = -K \sum_{i=1}^{n} N_i \ln N_i \tag{5}$$

Between two successive system states, the transformation happens (spontaneous transformation) if the change in entropy (ΔS) is greater than zero. The relation between variation in entropy and enthalpy can be expressed according to equation (6).

$$\Delta S_{system} > \frac{\Delta H}{T} \quad \text{(expressed in J/K)} \tag{6}$$

T represents the temperature in degrees Kelvin (K).

During a reversible transformation, changes happen by passing through a series of system states in quasi-static equilibrium (transformation without dissipative heat generation). In the case of a reversible transformation, the change in entropy (ΔS) is proportional to the change in enthalpy (ΔH) according to equation (7).

$$\Delta S_{system} = \frac{\Delta H}{T} \qquad \text{(expressed in J/K)} \qquad (7)$$

In the case of a reversible process, the difference between the magnitudes of ΔS and ΔH determines the preferential direction of a particular transformation, as expressed by the Gibb's free energy change (ΔG), in equation (8).

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \qquad \text{(expressed in J)} \qquad (8)$$

When ΔG is less than zero, the transformation takes place in the expected direction. For a value of ΔG equal to zero, the system is in equilibrium and equation (8) resembles equation (7). If the value of ΔG is greater than zero, the transformation takes place in the opposite direction to that expected.

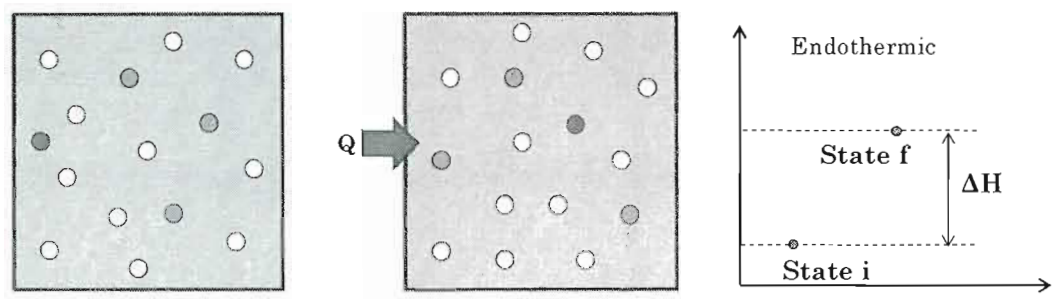
Third principle

As the temperature of a system tends towards zero degrees Kelvin, its entropy becomes infinitesimal. The interpretation of this at the microscopic level is based upon the role of temperature as an agitator of particles. An absence of particle movement in the system implies that the number of possible configurations W tends to 1, hence S tends to 0.

II. Transposition of the principles of thermodynamics to a CTS

The proposed procedure is based on deductive reasoning applied to the transposition of the principles of thermodynamics to a cyber transport system. The system considered corresponds to the urban perimeter covered by a CTS whose states are based on the successive configurations of vehicles in the network following exchanges with the exterior. Analogous to a system comprised of molecules in a given volume and the absence of energy exchange with the exterior, the configuration corresponds to an equilibrium state for which the vehicles are spread out over the network (Figure 1a).

Travel needs expressed by the request for a vehicle correspond to external energy supplied to the system. Analogous with the first principle, the travel need expressed by the request is equal to the heat supplied (Q) (Figure 1b). According to equation (3), this energy supplied corresponds to the change in enthalpy (ΔH) of the system between the initial and final configurations (Figure 1c). By consuming this energy, the transformation is described as being endothermic.



Vehicle configuration in a network in a state of equilibrium

Expression of a travel requirement by way of energy Q supplied to the system

Enthalpy principle between two vehicle configurations (states) in the network

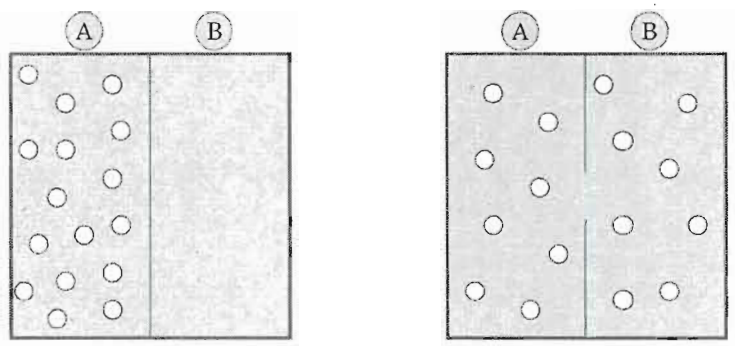
Figure 1 Enthalpy principle associated with the transformation of the system following an external energy input

According to Figure 1c, a transformation from an initial configuration (i) to a final configuration (f) corresponding to a request for transport from a user cannot take place unless ΔH (i.e. Q) is sufficient or said otherwise, unless the system state can satisfy the need.

For a given network (with known station locations), satisfying travel needs is based on the quality of the service, particularly on the ability to efficiently respond to the demand. This ability follows from the location of vehicles in the network. By deduction, the concept of the redistribution of vehicles is associated with the second principle of thermodynamics (i.e. entropy).

Consider a closed system comprised of two compartments of equal volume, A & B, separated by a barrier. Initially the molecules of gas are contained in compartment A (Figure 2a), subsequently an opening is made in the barrier and the behaviour of the gas is observed. It is found that the gas molecules naturally redistribute

themselves equally between volumes A & B, so as to reach a new state of equilibrium (Figure 2b).



Initial equilibrium state with molecules contained in volume A

New equilibrium state with molecules equally distributed between volumes A & B

Figure 2 The principle of gas diffusion in a closed volume

The observed homogeneous distribution of molecules between the two volumes A & B is explained as being the most probable state, that which can be attained by the greatest number of possible combinations. For any natural system, this is the state that offers the greatest stability. According to equation (4), where W represents the total number of possible combinations, the most stable distribution is that which possesses maximum entropy.

Expressing entropy for a given vehicle configuration in the network is based on applying equation (5). Figure 3 shows the calculation of entropy change (ΔS) caused by the satisfaction of travel needs in two particular cases: with and without vehicle redistribution. The constant K is set equal to 1 for the calculation of entropy.

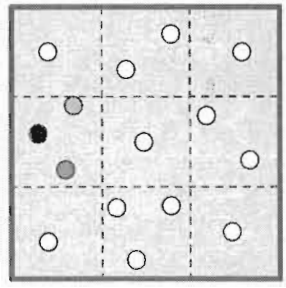
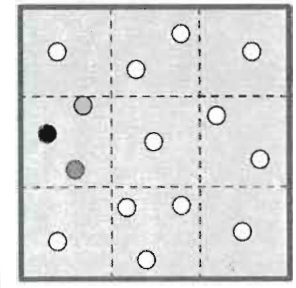
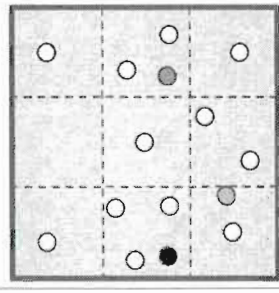
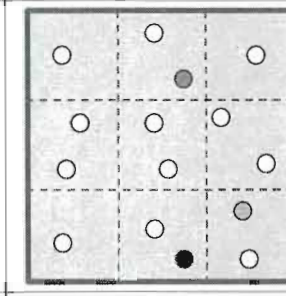
(A) Without vehicle redistribution		(B) With vehicle redistribution	
Configuration	Entropy (S)	Configuration	Entropy (S)
(1) 	S_1= -9,36		S_1= -9,36
(2) 	S_2 = - 10,23		S_2= -8,32
ΔS	- 0,87		+ 1,04

Figure 3 Change in entropy following the fulfilment of a travel requirement for the cases "with" and "without" vehicle redistribution.

In case (A) "without vehicle redistribution", entropy change is negative (decrease in entropy). According to the second principle, the system will not tend towards equilibrium and the transformation, based on respecting the evolution of natural systems, should not occur. A different way to illustrate this transformation is to consider only part of the energy to satisfy the travel need and "consumed" in order to maintain this state of the vehicles in the system.

The consequence of the reduction in entropy is that the resulting configuration is less able to satisfy new requests. As such, for a new request made to a station without a vehicle, the need (Q) must be greater in order for the transformation to

proceed. In case (B) "with vehicle redistribution", entropy change is positive. In this case, the transformation of the vehicle configuration in the network respects the principle of the evolution of natural systems. Hence, "**naturally**" the vehicles must be redistributed over the network in order to increase the entropy. In equilibrium, the change in entropy (ΔS) is equal to 0, corresponding to an optimal distribution of vehicles in the network to satisfy the requirements.

One of the desired effects of the dispersion of vehicles ($\Delta S \geq 0$) is the ability to combat network congestion. Analogous to thermodynamics, the degree of network congestion is comparable to a variable of state for the system, similar to temperature. In order to satisfy equation (6), which establishes the relation between the change in entropy (ΔS) and the change in enthalpy (ΔH), the following relation is applied:

$$T = fct\left(\frac{1}{degree\ of\ congestion}\right) \tag{9}$$

According to equation (9), for a free flowing network, it is possible for vehicles to move about freely, hence there would be a certain level of agitation which implies, by analogy, a high temperature T. In the opposite case, the level of agitation is low and so the temperature T is reduced, which according to equation (6), implies a reduction in entropy change (ΔS). When the degree of congestion tends towards infinity, T tends towards 0. Under such conditions, there is no longer any activity in the network and, in compliance with the third principle, the entropy is zero.

III. Discussion

According to procedure presented above, the preferential evolution of a system of vehicles within a network is subject to the verification of the functions of state of the change in Gibb's free energy ($\Delta G \leq 0$) and the change in entropy ($\Delta \geq 0$). By ensuring values close to zero for these two quantities, the system approaches a state of equilibrium. Moreover, the variable of state T, which is related to the reciprocal of the degree of network congestion, should be maximised so as to promote system transformations.

The contribution of this application of the laws of thermodynamics to the understanding of mobility systems is based fundamentally on the identification of a configuration of vehicles in the network based on criteria that characterise the global system state rather than merely local criteria. In fact, the conventional approach, based solely on the principles of vehicle proximity to the point of request and the shortest route, have a tendency to destabilize systems and choke up networks with a high concentration of vehicles.

The need to travel is not linked to the cost in energy, but rather to the satisfaction associated with the fulfilment of the need. If the choice of travel mode was based purely on energetic (or economic) criteria, people wishing to travel in urban settings would opt for mass transit, such as the metro, rather than for individual automobiles. Consequently, if the automobile is the preferred mode, it is because this mode better fulfils people's travel needs. By defining an energy of "travel need", the procedure could thus be transposed to other modes of transport. The

travel needs of a person are comparable to accumulated energy that they free up and pass to the surroundings when they decide to move. Part of this initial energy could be used up by travelling on foot to get to a station as well as by waiting for a vehicle, thus diminishing the energy Q that could actually be supplied to the transportation system. In fact, although the thermodynamic procedure does not depend on temporal aspects, waiting times could be taken into account in the form of an energy of dissatisfaction, which diminishes the energy of "travel need" and renders the system less able to satisfy demand. This reasoning supports the principle of door-to-door service and the minimising of waiting times.

From a wider perspective of mobility systems, the procedure proposed here provides clarification of the preference of the automobile for urban travel compared to conventional mass transit systems. In the case of mass transit systems such as the metro, a large portion of the energy of "travel need" is "consumed" in gathering passengers into stations along the transit line, as well as in waiting for vehicles to arrive. The conventional mass transit system goes against the second law of thermodynamics. As for the individual automobile in a free flowing road network (high T value), from a thermodynamics point of view, this is the mode of travel which best satisfies people's travel needs. However, the configuration of vehicles in the network results from individual decisions that are in no way based on criteria associated with the system state. From then on, as is often the case in urban areas, the successive system states cause a reduction in entropy ($\Delta S<0$) as well as an increase in the degree of congestion (low T value).

Conclusion

Linear transportation systems such as the metro, tramway, or bus expend energy of "travel need" by forcing passengers towards the lines and as such resist the principle of entropy. In a road network, the evolution of vehicle configurations can rapidly lead to a negative change in entropy. In these two cases, the passengers have to express a great need to travel to overcome the decrease in entropy. On the other hand, the functional properties of a CTS can satisfy the principles of thermodynamics associated with the evolution of natural systems that, with each change, tend towards a new system equilibrium state. Hence, by considering each request as affecting the system in its totality, the proposed procedure is able to free itself from an origin-destination approach strictly centred on the place of request and associated with a journey time criteria. Finally, the application of the principles of thermodynamics to vehicle configurations in a network demonstrates the value of developing new approaches to transport planning which integrate satisfaction of individual travel needs and the properties that define the equilibrium of the system as a whole.

References

ATRA 2003. *Personal Automated Transportation: Status and Potential of Personal Rapid Transit*. Main Report of the Advanced Transit Association. Palo Alto (California). 37p.

Andréasson, I. 1997. Quasi-Optimum Redistribution of Empty PRT Vehicles. *6th Conference on Automated People Movers*, Las Vegas, Nevada.

Andrèasson, I. 2003. Reallocation of empty personal rapid transit vehicles en route. *Transportation research record*, 1838:36-41

Chakrabarti, C.G. and De, K. 1997. Bolzman-entropy: Generalization and Application. *Journal of Biological Physics*, 23(3): 163-170

Kestin, J. 1979. *A course in Thermodynamics*. Taylor & Francis; 1st edition. 617p.