

UNIVERSITÉ DE FRANCHE-COMTÉ
ÉCOLE DOCTORALE « LANGAGE, ESPACE, TEMPS, SOCIÉTÉ »

Thèse en vue de l'obtention du titre de docteur en

GÉOGRAPHIE

**LE TRANSPORT A LA DEMANDE, UNE PISTE POUR LE
DEVELOPPEMENT URBAIN DURABLE**

**APPROCHE GEOGRAPHIQUE ET MISE EN OEUVRE D'UN SYSTEME
OPERATIONNEL A BESANCON**

Présentée et soutenue publiquement par

Jérôme BOLOT

Le 15 décembre 2006

Sous la direction de M. Thierry BROSSARD,
directeur de recherche CNRS

Membres du Jury :

Thierry BROSSARD, Directeur de recherche au CNRS, Besançon
Pascal CHATONNAY, Maître de conférence à l'université de Franche-Comté
Pierre DUMOLARD, Professeur émérite à l'université de Grenoble, rapporteur
Yves GUERMOND, Professeur émérite à l'université de Rouen, rapporteur
Daniel JOLY, Directeur de recherche au CNRS, Besançon
Didier JOSSELIN, Chargé de recherche au CNRS, Avignon

Avant propos

Ces quelques lignes présentent le déroulement de cette thèse, qui commencée à la fin du précédent millénaire, a mis 7 ans à aboutir.

Tout a réellement commencé par ma rencontre avec Didier Josselin qui fut à l'instigation de cette thèse et qui l'a codirigée. J'ai rencontré ce chercheur génial venu d'un autre monde en 1997 et la connexion s'est tout de suite opérée. De là, les projets, programmes et contrats de recherches se sont enchaînés à une vitesse délirante pour mon plus grand bonheur. Je remercie Didier pour son incroyable dynamisme, ses idées, sa capacité à « secouer les cocotiers », bref ses qualités de chercheur. Grâce à lui, mes trois premières années de thèses sont inoubliables. Les routes se font et se défont, se croisent et se recroisent et je ne doute pas que nous aurons l'occasion de partager d'autres aventures par la suite...

Je remercie Thierry Brossard qui a accepté de diriger cette thèse avec Didier Josselin. Il est un épatant directeur de recherches où sagesse, soutien et conseils furent toujours présents. Il a donné le ton à toute une équipe toujours prompte à soutenir la recherche autour d'un café, d'une bière ou tout simplement d'un barbecue...

Avec Didier, les programmes de recherches menés entre 1998 et 2002 m'ont permis de rencontrer des chercheurs passionnés et passionnants évoluant dans des équipes dynamiques parmi lesquelles, celle du CEDRIC à Paris, celle du LSR-IMAG à Grenoble, INRA-SADIF et le SEIGAD. Je profite de cette page pour les saluer et en particulier monsieur Pierre Dumolard qui lui aussi a accepté de faire partie du jury...

Je remercie également monsieur Yves Guermond d'avoir accepté d'être membre du jury. Je garde de très bons souvenirs du colloque qui a eu lieu à St-valéry-en-Caux en 2001. C'est à cette occasion que j'ai présenté, pour la première fois, la construction de trajets par les algorithmes génétiques...

J'ai eu le bonheur de vivre les trois premières années de thèses symbolisant l'apprentissage du jeune chercheur à Théma, laboratoire de géographie bisontin, où la qualité scientifique de l'équipe est aussi performante que la convivialité de ses

membres. Parmi lesquels, Daniel Joly, directeur de recherche au CNRS qui a également accepté de faire partie du jury de cette thèse. Merci Suisse.

J'ai démarré le difficile apprentissage accompagné de deux incroyables acolytes que sont Arnaud Banos et Thomas Thévenin. A nous trois, nous avons formé le très select club-gasoil et, entre nos aventures en Australie, aux États-Unis ou en Normandie, nous avons travaillé sur des projets de mobilité et principalement sur le transport à la demande, au fond d'une cave pour commencer puis sous la lumière du soleil ensuite. Ces années de travail et d'amitiés furent extraordinaires. Merci à vous deux...

Le club gasoil est un groupuscule de l'équipe de recherche Tadvance qui s'est formée autour d'un noyau dur de chercheurs en géographie (le club gasoil et Didier Josselin) et en informatique (Pascal Chatonnay, Christophe Lang et Philippe Canalda). L'équipe s'est aujourd'hui largement élargie mais les premières palpitations de Tadvance ont débuté en 1998 et ont vraiment donné un sens à la pluridisciplinarité. Je remercie les collègues du LIFC, les fourmis de Christophe, les tentacules de Pascal et les magiques algorithmes génétiques que Pascal m'a fait découvrir. Je le remercie également d'avoir accepté de faire partie du jury de cette thèse...

Les recherches menées par Tadvance à l'occasion de l'expérimentation d'Evolis-Gare, m'ont fait côtoyer de nombreuses personnes de la CTB. Pour leur soutien, je remercie Bertrand Dupont, son ancien directeur, Laurent Sénécat et Eric Bourgeay, l'ancien et le nouveau responsable de l'équipe marketing. Je n'oublie pas l'équipe de Mobiligne qui a du supporter les quelques caprices du logiciel Resad² mis en place à la CTB...

L'Ademe, l'agence de la maîtrise de l'énergie financé cette thèse. Je remercie Muriel Jeanneret, de la délégation régionale de Franche-Comte pour avoir soutenu ce projet de thèse en 1999 ainsi que Valérie et Éliane de la cellule Thèse à Angers. Je salue chaleureusement les membres de l'association des thésards de l'Ademe côtoyés à l'occasion des réunions et des doctoriales.

La finition de cette thèse s'est quelque peu fait attendre. La méthodologie, les bases de données et les développements informatiques étaient terminés en 2003. La rédaction, inachevée à cette époque a mis près de trois années à se concrétiser. Je pensais pouvoir terminer rapidement mais d'autres priorités, notamment familiales, sont intervenues. En outre, après la fin du financement de cette thèse par l'Ademe, je fus recruté par Zora Meyer pour modéliser l'offre de transport régional et simuler la fréquentation des services de transport collectif. J'ai intégré le Conseil Régional de Franche-Comté au sein de la Direction des Transports où je fus merveilleusement accueilli par toute l'équipe dirigée par Charles Weiss.

Ainsi, le temps disponible à consacrer à la thèse a fondu comme neige au soleil. Néanmoins, j'avançais jour après jour dans le TER qui me conduisait sur mon lieu de travail. Certaines informations ont été mises à jour mais d'autres, notamment les informations statistiques relatives à Evolis-Gare, datent un peu. Cette dernière année, mon directeur m'a confié la réalisation du Schéma Régional des Infrastructures et des Transports (SRIT). Ce schéma définit la politique de la Région des transports des biens et des personnes aux horizons 2015 et 2025. Un grand merci à Rémy et aux collègues des Transports pour leur précieuse collaboration, à la machine à café, à Coca-Cola et à l'inventeur du réveil matin ! Le SRIT n'est pas encore sous presse que, discrètement, je profite de mes soirées et week-end en famille pour terminer l'écriture de cette thèse. Incroyable, j'imprime le même jour cette thèse et le SRIT.

J'envoie des bisous, par seaux entiers, à Hélène et Cécile pour m'avoir aidé dans la difficile épreuve de la rédaction et, par brouettes, à Mélanie pour son aide précieuse dans l'avant-avant-dernière ligne droite. C'était il y a bien longtemps déjà...

Un coucou à tous mes amis et ma famille à qui je peux presque promettre de reprendre une vie à peu près normale. Il ne me reste plus qu'à passer le permis de conduire...

Plus sérieusement, cette fin de thèse annonce un bonheur non dissimulé. Un bonheur bien plus fort qu'un simple bonheur personnel car j'ai la chance de le partager avec mes trois amours. Eliot, Maëlle & Christelle, mes chéri(e)s, c'est de vous que l'infinie force me vient.

« Il faut rendre les choses aussi simples que possible, mais pas plus ».

Albert Einstein

Introduction générale

La commission du développement durable du Conseil Économique et Social des Nations Unies stipule que les transports peuvent avoir des conséquences préjudiciables sur l'environnement aux niveaux mondial, régional et local, sur la santé, sur les niveaux de bruit et sur l'occupation des sols [ONU, 2001]. En outre, les accidents et la congestion associés à des systèmes de transport peu viables représentent des coûts sociaux qui, à ce titre, compromettent le développement durable [OCDE, 2002].

Devant un tel constat, l'amélioration du système de transport actuel apparaît comme une nécessité. La tâche n'est pas facile car la complexité du système de transport est bien réelle et relève de phénomènes sociaux, économiques et structurels qu'il convient d'appréhender dans la globalité de leurs interactions. Le transport mécanisé au sens large intègre les modes terrestres routiers et ferroviaires, maritimes et aériens. Il concerne les personnes aussi bien que les marchandises. Parmi cet ensemble, notre sujet de thèse portera attention au transport des personnes en ville et plus particulièrement au Transport à la Demande comme solution aux problèmes qui en découlent.

Les nouveaux rythmes urbains, vers une individualisation des transports

Les villes que nous connaissons aujourd'hui sont le résultat de transformations historiques plus ou moins profondes et rapides selon les époques. L'étirement, parfois l'éclatement de la ville engendre de nouvelles conditions de déplacements qui à leur tour vont induire des formes de transition urbaine, telles que M. Wiel les a décrites [1998 ; 1999b]. Cette nouvelle donne est liée à l'arrivée des moyens de transports mécanisés (tramways, automobile) mais également et surtout à la complication des rythmes urbains, où les trajets de la journée ne se limitent plus aux seuls allers et retours entre le domicile et le travail. Les loisirs, les achats et les activités professionnels se combinent dans les motifs de déplacements entre des espaces urbains devenus discontinus et multipolarisés. Ces nouveaux rythmes urbains

fragmentent l'habituel flot synchronisé des heures de pointe et imposent aux transports collectifs une perpétuelle adaptation. Ceux-ci, réglés sur des cadences régulières et répétitives peinent à concurrencer l'automobile, car celle-ci semble mieux répondre au besoin de liberté individuelle qui est au coeur de nos sociétés. Néanmoins, par les dysfonctionnements qu'elle cause, l'automobile s'avère souvent moins efficace que le transport public. Dans les grandes villes par exemple, le métro ou le tramway lorsqu'ils sont bien conçus peuvent offrir une alternative intéressante à la voiture qui, en heures de pointe, est ralentie par les embouteillages.

Cependant, la majorité des déplacements urbains revient à l'automobile lorsque l'offre de transport public se raréfie et s'ajuste moins bien aux besoins de la population. En conséquences, le recours excessif à l'automobile génère des problèmes économiques, environnementaux et sociaux qui atteignent le fonctionnement des villes et altèrent la santé des personnes, toutes choses qui vont à l'encontre du développement durable et de la qualité de vie qui s'y attache [OCDE, 2002].

De nouvelles solutions, plus souples et complémentaires du transport collectif classique, sont à explorer pour diminuer la circulation tout en offrant une mobilité plus importante aux personnes captives dépourvues d'un accès à l'automobile. Ainsi, au côté des modes lourds mais rapides que sont les transports ferrés (tramways, métro, Rer, Ter) et en complément des bus et des taxis, le transport à la demande (TAD) constitue une alternative sérieuse à la voiture particulière en terme économique, social et écologique. Au contraire des transports réguliers qui fonctionnent selon des programmes prédéfinis, les services de transport à la demande se déclenchent selon les besoins des usagers. Nous pouvons distinguer trois types de service de TAD. Le mode convergent collecte les passagers en différents lieux et les dépose en un endroit unique. Le mode convergent multipolaire transporte les passagers en un nombre limité d'endroits. Enfin, le mode porte-à-porte constitue l'offre de transport la plus souple et s'apparente réellement au taxi collectif puisque les collectes et les déposes des personnes s'effectuent en de multiples endroits.

Apport des « Systèmes de Transport Intelligent » et de la géomatique

La volonté de changer ou tout du moins d'améliorer les conditions de transport en tirant bénéfice des nouvelles technologies de l'information et de la communication (NTIC), a conduit les responsables politiques à promouvoir les Systèmes de Transport Intelligent (ITS) par la mise en place d'institutions spécifiques. La

mobilisation de telles ressources peut améliorer les performances des systèmes de transport aériens, maritimes et terrestres.

Les ITS apportent un double bénéfice au transport public, bénéfice technologique d'abord, dû à la puissance de l'informatique et de l'électronique, bénéfice social ensuite puisque le transport public en devenant plus accessible et convivial améliore du même coup son image.

Le transport à la demande peut constituer pour le public une solution d'avenir en raison de l'efficacité et de la fiabilité que lui confèrent les nouvelles technologies. En outre, cette mise en oeuvre instrumentale doit se compléter d'autres considérations sur le territoire où elle s'applique. En ce sens, l'approche géographique peut être intéressante à mobiliser dans un cadre pluridisciplinaire et étendu où interviennent des professionnels de la gestion et du marketing du transport, des informaticiens, des économistes, des juristes... En effet, le transport à la demande n'est pas réductible à sa seule dimension instrumentale d'où l'intérêt de replacer cette question dans le cadre d'une réflexion scientifique plus large où nous trouvons les **fondements** conceptuels et méthodologiques requis.

Notre thèse s'inscrit dans cette problématique générale mais avec l'ambition de prendre appui sur des applications concrètes et opérationnelles. Cette approche pragmatique nous conduira à insister sur les questions instrumentales précises (Base de données, algorithmique) sachant bien que notre contribution très spécifique et localisée ressort de cette problématique d'ensemble.

Evolis-Gare, une expérience en vraie grandeur

La **contribution** que nous apportons à pris corps à l'occasion d'une opération de TAD « Evolis-Gare » à laquelle nous avons contribué au sein d'un réseau de partenaires professionnel et scientifique.

Ce projet ressort d'une demande très précise émanant d'un exploitant de transport urbain et d'une collectivité locale, la ville de Besançon. Il s'agissait d'offrir un service de transport à la demande aux usagers des TGV du matin et de soirée pour leur permettre d'effectuer le déplacement entre leur domicile et la gare SNCF.

Le problème posé au chercheur était d'abord de faire une étude de faisabilité pour évaluer l'intérêt de l'opération, puis de faire des propositions de mise en oeuvre pratique pour la réalisation d'un outil de gestion des réservations et de construction de trajets. Dans ce cadre, j'ai contribué à la recherche en développant un

environnement technologique associant une centrale de réservation et un Système d'Information Géographique. Notre travail au coeur du projet Evolis-Gare constitue un apport direct de la recherche à un service public. En effet, de nombreuses réponses originales furent apportées afin de répondre au mieux aux attentes des usagers.

Le second volet de notre travail de thèse constitue le prolongement de l'expérience Evolis-Gare. Il s'agit de jeter les bases d'une démarche plus large associant réflexion conceptuelle, propositions méthodologiques et mise en oeuvre instrumentale d'un transport à la demande innovant.

Proposer un transport à la demande en temps-réel

Le moment durant lequel l'utilisateur doit réaliser sa réservation constitue un élément clé de tout système de transport à la demande. Evolis-Gare et de nombreux autres systèmes de transport à la demande exigent que la réservation s'effectue au plus tard la veille du départ. Cette contrainte permet au gestionnaire du système de transport à la demande :

- de préparer au mieux les services destinés à assurer l'ensemble des trajets en fonction des horaires à respecter et de la répartition géographiques des usagers ;
- de s'assurer qu'il dispose du nombre nécessaire de véhicules et de chauffeurs ;
- de communiquer à chacun des chauffeurs sa feuille de route précise récapitulant les itinéraires à suivre.

Lorsque les réservations interviennent dans un laps de temps très court, ces opérations ne peuvent s'effectuer sereinement. Le manque de chauffeurs ou de véhicules au dernier moment contraint à refuser des clients et au contraire un trop grand nombre de chauffeurs réquisitionnés augmente les coûts du service. Ainsi, un service assurant un transport à la demande où les réservations sont réalisées en temps-réel ou dans un laps de temps très court doit être capable de s'affranchir de ces aléas. Si l'énoncé du problème posé paraît simple, les solutions envisagées impliquent une appropriation avancée des concepts et des outils adéquats.

Technologies et intelligence artificielle pour résoudre les difficultés

Les recherches menées en informatique sous le vocable de « vie et d'intelligence artificielle¹ » démontrent qu'il est possible de résoudre des problèmes complexes en posant les équations mathématiques comme des métaphores biologiques. Les

¹ <http://vieartificielle.com/article/>

modèles ainsi construits reproduisent artificiellement les logiques opérationnelles du vivant et autorisent des solutions par la simulation informatique [Gell-Mann, 1995]. Ainsi, les théories de l'évolution ou des insectes sociaux permettent de résoudre bon nombre de problèmes que peuvent poser une réservation des usagers en temps-réel dans la gestion quotidienne d'un transport à la demande. Il s'agit de perspectives stimulantes pour aborder et relever dans toute leur complexité opérationnelle, les défis techniques qui se posent.

Pour être efficace, la machinerie doit s'appuyer sur une modélisation adéquate apte à intégrer les informations du système pour lequel elle doit trouver les solutions fonctionnelles requises. En ce sens, la géographie dispose d'outils méthodologiques nous permettant de mener à bien la modélisation des informations nécessaires aux calculs et aux simulations.

Le cheminement suivi

La première partie présente le socle de notre recherche. Nous étudions les relations entre les dynamiques urbaines et les déplacements de personnes. Cela permet de mettre en évidence les nouvelles pratiques de mobilités et de comprendre le positionnement des différentes offres de transports actuelles. Nous présentons des alternatives à ces offres de transport qui ne répondent pas toujours au principe du développement durable. Parmi ces alternatives, le transport à la demande constitue l'élément clé de notre recherche. Le développement des technologies de l'électronique et de l'informatique dédiées au transport constitue un apport décisif dans le domaine en question. La présentation d'Evolis-Gare, une opération de transport à la demande bisontin, viendra appuyer notre propos par une expérience concrète.

En seconde partie, nous proposons l'amélioration du service Evolis-Gare en assurant la réservation en temps-réel par les usagers. Ce développement implique un important effort de formalisation qui concerne d'abord les données et leur modélisation, ensuite, les processus de simulation et enfin les méthodes de l'Intelligence Artificielle utilisées pour reproduire les processus en question. Des résultats de simulation permettront d'illustrer l'intérêt de la démarche proposée.

**Partie 1 : Le transport à la
demande, un enjeu décisif pour
le transport public face à
l'automobile**

Introduction de la première partie

Les difficultés que rencontrent les transports publics depuis les années 60 pour garder leur rôle dans le fonctionnement harmonieux de la cité ressortent de cinq causes majeures [Le Breton, 2001] :

- La priorité accordée à l'aménagement du territoire au détriment d'un aménagement plus ciblé des villes ;
- La préférence renforcée pour les modes individuels en matière d'habitat et de transport ;
- La mise en œuvre d'un modèle de développement urbain qui aboutit à une dissociation des activités par zones spécifiques favorables à l'automobile ;
- Le manque de clairvoyance chez les exploitants des réseaux pour appréhender les évolutions en y adaptant les services ;
- Le défaut de coordinations entre les collectivités locales et les opérateurs.

De nombreux spécialistes, tels Ascher [1998 & 2001], Dupuy [1995 & 1999] et Wiel [1992, 1997, 1998, 1999], ont mis en évidence la complexité des antagonismes entre intérêts individuels et intérêts collectifs au sein de la ville et de son système de transport.

Pour dépasser cette situation, l'offre doit se renouveler et prendre en compte les nouveaux besoins des usagers de manière à faire revenir ceux-ci vers les transports publics.

A cette fin, les collectivités locales disposent d'outils tels que les plans de déplacements urbains (PDU) qui retranscrivent par des aménagements et des actions les politiques de déplacement adoptées. Ces collectivités peuvent également

concevoir des modes de transport qui intègrent les besoins directs de déplacement ainsi que les préoccupations environnementales et sociales. A cet égard, le transport à la demande offre une piste intéressante.

L'utilisation des technologies issues des *Intelligent Transport System* (ITS) peut devenir un atout majeur dans une politique de dynamisation du transport public. En effet, de nombreuses expériences ITS utilisant les technologies liées au GPS et à la cartographie dynamique embarquée notamment, ont montré l'efficacité de ces dernières tant en terme de performance comme moyen de transport ou d'aide au transport qu'en terme de marketing, ultime étape pour inciter l'automobiliste à délaïsser son véhicule.

C'est dans ce contexte qu'en septembre 2000 nous avons participé à la mise en place à Besançon d'un système de transport à la demande, Evolis-Gare. Nouveau transport collectif situé entre le bus et le taxi, ce service innovant est destiné à acheminer les usagers des TGV à la gare SNCF tôt le matin et tard le soir. La pluridisciplinarité du projet mené dans le cadre de plusieurs programmes de recherches (PREDIT², ISTI³...) a permis de mener à bien cette expérience et de démontrer qu'une amélioration de l'offre du transport public, plus proche des besoins de l'utilisateur, permet de proposer une alternative à l'automobile.

Cette partie se propose, dans un premier temps, de faire état des évolutions de la ville et de faire ressortir les difficultés qui en résultent pour le transport public actuel. Pour répondre à l'exigence du développement durable, une adaptation est pourtant nécessaire et de nombreuses pistes sont actuellement explorées, notamment dans le domaine du transport à la demande.

Les *Intelligent Transport System* (ITS), présentés dans un second temps, peuvent améliorer les conditions d'utilisation de tous les moyens de transport. Nous verrons comment le transport à la demande peut, lui aussi, tirer partie des avancées technologiques proposées par les ITS.

Pour terminer, l'exemple concret d'Evolis-Gare servira d'illustration pratique.

² PREDIT :

³ ISTI :

Chapitre 1 : Transport à la demande et développement durable, le contexte d'une démarche

Le développement durable consiste à « *concilier la croissance économique et le progrès social sans dilapider les ressources non renouvelables et sans mettre en péril les équilibres écologiques au profit des générations futures du monde entier* » [Lebreton & Beaucire, 2000]. L'utilisation croissante de la voiture particulière au détriment des transports collectifs engendre de très nombreuses nuisances qui contreviennent au développement durable ainsi défini [CEMT, 1995 ; CEMT, 2000].

Afin de renverser cette tendance, il convient d'abord de comprendre les modifications de l'espace et des rythmes urbains pour envisager ensuite comment le transport collectif peut s'adapter et gagner à lui des usagers.

Présenter l'évolution de l'espace urbain et les formes de déplacements associées nous aidera à établir le constat des problèmes à surmonter avant de poser les jalons d'une démarche qui reprenne à son compte les exigences du développement durable dans les solutions avancées.

1 Les déplacements se complexifient dans une ville qui s'étale

Les espaces urbains à desservir s'inscrivent dans des limites qui deviennent incertaines. La ville, autrefois bien circonscrite, est devenue plus diffuse en s'étalant. Du centre vers la périphérie, elle présente des gradients de densités complexes qui rendent difficile une desserte harmonieuse par les transports publics. D'où la baisse de fréquentation qui en découle.

Une mise en perspective historique rapide nous permettra de faire la genèse de l'objet d'étude qui nous concerne, en faisant ressortir les conséquences induites en matière de transport.

1.1 De la ville ancienne et ramassée à la ville moderne et étalée

La ville « *historique, dense et centrée, constitue encore aujourd'hui le cœur des agglomérations urbaines en France* » [Dupuy, 1995]. « *La voirie de la ville ancienne, héritée de la fin du Moyen âge, est tortueuse, étroite, sans recul* » [Lebreton & Beaucire, 2000]. L'époque médiévale lègue à la ville de nombreuses places publiques dévolues aux échanges et au commerce ; ce sont des pôles d'activités qui structurent la circulation autour d'elle (figure 1-a).

Plus tard, cette ville essentiellement piétonne s'agrandit par des faubourgs relativement denses, desservis par une voirie adaptée à la circulation hippomobile (figure 1-b).

Avec la première révolution industrielle et l'exode rural la ville poursuit sa croissance que favorise le transport ferroviaire : les banlieues s'étirent « *en doigts de gants* » le long des voies ferrées nouvellement implantées [Beaucire, 1996 ; Merlin 1992]. Le phénomène de banlieue amorce la dissociation progressive entre lieu de travail et zones résidentielles où les plus favorisés s'installent loin du bruit et des fumées (figure 1-c). Ainsi, « *les transports collectifs permettent aux catégories sociales les plus favorisées de quitter la ville pour résider à la campagne, où se développent des quartiers résidentiels bien reliés au centre-ville par les premiers trains de banlieues ou les tramways rapides* » [Lebreton & Beaucire, 2000].

Après la seconde guerre mondiale, l'avènement puis la démocratisation de l'automobile permettent d'accéder partout en s'affranchissant des contraintes

imposées par les transports collectifs. Le logement pavillonnaire s'insère dans les zones vacantes (figure 1-d) pour compléter la trame urbaine [Wœssner, 2002]. Le réseau routier se densifie et permet la connexion entre tous les points de la ville, mais avec une relation au centre qui demeure privilégiée. « *Avec le développement automobile, la suburbanisation a trouvé un second souffle* » [Dupuy, 1995].

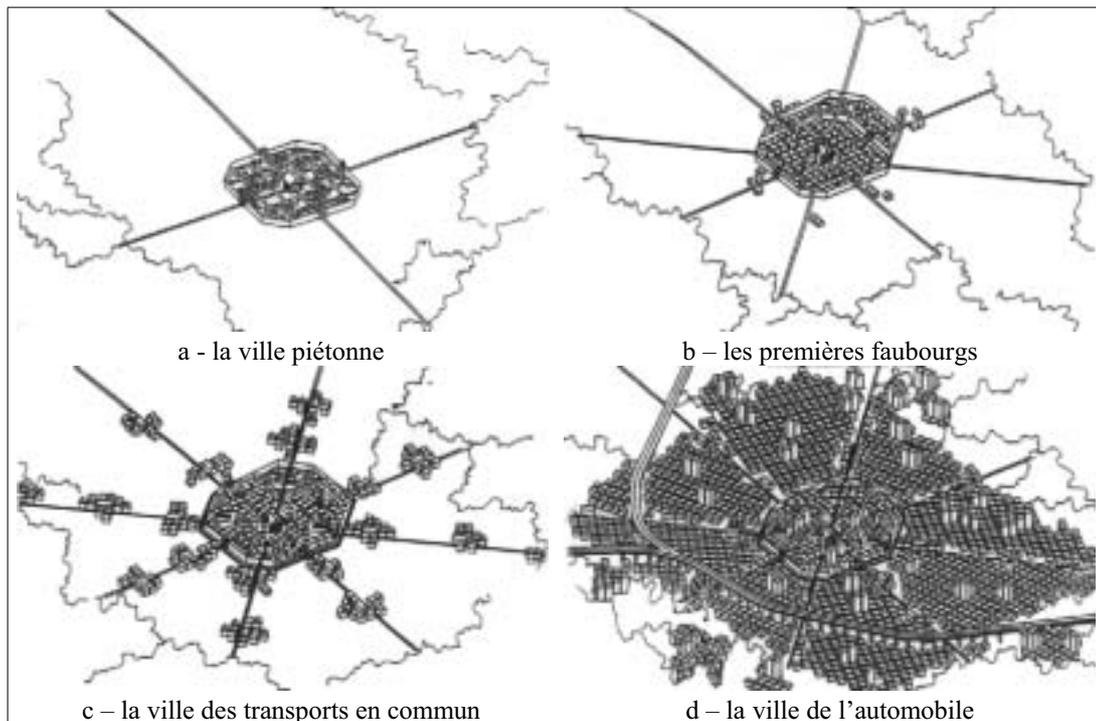


figure 1 : Les grandes étapes de l'étalement urbain

Source : Tecnosser, 1991 cité dans Dupuy 1995

La ville occupe désormais tout l'espace en se différenciant. Le centre-ville, tertiairisé, s'oppose aux banlieues résidentielles, commerciales et industrielles de la périphérie. Pour être desservis, ces nouveaux quartiers ont induit des aménagements du réseau routier qui, en fluidifiant le trafic, tendent à repousser plus loin encore les limites de la ville [Ascher, 1998].

La ville piétonne des débuts, ramassée et exiguë, s'est ainsi peu à peu transformée pour céder la place à une ville étendue où les transports « *permettent de s'affranchir de l'espace, de transcender les distances géographiques, de créer des proximités temporelles et non plus physiques* » [Fouchier, 2000].

En France, l'étalement des villes a fait diminuer de moitié les densités urbaines en trente-cinq ans. La figure 2 qui reprend l'exemple de Toulouse fait bien ressortir le phénomène en question ; d'autres travaux, notamment en région Île-de-France, confirment cette évolution [IAURIF, 2000].

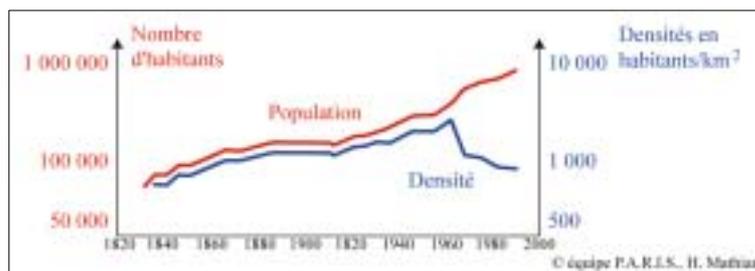


figure 2 : Le retournement de l'évolution des densités : le cas de Toulouse

Source : Fichier INED de l'urbanisation.

En 2005, le Syndicat national des aménageurs (SNAL) constate que la voracité spatiale du phénomène périurbain est évidente. En effet, si la population nationale a augmenté de 3% entre 1992 et 2001, les surfaces d'habitat individuel ont augmenté de 20% durant la même période et que celles des infrastructures d'accompagnement du même type d'habitat se sont accrues de 11%. Le phénomène persiste et se renforce. Le SNAL indique qu'entre 1990 et 2003, les constructions individuelles organisées en lotissements ou en ZAC, qui représentent une forme plus organisée de périurbanisation, ont régressées de 50 à 35% du total, au profit de constructions diffuses.

En outre, le SNAL rappelle qu'une part importante de responsabilité dans le développement de ce phénomène incombe aux autorités publiques, qui à leurs différents niveaux ont délivré des permis de construire sans projet d'aménagement réfléchi ou ont multiplié les facilités financières aux particuliers accélérant les constructions en périphérie des villes... Enfin, les collectivités préfèrent créer de toutes pièces de nouvelles zones d'activités, souvent surdimensionnées, hors agglomération, plutôt que de réutiliser les friches industrielles et urbaines qui se sont multipliées ces dernières années au rythme des transformations du tissu économique ancien.

En phase avec le développement d'un espace urbain moins dense, émergent des comportements plus individualistes à travers lesquels « *chacun tente de se construire un projet personnel de vie qui concilie vie professionnelle, vie personnelle, vie familiale, vie sociale et politique* » [Bailly & Heurgon, 2001]. Ceci n'est pas sans conséquence sur le choix des modes de déplacements comme le montre le tableau 1 établi pour quelques villes dont les densités sont très différentes.

| | Taux d'utilisation des terrains | Choix du type de transport pour le déplacement domicile-travail | | |
|------------|---------------------------------------|---|--------------------|------------------------|
| | Habitation et lieux de travail par ha | Voiture particulière | Transports publics | A pied ou à bicyclette |
| Phœnix | 13 | 93 | 3 | 3 |
| Perth | 15 | 84 | 12 | 4 |
| Washington | 21 | 81 | 14 | 5 |
| Toronto | 59 | 63 | 31 | 6 |
| Hambourg | 66 | 44 | 42 | 15 |
| Amsterdam | 74 | 58 | 14 | 28 |
| Stockholm | 85 | 34 | 46 | 20 |
| Munich | 91 | 38 | 42 | 20 |
| Vienne | 111 | 40 | 45 | 15 |
| Tokyo | 171 | 16 | 59 | 15 |
| Hong-Kong | 403 | 3 | 62 | 35 |

tableau 1 : Modes de déplacement dans quelques villes de densités différentes en 1980

Source : OCDE, 1995

La relation entre mode de déplacement et densité ressort ici clairement ; les densités fortes favorisent le transport public tandis que la voiture l'emporte dès que les densités s'abaissent.

1.2 Une ville animée par de nouveaux rythmes de vie individualisés

« Les évolutions temporelles (des rythmes urbains) tiennent, pour une part, au mouvement global de la société dans les pays industrialisés : individualisation des modes de vie, augmentation de la durée et dispersion des âges de la vie, évolution de la famille et sont liées pour une autre part, à la transformation du travail dans l'économie des services, qui structure de moins en moins les modes de vie urbains, en raison d'un double mouvement de densification du travail et de diversification des temps travaillés, que renforce aujourd'hui la réduction du temps de travail. Alors que l'ordre institutionnel relâche ses contraintes et que le calendrier religieux perd de son importance, les loisirs structurent davantage les temps sociaux : ils sont ponctués par des périodicités renouvelées et de grands événements à fort impact médiatique » [Bailly & Heurgon, 2001].

L'homme des villes et ses rapports à l'espace

La demande de mobilité des passagers, qu'il s'agisse de voyages professionnels, de déplacement urbains ou d'autres trajets, principalement interurbains, est dépendante du profil social des individus et de leur mode de vie [Prud'homme et al., 1999].

A la suite d'enquêtes sur les modes de déplacements urbains, Kaufman, Jemelin et Joye [2000], ont classé les usagers en trois groupes-types ; citadin, rurbain et métropolitain.

- Le citadin évolue dans un périmètre géographique bien défini. Il s'agit de jeunes ménages sans enfants résidant dans la ville-centre qui fréquentent assidûment les transports publics. Le citadin en question est typique des villes anciennes dont l'urbanisme a été pensé pour des déplacements à pied ;
- Le rurbain habite « *dans un espace étendu et discontinu qui est largement défini par les accessibilités physiques* ». Son mode de vie familial « *implique un fort taux de motorisation et un usage intensif de l'automobile* » ;
- Le métropolitain s'inscrit dans un espace de villes en réseau. Il réside dans des lieux bien desservis en modes de transports rapides. Ayant faiblement recours à la motorisation, il privilégie l'usage intermodal et multimodal des réseaux de transport. Son travail détermine ses choix. « *Cet idéal-type renvoie à l'ubiquité comme modèle, c'est le plus valorisé des élites* » [Kaufman et al., 2000].

Les déplacements entre le domicile et le lieu de de travail

Aujourd'hui, les déplacements quotidiens ne relèvent plus des seules migrations alternantes entre le domicile et le lieu de travail. En semaine, celles-ci ne représentent que le quart des déplacements dans les villes américaines, où la mobilité est très élevée, et le tiers dans les villes européennes [Merlin, 1995]. Dans les grandes villes de province, des enquêtes sur la mobilité locale conduites par l'Union des transports publics (UTP) montrent des valeurs plus faibles encore (de 18 à 25 %), proches des villes américaines [Bailly & Heurgon, 2001]. La dissociation spatiale entre quartiers résidentiels et quartiers d'activité professionnelle n'est pas le seul générateur de déplacements. En effet, la spécialisation professionnelle induit mécaniquement une concentration accrue des lieux de travail et corrélativement une dispersion des lieux de résidences. En outre, les actifs multiples d'un même ménage ont beaucoup de difficultés à tous trouver un emploi stable à proximité du domicile commun. Enfin, la mobilité professionnelle, élevée dans les grandes villes, tend à remettre en cause l'équilibre qui aurait pu s'instaurer [Merlin, 1995]. De ce fait, les déplacements entre domicile et lieu de travail obéissent à des schémas de plus en plus complexes.

Les déplacements professionnels représentent un peu plus de 10% des déplacements. Ils tendent à augmenter et à se connecter aux centres des villes, lieu de l'activité économique. Le centre attire également les déplacements pour raisons personnelles (formalités, banques et assurances, services juridiques).

Les déplacements liés aux achats et aux loisirs augmentent

Le regroupement géographique et la spécialisation des sites entraîne une augmentation du nombre des déplacements et des distances parcourues. A cet égard, une étude [Kaufmann et al., 2001] sur les comportements de mobilité, les modes de vie et les choix résidentiels a permis de mettre en lumière et de classer les motifs de déplacements. Ce travail porte sur onze sites différents, répartis dans quatre agglomérations (Strasbourg, Aix-en-Provence, Lyon et la région Île-de-France). Pour les achats alimentaires, les auteurs indiquent que « *la part des personnes effectuant l'ensemble de leurs courses à l'extérieur de leur quartier de domicile est faible dans tous les contextes étudiés* ». Dans une grande majorité des cas, les lieux d'achats sont donc multiples et dépassent les limites du quartier (figure 3).

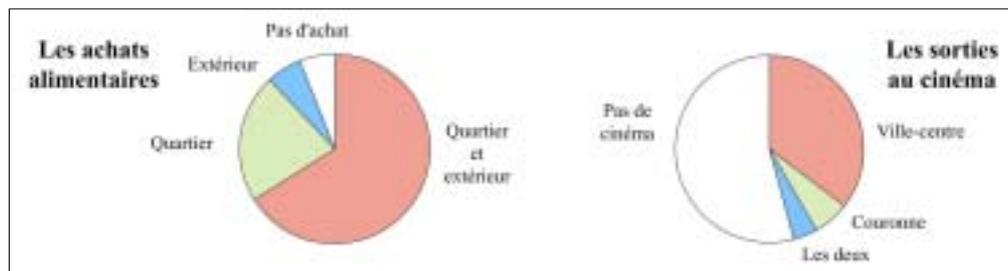


figure 3 : Spatialité agrégée des pratiques d'achats alimentaires et de cinéma

Source : Kaufmann & All, 2001

Les sorties au cinéma semblent très dépendantes du « *contexte de domicile mais à une échelle un peu plus élevée que la proximité. C'est ainsi que, dans les couronnes d'agglomération, peu équipées en salles obscures, on se rend moins souvent au cinéma que dans les centres urbains, où l'offre, malgré l'émergence rapide des multiplexes, reste importante* » [Kaufmann et al., 2001].

Les enquêtes menées par l'Union des transports publics confirment ce phénomène. Dans les grandes villes de province, les déplacements liés au travail diminuent (entre 18% à 25% des déplacements), le motif scolaire se maintient (environ 30%) tandis que les motifs d'achats, de loisirs, de visites et de sorties montent à 45% voire 52 % des déplacements.

Enfin, « la part des flux de loisirs dans l'ensemble de la mobilité locale est passée de 33 % en 1981 à 40% en 1994, alors que celle liée au travail diminuait pendant la même période de 37% à 33% (tableau 2). Pour les plus longues distances, ils ont augmenté depuis 1985 de 3% l'an, plus que toute autre forme de mobilité » [Bailly & Heurgon, 2001].

| | En part de déplacements | | En part de distances | | Évolution voyageurs-km |
|---------|-------------------------|------|----------------------|------|------------------------|
| | 1982 | 1994 | 1982 | 1994 | 1982-1994 |
| Loisirs | 33 % | 40 % | 36 % | 42 % | 53 % |
| Travail | 37 % | 33 % | 39 % | 37 % | 28 % |

tableau 2 : Les évolutions des pratiques de déplacements liés aux loisirs et au travail

Source : Bailly & Heurgon, 2001

Les motifs de déplacement se sont multipliés avec les nouveaux besoins sociaux tout en affectant des territoires plus vastes et diversifiés. Il en résulte une complexification tant spatiale que temporelle des déplacements.

1.3 Des déplacements plus diversifiés dans l'espace et dans le temps

Les déplacements entre centre et périphéries ont longtemps constitué l'essentiel des flux (tableau 3) mais aujourd'hui « le centre polarise un peu moins les déplacements (en valeur relative) et les déplacements qui se développent le plus rapidement sont les déplacements entre la périphérie (lieu de résidence de plus en plus fréquent) et la banlieue (et plus précisément la partie de la banlieue bien desservie par les rocadés de contournement, où se développent de nombreuses activités) » [Orfeuill, 2000].

| | Déplacements | | Distances parcourues | |
|-----------------------|--------------|--------|----------------------|--------|
| | 1982 | 1994 | 1982 | 1994 |
| Centre-Centre | 31,1 % | 26,5 % | 12,9 % | 8,4 % |
| Centre-Banlieue | 7,6 % | 10,4 % | 13 % | 12,5 % |
| Centre-Périphérie | 4,2 % | 6,5 % | 12,4 % | 13,7 % |
| Banlieue-Banlieue | 23,8 % | 23,6 % | 16 % | 14,6 % |
| Banlieue-Périphérie | 1,4 % | 3,1 % | 5,6 % | 7,1 % |
| Périphérie-Périphérie | 24,5 % | 21,2 % | 13,8 % | 11,7 % |
| Hors bassin | 7,3 % | 8,8 % | 26,3 % | 32,1 % |

tableau 3 : Répartition des déplacements locaux par type de liaison (jour de semaine)

Source : Orfeuill, 2000 d'après Madre et Maffre, INSEE, 1997

La figure 4 réalisée à partir des données fournies par l'INRETS [Massot, 1995] montre que les échanges périphériques représentent la moitié des échanges propres aux ZPIU et résultent de déplacements à très faible distance.

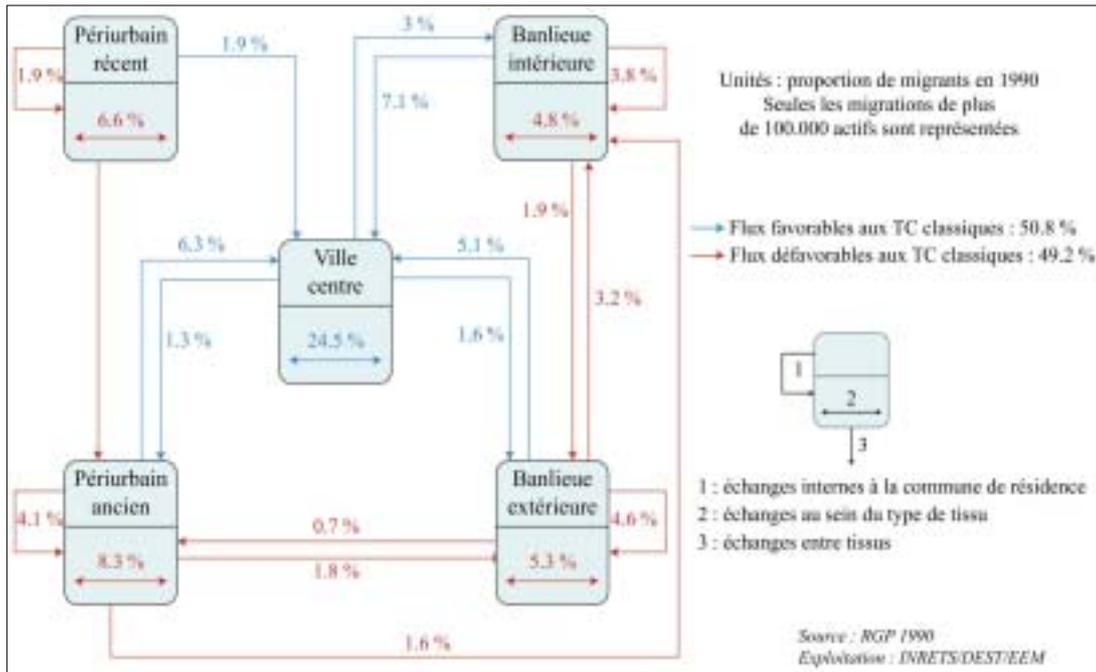


figure 4 : Les échanges internes aux ZPIU en 1990

Source : Massot, 1995

Les lieux d'origine et de destination des déplacements se répartissent sur toute l'étendue de la ville. La moitié de ceux-ci concernent des zones de trafic trop peu dense pour que les transports publics puissent les desservir efficacement. On retrouve là, une des raisons observées d'un recours quasi exclusif à l'automobile.

Des vitesses en croissance forte

Pour éviter la saturation des axes du réseau routier aux heures de pointe, les pouvoirs publics cherchent à fluidifier le trafic en améliorant les capacités de la voirie. Or, des études [Mogridge] ont montré que de tels investissements ont des effets pervers très passagers car les nouveaux aménagements attirent autant de circulation supplémentaire que la nouvelle voie ne peut en accueillir [Ascher, 1998]. Un cercle vicieux s'installe et des améliorations coûteuses deviennent à nouveaux nécessaires pour absorber le trafic. En diminuant, le temps des trajets favorise l'allongement des distances de déplacement. De nombreux spécialistes observent qu'en « France, entre 1982 et 1994 (pour tous les trajets quotidiens de – de 80 km), la distance parcourue a augmenté de 27%, le temps de trajet a diminué de 5%, ce qui signifie que la vitesse a augmenté de 32% » [Orfeuill, 1996 ; Madre et Maffre, 1997 ; Beaucire, 1996]. La figure 5 montre que la vitesse moyenne à Paris entre 1976 et 1991 a sensiblement augmenté quel que soit le mode déplacement.

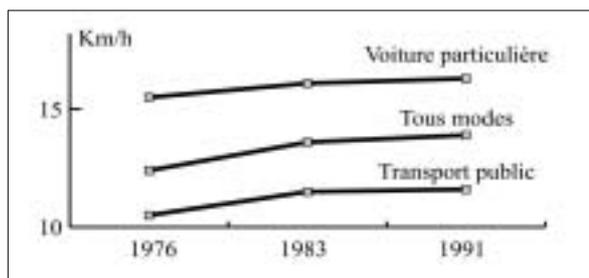


figure 5 : Vitesse moyenne (en km/heure) des trajets motorisés, agglomération de Paris

Source : DREIF, « Les déplacements en Ile-de-France », 1995, sur la base de l'étude 20000 ménages

Ainsi, l'étalement urbain, la diversité et l'éparpillement des activités contribuent à allonger les distances parcourues ; ce que l'augmentation des vitesses rend possible. Dans cet ordre d'idée, Zahavi montre que « *chacun cherche à tirer partie au maximum des opportunités spatiales (c'est-à-dire maximiser les distances parcourues dans la journée) sous deux contraintes : ne pas dépasser un certain budget-temps (une heure à une heure et demie), ne pas y consacrer plus de 15 à 20 % du revenu. La contrainte saturée en premier (monétaire ou temporelle, selon les contextes et les populations concernées), détermine le niveau de mobilité* » [Halleux, 2001]. Le tableau 4 permet de vérifier cette tendance globale à la constance du budget-temps [Bieber et al., 1993], dans des configurations urbaines pourtant très variées.

| Type d'habitat | | Distance | | Budget-Temps | | Vitesse | |
|-----------------------------------|-------------------------|----------------------------------|-----------|-------------------|-----------|-----------|-----------|
| | | (en km par individu et par jour) | | (en min par jour) | | (en km/h) | |
| | | 1981-1982 | 1992-1993 | 1981-1982 | 1992-1993 | 1981-1982 | 1992-1993 |
| Petites ZPIU | Ensemble | 18.5 | 26.1 | 47 | 47 | 23.6 | 33.3 |
| ZPIU de 50 à 300 000 habitants | Ensemble | 16.4 | 23.3 | 51 | 50 | 19.3 | 28 |
| | Ville-centre | 15.6 | 18.2 | 55 | 52 | 17 | 21 |
| | Banlieue et périphérie | 16.8 | 25.9 | 49 | 49 | 20.6 | 31.7 |
| ZPIU de 300 000 habitants et plus | Ensemble | 17.1 | 21.2 | 54 | 53 | 19 | 24 |
| | Ville-centre | 14.9 | 17 | 60 | 60 | 14.9 | 17 |
| | Banlieue | 17.5 | 20.5 | 56 | 54 | 18.8 | 22.8 |
| ZPIU de Paris | Périphérie | 18 | 25.5 | 47 | 46 | 23 | 33.3 |
| | Ensemble | 19.1 | 22.8 | 70 | 72 | 16.4 | 19 |
| | Ville-centre | 13.5 | 15.8 | 71 | 78 | 11.4 | 12.2 |
| Toutes ZPIU | Banlieue et périphérie | 20.7 | 24.8 | 70 | 70 | 17.7 | 21.3 |
| | Ensemble villes-centres | 15.4 | 18 | 59 | 57 | 15.8 | 18.9 |
| | Ensemble banlieues | 17.7 | 21.8 | 61 | 60 | 17.4 | 21.8 |
| Rural profond | Ensemble périphéries | 18.9 | 17.6 | 48 | 49 | 23.6 | 33.8 |
| | | 19.5 | 27.6 | 42 | 42 | 27.2 | 38.5 |

tableau 4 : Évolution de la mobilité par personne et par jour selon le lieu d'habitat

Source : Gallez et al., 1997

Les pointes subsistent avec de moins en moins d'heures creuses

Les déplacements en ville se réalisent en grande partie de jour et se relient aux pics d'activité. La figure 6 se rapporte aux trafics des gares parisiennes au début des années 1980, elle montre que les arrivées du matin et les départs du soir concentrent l'essentiel des mouvements observés.

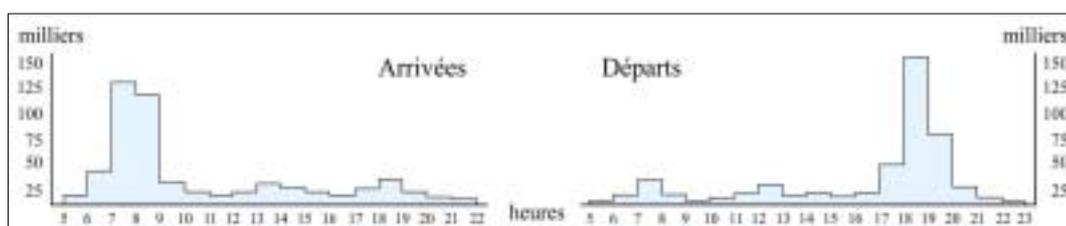


figure 6 : Trafic quotidien des gares parisiennes au début des années 80
Source : SNCF

La figure 7 permet de comparer les trafics du métro à Paris et Tokyo, sur une journée entière durant les années 1990. Les deux villes présentent une grande similitude. Les deux pics du matin et de fin de journée subsistent mais la fréquentation entre ces pics reste considérable abaissant l'écart entre heures creuses et heures de pointes. Enfin, le pic du matin occupe un créneau horaire plus resserré que celui du soir. En effet, les heures de sorties des scolaires, des employés de bureaux et des cadres sont très étalées tandis que les mouvements du matin s'opèrent pour tous dans un laps de temps très court.

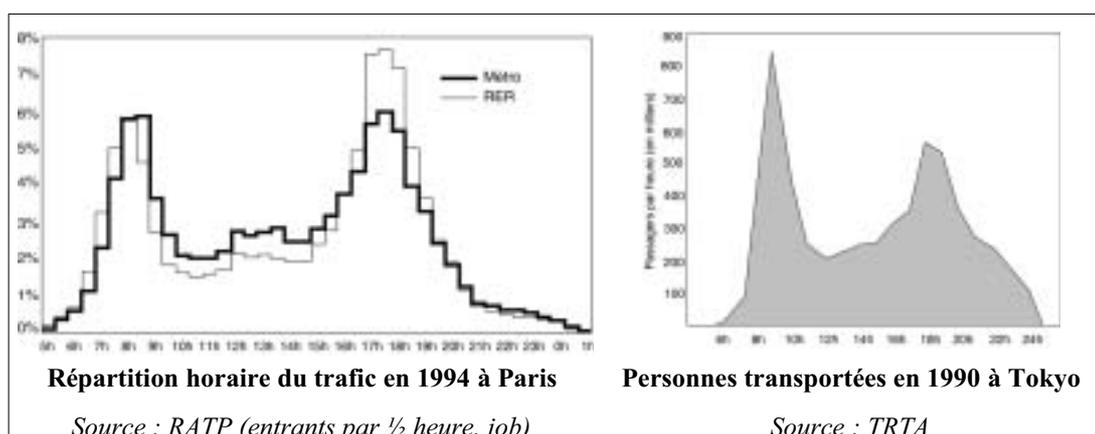


figure 7 : Ecart entre les heures de pointes et les heures creuses

Aujourd'hui, la pointe du soir concentre plus de déplacements que celle du matin. Le cumul des heures de la journée représente autant de déplacements que la pointe du matin. Les horaires et la durée de travail, différents et décalés, la part du temps partiel, le poids du travail des femmes, le travail à domicile, les formes urbaines

contribuent à désynchroniser les rythmes urbains et tendent à répartir autrement la mobilité quotidienne [Bailly & Heurgon, 2001].

Une étude du Centre d'études sur les réseaux de transport et l'urbanisme (Certu), faite sur 40 agglomérations⁴ situées dans six pays européens, confirme l'atténuation généralisée des écarts entre heures de pointe et heures creuses, avec toutefois un phénomène de pointe qui reste plus marqué en France qu'ailleurs.

La « vie moderne », facteur de pérégrinations

Les motifs de déplacements, en se multipliant, tendent à se combiner au cours d'un même trajet dans « *un souci d'optimiser le temps de déplacement par la façon d'ordonner dans le temps des trajets de toute façon nécessaires (travail, accompagnement, certains achats)* » [Weil, 1997]. Le terme de « pérégrinations » est employé pour définir ce phénomène. Emmener ses enfants à l'école avant de partir travailler constitue un exemple de pérégrination. Le fait n'est pas réellement nouveau, mais il ressort de plus en plus car mieux détecté dans les études récentes, comme le montre la figure 8 qui présente les principaux déplacements effectués par une famille péri-urbaine entre son domicile et ses lieux d'activités professionnelles, d'achats ou de loisirs.

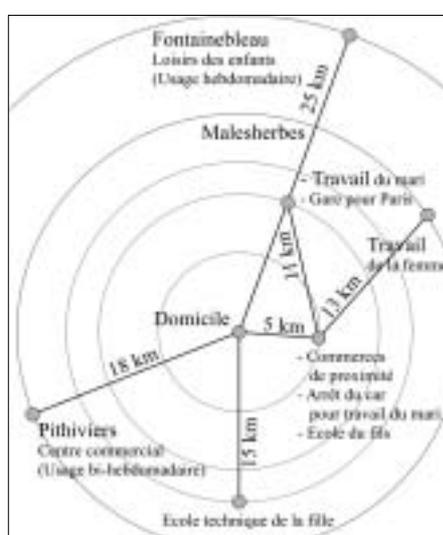


figure 8 : Le déplacement courant d'une famille péri-urbaine

Source : Benoit et Irman, 1989

⁴ Projet Sesame, dans le cadre du 4^e programme cadre de recherche-développement de la Commission européenne.

Le schéma se complique encore si l'on s'intéresse aux activités hebdomadaires car celles-ci, en étant plus spécialisées et sporadiques, demandent un ajustement plus fin des déplacements (figure 9).

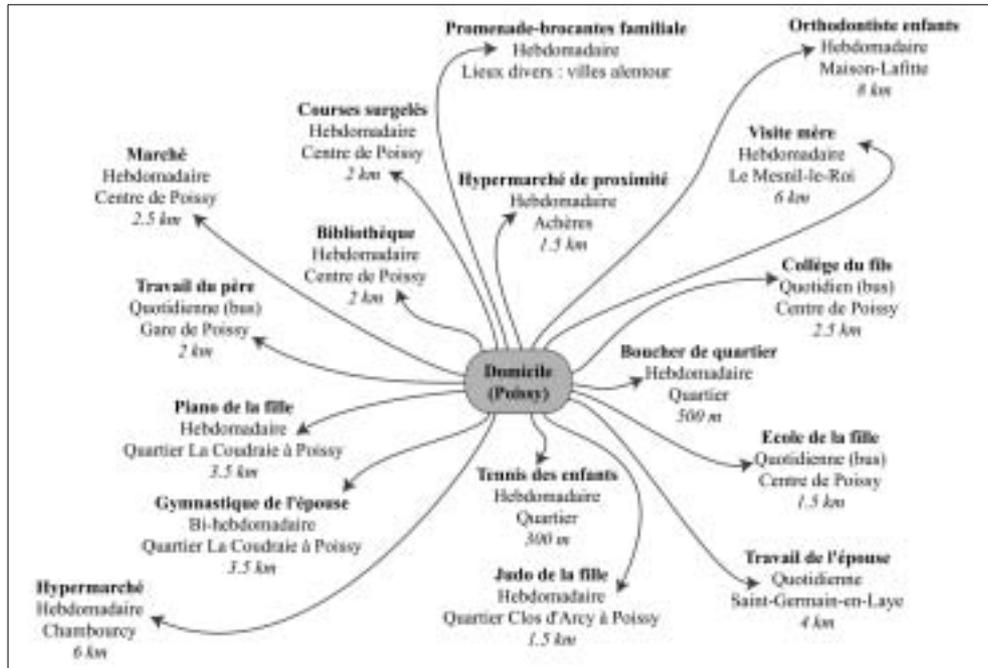


figure 9 : Rendez-vous hebdomadaires et destinations quotidiennes

Source : Juan, 1997

Le schéma précédent illustre bien les évolutions de la mobilité que nous avons décrites jusqu'à présent et que M. Wiel [1993] caractérise par les termes suivants :

- l'évolution des comportements tend à privilégier les circuits de déplacements à plusieurs motifs : un usage optimal du budget-temps disponible renvoie une bonne image de soi au « citoyen qui se veut actif » ;
- le desserrement de l'espace urbanisé, la multiplication des pôles secondaires et l'interférence croissante des aires de marché incitant au déplacement ;
- la plus grande partie de la population active bénéficie désormais d'un choix diversifié entre plusieurs modes de transport ;
- la densification et l'amélioration du réseau viaire qui dessert et maille le territoire tend à démultiplier l'offre des parcours possibles.

Les pérégrinations rythment la vie sociale. Pour certains c'est une contrainte tandis que pour d'autres, c'est une activité récréative [Kaufmann, 2000]. Quant aux familles qui restent non motorisées et donc plutôt utilisatrices des transports publics,

elle ne font pas forcément moins de déplacements mais ces derniers sont en général plus courts et moins complexes [Beauvais, 2001].

1.4 L'utopie de la ville idéale : des modèles mis à l'épreuve

Les urbanistes, conscients des difficultés engendrées par une mobilité croissante, proposent d'appréhender le développement des villes en fonction de modèles spécifiquement conçus. Ceci revient à « *fabriquer de la ville avec du transport* », comme aime à l'exprimer l'architecte Roland Castro [Offner J-M. in Pény A. & Wachter S., 1999]. Déjà, au 19^{ième} siècle une cité linéaire (*Ciudad lineal*) fut proposée par l'espagnol Arturo Soria y Mata (1844-1920). Cet urbaniste, philosophe du progrès, militant social et spécialiste des transports, critique tout autant la société inégalitaire que la ville malsaine, désordonnée, impropre à la circulation, de son époque. Il propose un modèle de ville dont la forme répond aux exigences de la circulation. Cette ville-modèle s'articule autour d'une rue de 500 mètres de large indéfiniment extensible, dont l'axe regroupe l'ensemble des voies de circulation ainsi que les conduites de gaz et d'électricité. Madrid devait être entourée par un ensemble urbain de ce type en forme de fer à cheval et long de quarante-huit kilomètres. Il « *ne dépassa pas cinq kilomètres avant d'être définitivement abandonné, puis absorbé par la vague de constructions du début du siècle. L'idée de Soria y Mata, influencera tout de même la création de quelques villes en URSS dans les années 30, là où le sol était nationalisé. Stalingrad sera ainsi bâti sur un modèle amélioré de la cité linéaire, s'étirant sur soixante-cinq kilomètres le long de la Volga* » [Moncan, 1998].

D'autres exemples méritent d'être évoqués. De la *garden-city* d'Ebenezer Howard, la ville des courtes distances, à la charte d'Athènes du Corbusier, défendant plutôt la ville des fortes densités, les urbanistes du 20^{ième} siècle ont proposé des modèles de villes, souvent antagonistes, dont l'objectif commun est d'apporter les meilleures conditions de vie aux habitants en portant une attention particulière aux problèmes de déplacement. Ces idées ont largement inspiré les promoteurs des villes nouvelles dont les réalisations ne sont pas toujours à la hauteur des espérances entrevues.

Ainsi, *Celebration*, la ville dessinée par les urbanistes de Disney et inaugurée en 1996 « *se pose comme une application du principe de mixité des usages du sol, à l'opposé du principe de zoning des activités et des types de résidences utilisés d'habitude dans ce genre de projet de communauté planifié* » [Didier, 1999]. Dans sa réalisation, la ville s'est quelque peu éloignée de l'idée originelle de Disney qui dans

les années soixante, « *proposait un certain nombre de solutions à la crise urbaine directement liée, selon lui, à l'automobile et à son cortège de banlieues sans âme et de centre-villes dégradés* » [Didier, 1999].

Plus récemment, les urbanistes de la ville d'Évry ont décidé d'offrir un haut niveau de service public de transport en tablant qu'il suffise à limiter l'usage de la voiture [Dupuy, 1999]. Or en l'absence de contraintes, l'automobile s'est malgré tout imposée en profitant des larges avenues et des places de stationnement disponibles au domicile des résidents. La politique de transport a donc dû se réajuster à cette nouvelle donne pour ne pas perdre l'investissement consenti. Le phénomène du « *no parking, no business* » triomphant déjà à Los Angeles en 1921 [Ascher, 1998] tend invariablement à se répliquer. Ainsi, le nombre de places de stationnement qu'on a voulu limiter au départ dans certains projets est maintenant revu à la hausse : des quartiers qui étaient interdits aux automobiles leur sont désormais ouverts.

Les exemples que nous venons d'évoquer montrent que, même dans les villes nouvelles, pourtant conçues pour répondre aux problèmes de transport, les pratiques de déplacements restent inchangées. « *L'inadéquation entre l'emploi et l'habitat, l'attraction d'autres villes ou d'autres centres, les extensions sauvages ou parasites troublent souvent l'ordonnance de départ. Il en résulte une surmotorisation très sensible, même dans les villes nouvelles françaises les mieux planifiées. Ces espaces urbains conservent donc toute leur particularité et leur intérêt en ce qui concerne la réduction du rôle de l'automobile, mais il semble douteux que la pureté du modèle original puisse longtemps se maintenir dans un contexte général marqué par la mobilité économique et sociale* » [Dupuy, 1995].

Dans le contexte des nouveaux rythmes urbains, les flux traditionnels univoques laissent place à des pratiques de déplacement qui se compliquent dans le temps et dans l'espace. Les piétons, les cyclistes, les usagers des transports collectifs et les automobilistes constituent un ensemble d'usagers de la ville qui cherchent à optimiser leur mode de déplacement en fonction des contraintes de distance et de temps. Or, *in fine*, ces contraintes tendent à renforcer les choix au profit de l'automobile, choix qui viennent en contradiction avec les perspectives d'un développement urbain durable.

2. Le système de transport urbain actuel ne répond pas aux principes du développement durable

En 1995, J. Desbois, vice-président de la Société des ingénieurs de l'automobile, déclare que *« contrairement au moyen de transport collectif, l'automobile, moyen plus individuel ou familial, permet de se déplacer davantage à sa guise à une époque où la fantaisie doit en de nombreux domaines s'effacer devant les impératifs de la vie collective. C'est cette correspondance avec certaines aspirations de l'homme qui permet de comprendre l'intérêt passionné de la civilisation moderne pour l'automobile »*.

Ce point de vue est légitime de la part d'un industriel du secteur automobile mais nous semble contradictoire avec les enjeux du développement durable bien résumé par la phrase d'Antoine de Saint-Exupéry : **« Nous n'héritons pas de la terre de nos parents mais empruntons celle de nos enfants »**.

2.1 Le développement durable doit être au cœur du système de transport

« Les établissements humains – qu'il s'agisse des grandes villes ou de constructions isolées – exigent du terrain, de l'air, de l'eau, du combustible et d'autres ressources. Les établissements humains qui ne consomment pas plus que ce qui peut être remplacé ont des chances de perdurer indéfiniment et peuvent donc être considérés comme viables à long terme » [CEMT, 1995]. Le mode de vie des habitants compte pour beaucoup dans l'appréciation de la durabilité d'une société ; plus celui-ci est axé sur la consommation et plus la ville et ses habitants ont besoin de terrains et de ressources pour vivre. Or, le développement durable implique deux conditions : que les comportements des personnes changent et que la technologie, puisse, le cas échéant, réduire la consommation de ressources [SERC, 1993].

Or, malgré ses performances incontestables et le moteur de développement qu'il constitue, le système de transport existant présente des contreparties négatives considérables.

Parmi les nuisances associées au développement urbain, l'émission du dioxyde de carbone prend une place majeure car il contribue fortement à l'effet de serre et au

changement climatique qu'on lui associe. L'enjeu climatique est donc aussi présent au coeur des politiques de transport et mérite considération.

Un autre aspect concerne la santé publique; le nombre d'accidents corporels est très important. En France, plus de 5000 personnes meurent sur les routes chaque année (5593 en 2004, 5318 en 2005, dont 1664 en milieu urbain)⁵ tandis que des dizaines de milliers d'autres sont gravement blessées. En trente ans, le nombre de morts sur la route a diminué de plus de moitié, puisqu'il atteignait 16000 en 1970 grâce aux décisions prises au fil du temps (port obligatoire de la ceinture de sécurité, du casque pour les motards, alcoolémie ne devant pas dépasser 0,5 g/l, limitation de vitesses...). La réglementation qui durcit les sanctions à l'égard des contrevenants renforce cette tendance. En milieu urbain, le nombre d'accidents est en augmentation avec davantage de tués chez les piétons et les cyclomotoristes. En terme financier, l'Observatoire National Interministériel de la Sécurité Routière a estimé le coût de l'insécurité routière à 24,9 milliards d'euros en 2005 (12 milliards pour les accidents corporels, 12,9 pour les accidents matériels).

Moins directement mesurée, la pollution atmosphérique générée par le système de transport provoque également des problèmes de santé difficiles à chiffrer qui s'ajoutent à l'effet de serre. Des solutions technologiques peuvent être recherchées pour réduire cette pollution atmosphérique (moteur à gaz, électrique, pile à combustible) mais elles ont aussi leurs inconvénients. En France, afin de faire diminuer les rejets polluants, l'Agence de la Maîtrise de l'Énergie (Ademe) encourage l'utilisation de technologies plus propres mais préconise surtout une diminution de la consommation de l'énergie.

Enfin, le système de transport génère d'autres effets négatifs tels que les encombrements durant les périodes de grandes fréquentations et la consommation d'espace nécessaire aux infrastructures (routes, stationnement).

⁵ Source : Observatoire national interministériel de la sécurité routière, les chiffres sont calculés avec la nouvelle méthodologie internationale, appliquée à partir du 1^{er} janvier 2005, qui comptabilise les décès survenant jusqu'à 30 jours après l'accident au lieu de 6 avec l'ancienne méthodologie.

2.2 L'automobile face au transport public

L'automobile s'impose rapidement comme mode de déplacement privilégié

Les premiers transports urbains mécanisés furent d'abord collectifs car l'automobile des débuts restait un objet cher à la fiabilité limitée. Ainsi, les tramways à câbles, puis entre 1870 et 1890, les tramways à vapeur et les tramways électriques commencèrent à desservir les villes [Mérenne, 1995]. A cette époque, les transports publics assuraient bien leur rôle dans une ville taillée à leur mesure. L'automobile a commencé à se démocratiser dans l'entre-deux-guerres aux États-Unis. Des constructeurs tels que Ford suivi par Citroën et Volkswagen ont cherché à produire des automobiles de qualité avec un coût suffisamment bas pour en permettre l'accès au grand nombre. Cette orientation industrielle répondait au désir des populations en même temps qu'à une certaine volonté politique qui voyait une utilisation de la voiture ailleurs que dans la ville. Ainsi, « *lorsque l'Allemagne hitlérienne veut mettre une voiture du peuple (Volkswagen) à la portée de tous, grâce à des livrets d'épargne, ce n'est pas une voiture de ville. Bien au contraire, la Volkswagen doit permettre, dès le travail terminé, de quitter l'usine et la ville pour gagner la nature, la montagne. C'est là, loin des villes, que le bon ouvrier pourra, dans la joie, reconstituer sa force physique et morale* » [Dupuy, 1995]. La figure 10 aide à bien mesurer l'ampleur de la démocratisation de l'automobile après le creux de la seconde guerre mondiale. Le nombre de voitures a été multiplié par dix en trente ans (entre 1950 et 1980). La Seconde guerre mondiale a d'ailleurs retardé de près de dix ans ce phénomène.

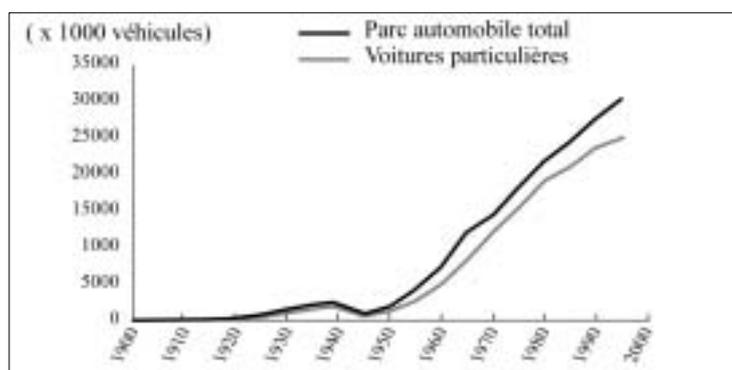


figure 10 : Estimation du parc automobile en France
Source : Merlin, 1997

L'automobile procure un engouement qui repose principalement sur des fonctionnalités expliquées par Dupuy [1991]:

- L'immédiateté puisque l'automobile permet de disposer d'un mode de transport à tout moment ;
- L'instantanéité puisque l'automobile permet d'aller le plus vite possible ;
- L'ubiquité puisque l'automobile permet d'aller partout.

Cependant, l'attrait de l'automobile dépasse ces seules raisons fonctionnelles. L'attachement est culturel, voire passionnel. L'automobile procure un sentiment de liberté qui est en phase avec l'individualisme de nos sociétés.

Dans un tel contexte, il semble difficile de convaincre les personnes d'utiliser de manière raisonnée leur automobile. De plus, les publicités ne cessent de vanter cet objet que les constructeurs améliorent sans cesse : peu à peu, les véhicules deviennent moins polluants (réduction de la consommation d'énergie, diminution des émissions polluantes les plus nocives, recherches de nouvelles énergies, de carburants et huiles plus propres...) et moins bruyants (moteurs plus silencieux, profilage des pneumatiques, aérodynamisme plus travaillé). En outre, ils sont dotés d'appareillages électroniques sécurisants (ABS, Air-bag) et facilitant le voyage (GPS). En réponse aux préoccupations environnementales à l'ordre du jour, les matériaux utilisés pour la construction des véhicules permettent un meilleur recyclage des épaves.

L'automobile et ses inconvénients

L'achat de la voiture représente un coût important pour l'automobiliste qui doit en plus assumer des frais de fonctionnement élevés. 15 % des dépenses d'un ménage sont ainsi consacrées à l'automobile, soit la quasi-totalité du budget consacré au transport. Les coûts de l'automobile ne sont pas strictement financiers. L'utilisation de l'automobile a des impacts négatifs pour les personnes mais également pour la ville. Tout d'abord, les personnes sont confrontées à des pollutions atmosphériques et à des nuisances sonores importantes. Certains de ces impacts sont contestés. D'une part, les constructeurs mettent en avant les améliorations apportées et d'autre part, l'interprétation des statistiques peut donner lieu à des hypothèses contradictoires quant à la cause exacte de l'effet de serre (pollution atmosphérique ou rayonnement magnétique du soleil).

La ville est également atteinte dans son organisation. Des zones désaffectées apparaissent de plus en plus à la périphérie immédiate des centre-ville ; ces zones ont été progressivement délaissées par les citadins au profit de zones commerciales et de parcs d'affaires situés à l'extérieur de la ville, facilement accessibles en voitures.

L'usage individuel de l'automobile et le droit à la liberté de déplacement vont a priori à l'encontre des intérêts collectifs. Cet antagonisme rejoint celui de l'automobiliste métropolitain qui souhaite bénéficier d'infrastructures routières de haut niveau mais qui, lorsqu'il se retrouve riverain, s'oppose systématiquement à la construction de ces infrastructures lorsque celles-ci sont trop proches de son domicile. C'est tout le syndrome du NIMBY (Not in my back yard, « pas près de chez moi ») que les autorités publiques doivent prendre en compte (figure 11).

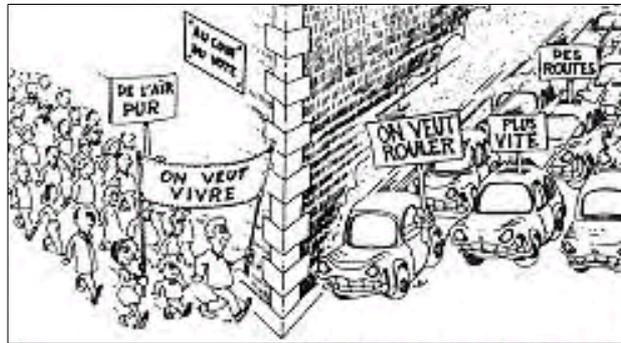


figure 11 : Antagonisme entre riverains et automobilistes
Source : Association Suisse des Transports, novembre 1999

Transport individuel ou collectif : les termes du choix

Des enquêtes montrent bien que les automobilistes sont conscients qu'une diminution du trafic améliorerait l'accessibilité générale (figure 12) et qu'ils sont donc favorables au développement du transport public. Venant appuyer ce constat, F. Beaucire remarque qu' « on ne peut faire passer en une heure que 200 personnes par mètre de largeur de voie en voiture, contre 1500 en autobus et 3600 à pied... ».

La consommation de l'espace public par la voirie et le stationnement nécessaire à l'automobile est très importante en ville. Aux États-Unis, par exemple, la moitié de la surface des villes est occupée par les routes, les garages et les parking (65% à Los Angeles), et l'espace consacré à l'automobile est plus important que celui occupé par les habitations [Stewart, 2000]. Or, il est acquis que toute augmentation de l'espace consacré à l'automobile se traduit par une hausse de circulation automobile qui finit

rapidement en congestion, nécessitant donc une augmentation de l'espace automobile...

La série de photos qui suit provient d'une expérience originale réalisée à Denver (USA) en 2001 [Robert, 2005]. Elle montre de quelles manières différentes il est possible de transporter 35 personnes et comment une plus grande mixité des modes de déplacement est une solution viable pour le transport de personnes.



figure 12 : Une mesure excessivement simpliste de la consommation d'espace, et pourtant...

Aujourd'hui et malgré la prise de conscience en cours, la voiture particulière reste le mode de transport préféré des urbains hormis ceux des très grandes ville où les moyens de transport collectif sont adaptés et performants (métro, RER, bus...).

Même sur un temps très court, la progression de l'automobile peut être considérable comme le présente le tableau 5.

| | Enquête Transport 1981-1982 | Enquête Transport 1993-1994 | Évolutions Inter-enquêtes |
|------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| Deux roues | 13 % | 6 % | -7 points |
| Voitures particulières | 76 % | 84, % | +8 points |
| Transports en commun | 11 % | 10 % | -1 points |

tableau 5 : Évolution du partage modal pour les modes mécanisés

Source : Madre et Maffre, 1997

Les transports publics, trains, tramways, bus classiques ont été conçus sur le modèle « fordien », de production de masse et d'économie d'échelle : le même transport, sur le même itinéraire, pour tous, et en même temps. Ce type de transport est efficace mais laisse échapper une part de plus en plus grande des déplacements effectués.

Le retour constaté vers le centre-ville reste cependant trop limité pour constituer une véritable alternative ; il est donc nécessaire de développer des transports publics plus ajustés. Ils doivent desservir l'ensemble des territoires métropolitains en combinant les divers modes de transport et en utilisant les possibilités qu'offrent les

technologies de l'information et de la communication (TIC). Le transport public doit chercher à se rapprocher d'un service en porte à porte [Asher, 2001]. En d'autres mots, « *si la priorité est à donner aux transports en commun sur les liaisons à grand débit, il faut aussi mettre en place des formules de transports innovants flexibles et faire des expériences afin de mesurer l'accueil du public* » [Moustacchi et Payan, 1999].

2.3 Le transport public est encouragé à se développer

Le transport public comme alternative

L'allongement des distances favorise les déplacements motorisés au détriment de la marche et du vélo pour une part croissante des déplacements quotidiens. En ce sens, le transport public se place donc sur le même segment que l'automobile. Le European Local Transport Information Service [Eltis] ⁶ a comparé les performances de l'un et l'autre modes, en termes d'accessibilité, d'efficacité et de coûts sociaux.

Assurer l'accessibilité pour tous aux activités urbaines

Aujourd'hui, dans les villes européennes, 50 % des citoyens dépendent du transport public pour leurs déplacements. Cette population « captive » du transport public comprend les ménages non motorisés et les personnes appartenant à un ménage motorisé mais dont l'automobile est utilisée par un autre membre du ménage ; elle inclut aussi les personnes qui ne peuvent pas ou ne veulent pas conduire et qui ne trouvent pas nécessairement un conducteur pour les transporter. Pour cette population, le transport public est absolument nécessaire afin d'avoir accès au travail et aux loisirs. Pour les plus démunis, l'usage du transport public mérite d'être facilité par un tarif « social », compensant leur faible pouvoir d'achat. Aider la vie sociale des citoyens qui n'ont pas d'automobile constitue une des missions spécifiques du service public de transport.

Utiliser au mieux la capacité d'investissement

La course à l'investissement routier n'apporte pas de réponse durable aux besoins croissants de mobilité urbaine. L'utilisation optimale des ressources de la collectivité impose de rechercher les solutions alternatives pour écouler le trafic des heures de pointe. En terme de capacité de transport offerte par unité monétaire investie, le

⁶ www.eltis.org/fr/indexf.htm

transport public en site propre surclasse très nettement les voies routières rapides : pour une même dépense d'investissement, une ligne de RER transporte 60 000 voyageurs par heure et par sens au lieu de 7 500 pour une autoroute à 2 fois 3 voies. Pour les liaisons très fréquentées en zones denses ou entre la périphérie et le centre des grandes agglomérations, le transport public en voie ferrée réservée (site propre), remporte de loin la palme de l'efficacité.

Utiliser au mieux l'espace urbain disponible

Avant tout investissement supplémentaire, il convient déjà d'optimiser l'usage de l'espace de voirie disponible. La supériorité du transport public dans ce domaine est aussi évidente : en heures de pointe, une file de circulation permet d'écouler 2 à 4 fois plus de voyageurs en tramway ou en autobus qu'en automobile. De plus, les véhicules de transport public stationnent peu, tandis que les automobiles passent l'essentiel de la journée en stationnement. Pour un déplacement domicile-travail de 10 km aller-retour, avec stationnement au lieu de travail, l'automobile consomme 10 à 30 fois plus d'espace que le transport public. Dans le centre des villes, où se regroupent les activités à haute valeur ajoutée et les lieux de culture et d'échanges, l'espace est un bien rare et convoité qui ne mérite pas d'être gaspillé en parkings et voies rapides. C'est une des raisons fortes pour laquelle la priorité doit être donnée au transport public en centre urbain dense de manière à contenir la présence de l'automobile dans de strictes limites.

Limiter la consommation d'énergie, les accidents de la circulation et les nuisances urbaines

L'avantage du transport public face à l'automobile est tout aussi incontestable en matière d'utilisation rationnelle de l'énergie, de sécurité, de bruit et de pollution atmosphérique. Par voyageur au kilomètre transporté, il consomme 2 à 3 fois moins d'énergie et il provoque 10 fois moins de décès accidentels [Eltis]. Les autobus polluent beaucoup moins que l'automobile par voyageur au kilomètre. Le bruit engendré par la circulation automobile gêne un citoyen sur deux, tandis que celui provoqué par les transports publics ne concerne qu'une petite minorité d'entre eux.

Le transport public contribue aussi à l'attractivité de la ville et à la fluidité des échanges économiques. Celui-ci a une capacité plus grande que l'automobile à optimiser l'usage de l'espace et à écouler des flux élevés pour un investissement

moindre. Cette performance retentit sur le dynamisme des activités économiques et sur la qualité de vies des personnes qui y contribuent.

Assurer une priorité réelle au transport public et accroître sa clientèle

Les autorités publiques disposent de leviers de décision pour favoriser les modes de transport durables

Maîtriser l'extension des agglomérations

Le développement en périphérie de zones d'habitat peu denses, la dispersion des activités et la multiplication des centres commerciaux dotés de vastes parkings ne peuvent qu'encourager l'usage de l'automobile et contribue à dévitaliser le tissu des centres villes et des quartiers traditionnels de première couronne. L'avenir de la ville « européenne », lieu d'échanges et de convivialité, est directement lié à celui du transport public. Pour éviter la dispersion de l'habitat et des activités, pour conserver aux zones centres leurs habitants et leurs emplois, il faut établir et faire respecter des plans d'urbanisme encadrant les constructions périphériques et favorisant la densification autour des stations et des gares desservies par des transports publics performants.

Maîtriser l'usage de l'automobile en ville

Lorsque le stationnement est facile et gratuit à la destination, l'automobile est presque toujours préférée au transport public. La limitation du nombre de places de parking, la réglementation horaire et la tarification du stationnement sur voirie et hors voirie sont des outils très efficaces de gestion de la mobilité. On peut recourir aux mesures de circulation : plans de circulation protégeant le centre et les quartiers résidentiels, limitation de vitesse et aménagement de voies piétonnes (« quartiers tranquilles »), sites propres ou couloirs réservés aux transports publics, gestion des feux de croisement favorisant ceux-ci... Le paiement électronique permet d'envisager aussi le péage routier urbain comme moyen de réduire la congestion et d'encourager l'usage du transport public comme c'est le cas à Londres.

Améliorer l'attractivité du transport public

Toute politique de dissuasion de l'usage de l'automobile doit être soutenue par une amélioration sensible du service de transport public. Autrement dit, il faut avant tout que le temps de parcours de la porte de départ à la porte d'arrivée ne soit pas dissuasif : la circulation en site propre permet au transport public de doubler sa

vitesse en n'étant pas mêlé au trafic général et gêné par les embouteillages. Le site propre favorise aussi la régularité des temps de parcours et le respect des horaires. A moyens constants, en parc de véhicules et en heures de conduite, le site propre permet en outre de renforcer la fréquence de passage aux arrêts, puisque les temps de rotation sont réduits. Enfin, en l'absence de conflits de circulation, la conduite des véhicules est plus confortable pour les passagers [Lebreton & Beaucire, 2000]

Le confort prend aussi une grande importance : les matériels sont en progrès constant en matière de design, d'accessibilité (pour les personnes à mobilité réduite, âgées, chargées de bagages ou accompagnées d'enfants en bas âge) et de performances environnementales (silence de roulement, limitation des émissions de polluants).

L'amélioration concerne aussi les lieux de correspondances intermodaux qui tendent à devenir des lieux de vie urbains avec commerces et services d'usage quotidien.

Pour beaucoup d'automobilistes, le transport public n'est même pas envisagé comme mode de déplacement alternatif parce qu'il n'est pas connu. L'information du voyageur à domicile (sur les itinéraires, les horaires...) et le marketing individuel doivent participer à la promotion d'un transport public moderne qui ne se limite pas à son rôle de service social pour les non-motorisés.

L'informatique et les télécommunications permettent de donner au voyageur une information en temps réel sur les horaires et les temps d'attente tout en améliorant le domaine de la tarification et de la billettique. La *smart card* n'est pas seulement un puissant outil de rationalisation de la tarification, de lutte contre la fraude et de connaissance du trafic ; c'est aussi un levier de la politique commerciale et une image de modernité pour le transport public.

L'avenir du transport public passe enfin par une diversification des services (incluant les taxis, la « voiture partagée » ou les services touristiques). Le transport public est une composante de l'activité urbaine qui sert d'appui aux collectivités publiques et aux entreprises pour la création d'emplois, la revitalisation des quartiers « sensibles », l'animation des espaces publics ou encore à des opérations d'urbanisme liées aux infrastructures de transport et aux pôles d'échanges.

3 De nouvelles pistes pour tendre vers une mobilité durable

L'amélioration des modes de déplacements pour tendre vers une mobilité durable doit porter sur l'ensemble du registre disponible en matière de transport. En ce qui concerne les faibles distances, la palette des solutions alternatives est relativement large et mérite d'être passée en revue. Ensuite, pour les autres distances, nous verrons en quoi l'intermodalité permet de tirer un meilleur profit des ressources existantes. Enfin, nous envisagerons le cas du transport à la demande qui requiert un effort important d'innovation et qui constitue le coeur de notre recherche.

3.1 Des solutions alternatives pour les faibles distances

Au côté des modes doux habituels (vélo, marche à pied), les tapis roulants et des nouveaux véhicules électriques commencent à se poser comme solutions alternatives en raison de la faveur qu'ils reçoivent déjà du public.

Les modes doux

Les modes doux, vélo et marche à pied, ne relèvent assurément pas des transports publics. Leurs utilisateurs sont cependant semblables à ceux des transports en commun car il s'agit aussi de personnes qui renoncent à la voiture par choix ou par nécessité [Beauvais & Fouquet, 2001].

La cohabitation entre les modes motorisés et non motorisés est difficile. Les risques encourus pour un cycliste sur la voirie en heure de pointe sont élevés et peuvent décourager. F. Héran [1999] rappelle « *des seuils théoriques de vitesses à partir desquels une mixité est envisageable entre trafic motorisé et non motorisé* :

- *10 km/h pour que la plus grande majorité des piétons puisse se déplacer en sécurité dans un espace mixte, sans trottoirs ni séparation physique entre les différents modes de déplacements ;*
- *30 km/h pour qu'une grande majorité de cyclistes puisse se déplacer dans une rue sans aménagements cyclables ».*

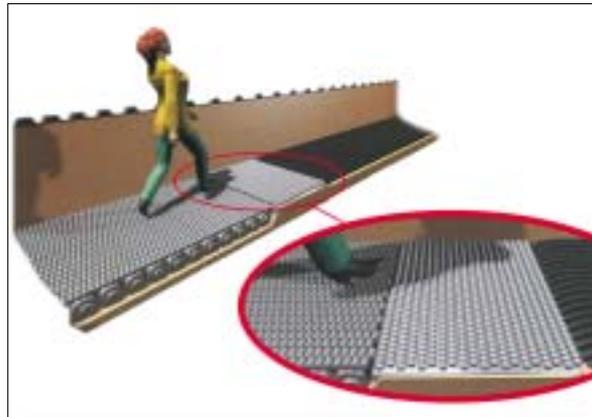
La voirie doit donc être repensée si l'on souhaite favoriser le vélo. En effet, « *la mauvaise conception des zones à faible densité, la qualité médiocre des espaces*

publics de circulation des piétons et des bicyclettes, l'insécurité » associées au fait que les « *transports collectifs classiques sont peu performants sur ces courtes distances* » ont pour conséquences qu'en Île-de-France, par exemple, « *la moitié des déplacements en automobile a lieu sur une distance de moins de trois kilomètres et le quart sur une distance de moins d'un kilomètre à vol d'oiseau* » [Asher, 1998]. En France, de grandes villes (Paris, Lyon, Strasbourg, La Rochelle) développent fortement l'usage du vélo. Ces villes proposent un réseau de pistes cyclables cohérent, de nombreux points de stationnement favorisant l'accès aux lieux et transports publics. Lyon développe Velo'V, un programme de location de vélos à grande échelle. L'originalité de la démarche consiste à financer le projet par les concessions de mobiliers urbains.

Les tapis roulants

Déjà, à l'occasion de l'Exposition internationale de 1900, est mis au point un trottoir de 5 km roulant à la vitesse de 15 km/h [Merenne, 1995].

De nos jours, un tapis roulant conçu par la Régie autonome des transports parisiens (RATP) et fabriqué par les Constructions industrielles de la Méditerranée (CNIM), emmène ses voyageurs, en quelques mètres et sans à-coups, à une vitesse proche de celle d'un autobus en ville.



La principale difficulté est de passer d'une vitesse de marche à pied à la vitesse de 3 mètres par seconde (11 km/h) sans déséquilibrer les utilisateurs. Une succession de rouleaux cannelés, imbriqués les uns dans les autres, permet d'assurer une accélération du déplacement jusqu'au tapis central, zone de grande vitesse.

Ces tapis rapides sont intéressants surtout dans les lieux d'intenses va-et-vient comme les métros, les gares et les aéroports [Sciences et Vie, Juillet 2002]. Anselme Cote, chef de projet à la RATP, indique que les vitesses sont comparables aux modes lourds comme le métro. Un tapis roulant long de 2 km installé à la gare Montparnasse transporte ainsi près de 10.000 personnes en une heure.

À Hong-Kong, le Hill Side Escalator se compose de vingt escaliers mécaniques et trois trottoirs roulants. Sa vitesse est de 0,65 mètres par seconde et il transporte plus de 43000 passagers par jour sur une distance de 860 mètres.



Il relie le quartier des affaires du Mid-Level et un quartier résidentiel situé à mi-pente du mont Victoria. Ce mode de transport, non polluant sur le site, peut s'intégrer dans un espace urbain étroit et encombré [Sciences et Vie, août 1994].

De nouveaux véhicules individuels électrique

Le Segway Human Transporter⁷ est un véhicule électrique à deux roues qui s'inscrit dans la famille des rollers, des skateboards et autres trottinettes. L'appareil est hautement technologique car un ensemble de gyroscopes et de capteurs assure le maintien en position verticale ainsi que la commande des moteurs électriques couplée à chacune des deux roues. Le contrôle de la position du centre de gravité est effectué cent fois par seconde. Lorsqu'il se penche en avant, le passager est à la fois ramené en arrière par l'action des gyroscopes, ce qui lui évite de perdre l'équilibre, et propulsé en avant par la mise en fonctionnement de la motorisation. Une inclinaison vers l'arrière provoque le freinage, une inclinaison sur les côtés les virages. Les premiers modèles sont testés par des collectivités (ville d'Atlanta, etc.) et des entreprises (Michelin Amérique du Nord, GE Plastics, Amazon.com, etc.) [Le Monde, 4 décembre 2001]. En France, la société Kéolis a promu l'usage de cet appareil dans les villes à Dijon et à Besançon notamment [Rail & Transports, 7 mai 2003]. Les expérimentations menées n'ont pas débouché sur un développement du Segway en France. Depuis 2006, la société Segway propose un appareil de seconde génération plus simple à manier.



Comme les systèmes de location de voitures électriques en ville, ce service fonctionne à partir de stations disséminées en des points stratégiques générateurs de déplacements tels que les campus, les aéroports et les centres de ville. Ces points

⁷ www.segway.com

relais, automatisés ou non, rechargent les batteries des appareils tout en servant de zones de stockage identifiées.

Tous ces modes de transport sont appelé à se combiner entre eux ou être associés aux modes de transport classiques.

3.2 Valoriser les ressources existantes par l'intermodalité

En préambule, il convient de définir en les distinguant les termes d'intermodalité et de multimodalité, ainsi que les notions qu'ils recouvrent.

Le GART (Groupement des Autorités Responsables de Transport)⁸ définit la multimodalité comme le recours à plusieurs modes de transport pour satisfaire des besoins de déplacement. On peut distinguer :

- l'individu multimodal : une personne qui a recours de façon régulière à plusieurs modes de transports différents, choisis en fonction des circonstances et de la nature de ses déplacements ;
- l'offre multimodale : l'infrastructure ou service permettant à une personne d'utiliser au choix un des modes de transport proposés ou de les articuler successivement. (exemple : pôle multimodal, information multimodale).

L'intermodalité, toujours selon le GART, est définie comme un principe d'organisation et d'articulation de l'offre de transport, visant à coordonner plusieurs systèmes modaux par une gestion et un aménagement spécifiques des interfaces entre les différents réseaux [Gart, 1997].

Le rapport final du groupe de discussion du PREDIT-AFVI (Actions fédératives Intermodalité-Voyageurs/Information-communication), paru en juin 2000 stipule que « l'intermodalité reposant sur une complémentarité entre l'ensemble des modes de transports collectifs et individuels », « devait répondre à quatre défis qui peuvent s'inscrire autour du concept de **transport durable** et de qualité de service des transports collectifs ». En d'autres mots, l'intermodalité doit permettre « l'amélioration et le développement des systèmes de transport à usage simplifié » [Predit-Afvi, 2000].

⁸ Politiques et pratiques d'intermodalité – GART – ADEME - février 1999

Idéalement, la chaîne des déplacements devrait s'effectuer en totalité par les transports publics. Les multiples combinaisons possibles entre tous les modes disponibles (transport à la demande, train, tramway, bus) permettent de connecter tous les points du territoire sous des conditions acceptables par l'utilisateur mais également par les collectivités. Dans les faits, et parce que le transport à la demande n'est pas encore présent partout et que le taxi reste onéreux, l'automobile demeure un maillon important dans les pratiques intermodales. Il n'est « *pas concevable aujourd'hui de construire ou d'améliorer des transports collectifs sans prendre en compte l'automobile. La référence en matière de déplacement est l'automobile, dont la part modale est prédominante* » [Predit-Afvi, 2000].

La création de parcs-relais à proximité des stations de bus ou de tramways situées en bordure de ville, associé à une billettique adéquate est un exemple de l'intermodalité où s'exprime la complémentarité entre automobile et transport collectif.

L'intermodalité doit faciliter l'usage des transports collectifs car c'est une demande forte et récurrente de la part des clients et des usagers potentiels. Cette simplification est résumée par le schéma à quatre pétales proposé par le GART (figure 13).

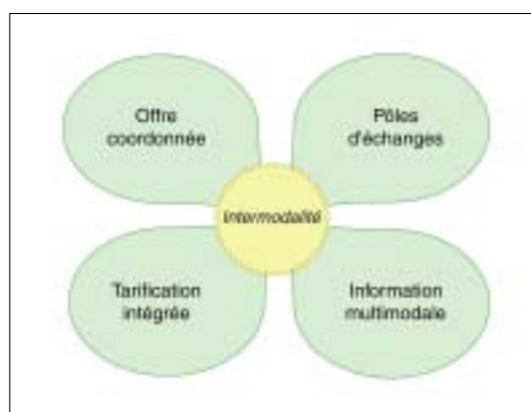


figure 13 : Les 4 piliers de l'intermodalité

Source : Gart, 1997

Ainsi, une intermodalité réussie doit intégrer, selon le GART, ces quatre domaines :

- « *Offre coordonnée : les horaires des systèmes de transport et les temps de correspondance doivent être réfléchis et compatibles entre tous les modes de transport ;*
- *Tarifcation intégrée : un client devant réaliser un parcours traversant plusieurs territoires institutionnels ne doit avoir en sa possession qu'un seul titre de transport valable sur l'ensemble de son voyage. C'est pourquoi, la*

télébillettique est vraisemblablement un apport considérable des nouvelles technologies pour tenter de résoudre ce lourd handicap des TC ;

- *Pôles d'échanges : l'interface entre les modes de transport doit être la plus lisible et la plus simple possible. Les points de convergence des réseaux TC-TC et TC-VP sont des lieux sur lesquels il conviendrait de travailler en termes d'interfaces, de signalétiques, d'animation, voire de gestion de ces espaces « intermodaux ». En outre, la cohérence des horaires entre les trains et les lignes de bus urbains permet d'améliorer l'utilisation conjointe des modes de transports collectifs ;*
- *Information multimodale : l'offre de transport public peut s'avérer difficile à maîtriser surtout sur les territoires peu pratiqués, c'est à dire ceux situés hors de la zone la plus fréquentée par une personne » [Gart, 1997].*

Des dispositifs offrant à l'utilisateur un service optimum dans toute la chaîne de ses déplacements commencent à se mettre en place. Par exemple, des systèmes d'information intégrant l'ensemble des horaires des services (bus, train, tramway..) opérant sur un territoire, permettent de renseigner les usagers quant au meilleur trajet à prendre en combinant plusieurs modes de transport différents. Ces systèmes prennent également en compte les temps de marche à pied entre une station de bus et une adresse postale. Cela implique aussi qu'un réel partenariat s'établisse entre les différents organismes intervenant dans la chaîne intermodale.

L'efficacité du transport collectif à répondre aux besoins de déplacements urbains est très inégale selon les axes et les horaires de la journée. Les nouvelles demandes de mobilité aux causes multiples *« interpellent le transport public (conçu plutôt comme transport public de masse) qui, afin de constituer une véritable alternative à la voiture particulière, doit s'adapter et offrir des services confortables et fréquents »*. Néanmoins, la satisfaction des nouvelles demandes de mobilités *« doit être conciliée avec les exigences de solidarité et d'écologie urbaine des citoyens et des pouvoirs publics :*

- *le droit au transport pour tous : il convient, par une conception du service public d'accessibilité, d'éviter qu'une culture généralisée de la mobilité ne renforce les écarts entre nomades et sédentaires, faisant de l'immobilité un **facteur d'exclusion** supplémentaire ;*

- *la qualité de la vie urbaine et de l'environnement : il faut maîtriser la croissance de la circulation automobile, qui engendre certains dysfonctionnements urbains (congestion, pollution, bruit), pour s'inscrire dans la perspective d'une **mobilité durable**. L'outil principal, à cet égard, est le Plan de déplacements urbains (PDU) » [Bailly & Heurgon, 2001].*

Les auteurs, précédemment cités, répertorient des améliorations apportées aux modes déjà existants pour les rendre plus efficaces et attractifs :

- renforcer les services en heures creuses,
- automatiser intégralement des lignes de métro (Meteor, Val),
- hiérarchiser les dessertes,
- développer des dessertes de soirée et de nuit,
- diversifier les services selon les clientèles et les périodes.

C'est dans ce contexte d'une meilleure adaptation du transport public aux exigences des usagers que se place le transport à la demande.

3.3 Le transport à la demande, une individualisation de l'offre de transport

Les évolutions sociétales présentées précédemment sont défavorables aux transports collectifs classiques. Aujourd'hui, les pouvoirs publics cherchent à favoriser une mobilité durable qui puisse répondre à des exigences environnementales, économiques et sociales. Les services publics de mobilité doivent permettre « à tous de se déplacer dans l'ensemble des agglomérations urbaines, tout en économisant les ressources naturelles non renouvelables et les rejets de carbone. Ce contexte crée des conditions favorables au développement des transports à la demande » [Ascher, 2000].

De même, selon J-P. Bailly et E. Heurgon [2001], « le transport à la demande semble être une solution à la fois souple (en terme d'horaire) pour le client et peu coûteuse pour la collectivité. Si la contrainte liée à la réservation semble restreindre certains de ses avantages, il permet de répondre à des besoins spécifiques et de desservir le périurbain en complétant, le cas échéant, des chaînes de transport multimodal ».

Définition du transport à la demande

Les Transports à la Demande (TAD) sont des transports collectifs terrestres de personnes activés à la demande personnelle d'un usager. Ils combinent les avantages des transports collectifs et des véhicules individuels [Banos et Josselin, 1999]. Ce concept apparaît en Europe à partir des années 1970.

En France, les transports à la demande sont des transports publics et à ce titre entrent dans le champ des compétences des Autorités Organisatrices de Transports (AOT). En zone rurale, les TAD relèvent de la compétence des départements qui peuvent toutefois la transmettre aux communautés de communes, AOT de second rang. En zone urbaine, ils relèvent du périmètre de transport urbain (PTU) d'une commune ou d'une agglomération de communes.

Les services mis en place relèvent donc d'une initiative politique et *« ont pour vocation de desservir des zones peu denses, de faciliter le déplacement des personnes à mobilité réduite, d'offrir un service satisfaisant en heures creuses ou de compléter un service existant. Deux motivations sous-tendent la création de ces services : la recherche d'une baisse des coûts et l'amélioration de l'offre de transport »* [Gart, 1997].

Ainsi, le transport à la demande assure une fonction complémentaire aux transports classiques. Il participe à la lutte contre l'isolement et la déprise du territoire et constitue de fait un outil d'aménagement du territoire. Cette complémentarité se concrétise également dans l'intermodalité. En effet, le transport à la demande constitue parfois un maillon de la chaîne de transport collectif et peut à ce titre être une porte d'entrée sur le réseau classique.

Les transports à la demande introduisent, d'une certaine façon, le concept de « transport public collectif individualisé » [Thevenin, 2002].

Les typologies du transport à la demande

La réalisation d'une typologie des systèmes de transport à la demande est rendue difficile par leur grande diversité. Nous présenterons trois typologies complémentaires qui se basent toutes sur une analyse d'un vaste échantillon de systèmes de transport à la demande en France et à l'étranger.

La typologie du GART

Cette première typologie présentée est établie par le Groupement des autorités responsables de transports [GART, 1997]. Elle classe les transports à la demande selon les critères suivants :

- les secteurs desservis (ruraux, périurbains, interurbains) ;
- les populations visées (actifs pour des déplacements domicile-travail, actifs et non-actifs pour des déplacements tous motifs, personnes âgées ou à mobilité réduite...) ;
- le type d'organisation (publique : autorité organisatrice et exploitant privé ; privée : société à but commercial ou association).

Les transports à la demande sont le plus souvent mis en place par des autorités organisatrices en fonction de divers objectifs : développement local, accès aux zones d'emploi, limitation de l'usage de la voiture, équité territoriale, création d'emplois...

En outre, quand elles s'inscrivent dans les mêmes perspectives, les initiatives d'entreprises privées sont financées par les collectivités, au contraire de celles qui émanent d'associations peu ou pas soutenues.

L'exploitation des transports à la demande est presque toujours assurée par des exploitants privés qui intègrent ces transports dans la « sphère » classique de l'organisation du transport de voyageurs.

Enfin, deux types d'utilisation et deux types de clientèle émergent. A l'intérieur des périmètres de transport urbain (PTU), les transports à la demande complètent les services existants et s'adressent à une clientèle plutôt urbaine qui peut être incitée à abandonner la deuxième voiture. En dehors de ces périmètre, les transports à la demande sont conçus comme de mini-réseaux de transport rural, s'adressant à des « captifs » : personnes âgées, personnes à revenus modestes, enfants...[Gart, 1997].

En terme d'organisation, les transports à la demande fonctionnent sur le principe de « lignes virtuelles » à déclenchement. Ils sont fréquemment soumis à des horaires et des itinéraires fixes, qui peuvent parfois être adaptés, et ne fonctionnent qu'en cas de réservation demandée par le client (réservation téléphonique passant par un central ou adressée directement au conducteur).

La priorité est donnée aux véhicules de petits gabarits (5 à 15 places) dont les coûts d'acquisition et de fonctionnement sont bas et qui supporte un taux de fréquentation à la course assez faible.

En revanche, les dépenses de promotion ciblées de ces services sont plus élevées que celles du réseau général. Enfin, le personnel affecté au transport à la demande a un statut spécifique. Les conditions de travail sont particulières (temps partiel), la rémunération est plus faible et le permis en transport en commun n'est pas obligatoire pour les véhicules de moins de 9 places. Ces conditions font que les conducteurs des transports à la demande ne sont pas recrutés parmi les conducteurs des réseaux urbains ou interurbains. Quand ils ne sont pas chauffeurs de taxis, ce sont souvent des jeunes, en formation ou bénéficiant de contrats aidés.

Enfin, concernant le volet financier, le GART [1997] indique que la tarification pratiquée est très variable mais reste relativement proche de celles des services réguliers. Ainsi, le plus souvent, les recettes n'équilibrent pas les coûts de fonctionnement et les collectivités doivent participer au financement du transport à la demande. L'intervention d'un financeur privé (transporteurs, entreprises desservies) reste exceptionnel.

Une typologie basée sur le fonctionnement des systèmes

Une autre typologie est proposée par A. Banos et D. Josselin [1999] du groupe de recherche Tadvance, qui, grâce à une analyse statistique exploratoire, ont fait ressortir certaines caractéristiques des expériences de transport à la demande en France et à l'étranger.

Tout d'abord, ils distinguent les transports à la demande par leur fonctionnement :

- mode de réservation (ramassage effectué en temps-réel ou nécessité de réserver très en avance) ;
- tarification (déconnectée ou non de la billettique du réseau) ;
- lignes fixes définies une fois pour toute ou modifiées en fonction des appels.
- Exploitation par une société privée, en lien ou non avec une autorité organisatrice ou dans un cadre associatif.

Les auteurs montrent que dans leur grande majorité, les transports à la demande existants visent à regrouper une demande ponctuelle pour optimiser la desserte et

diminuer les coûts d'exploitation, tout en répondant à la demande de service exprimée par les usagers. L'équité est acquise car le transport à la demande peut garantir à tous les usagers l'accès à un service de transport en commun. Il peut également favoriser le maintien des personnes âgées à leur domicile ou encore, fournir un service de nuit dans les villes...

Actuellement, et malgré la forte combinatoire potentielle des trajets possibles d'un TAD, ce type de service ne touche qu'une faible population et ne génère que des flux modestes. En effet, il ne dessert que des zones peu peuplées, ne vise que des niches commerciales bien ciblées ou ne vient qu'en complément de services existants. Cependant, des arguments militent en faveur d'un développement des transports à la demande dans le futur :

- l'apport de méthodes d'optimisation spatiale (grâce aux TIC) permettra d'augmenter l'efficacité des systèmes et donc leur rentabilité (regroupement, optimisation des dessertes...), pour peu qu'une prise en compte réelle de l'évolution de la demande (immédiateté, ubiquité, etc.) soit réalisée (importance des aspects spatio-temporels),
- la forte demande politique actuelle pour ces nouveaux systèmes de transport faisant suite ou accompagnant les aspirations éco-citoyennes de la population, pourra permettre l'amélioration de certains points délicats tel que l'intégration des taxis qui assurent le plus souvent les dessertes,
- l'augmentation prévisible des flux consécutive à la mise en place d'un meilleur service ; à cet égard, le suivi et l'audit des clients desservis, des taxis affrétés et des lignes activées est nécessaire pour améliorer le système.

Le développement des TAD a suscité beaucoup d'espoirs à partir des années 1980 et 1990. Un grand nombre d'expériences ont été lancées, en France comme en Europe. Peu d'entre elles ont survécu. Les raisons de ces échecs semblent diverses : faible rentabilité économique, meilleure attractivité tarifaire des modes de transport classiques, tentatives infructueuses de remplacer des systèmes réguliers par des transport à la demande, absence de méthode pour améliorer les services et l'efficacité des systèmes, etc. Il semble en fait que les TAD n'aient pas encore véritablement trouvé leurs marques. Ils ne constituent toujours pas un segment de marché clairement identifié par les exploitants comme par les usagers des transports, mais

restent davantage un élément de visibilité et de promotion politiques et commerciales [Banos et Josselin, 2002].

Une typologie basée sur la dimension spatiale des systèmes

Nous présentons la typologie proposée par E. Castex [2005], également du groupe de recherche Tadvance, qui classe les services de transport à la demande selon leur dimension spatiale. Une méthode est proposée pour décrire les formes de desserte spatiale en fonction de trois variables : l'organisation territoriale, les origines et destinations des déplacements, l'orientation des flux comme indicateur des déplacements réalisables en transport à la demande.

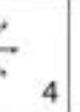
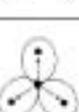
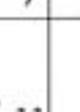
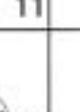
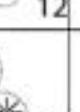
| | | | Orientation des flux | | | |
|--|--|---|---|---|--|---|
| | | | Centripète | Centrifuge | Centripète et centrifuge | multidirectionnel |
| Contraintes spatiales | Territoire Continu | Origines | | | | |
| | | Destinations | | | | |
| | Dispersées | Dispersées | | | |  1 |
| | | Présence d'un générateur de flux |  2 |  3 |  4 |  5 |
| | Concentrées | Présence d'un générateur de flux |  6 |  7 |  8 |  9 |
| | | | Discontinus | Dispersées |  10 |  11 |
|  14 |  15 |  16 | | |  17 | |

figure 14 : Les formes de desserte spatiale de transport à la demande

Source : Castex, 2005

Cette typologie repose sur 17 formes de desserte spatiale qui identifie les systèmes de transport à la demande à un espace structuré par des pôles et des flux et non plus à un simple mode de fonctionnement [figure 14].

L'analyse des systèmes de transports à la demande qui a permis cette recherche montre que la tendance est à la recrudescence des formes semi-poralisées ou d'arrêts

à arrêts (2e et 3e lignes du tableau) qui constituent des solutions de compromis entre les contraintes des exploitants ou de l'AOT et celles des usagers [Castex, 2005].

Cette classification présente l'avantage de faire abstraction des particularités locales et d'être ainsi transposable à un maximum de services [Castex, 2005].

Quelques exemples de transport à la demande

Les grands groupes de transport collectif qui se sont longtemps désintéressés de la question, commencent à revoir leur offre en matière de transport à la demande.

Dans la province du Nord-Brabant des Pays-Bas, PZN, une filiale de Veolia Transport exploite un système de transport à la demande de grande dimension. PZN gère 3 millions de voyages à la demande chaque année. De la même manière, à Baltimore aux États-Unis, Veolia Transport assure plus de 600 000 voyages à la demande par an, dans une zone qui rassemble 2,5 millions d'habitants.

En France, Véolia propose Créabus, un système de transport à la demande transposable. sur simple appel téléphonique (ou sur Internet), l'utilisateur réserve son déplacement jusqu'à une demi heure à l'avance. A l'heure convenue, le client se rend au point d'arrêt, où Créabus vient le chercher pour l'emmener jusqu'à sa destination. Pour son retour, le client reprend Créabus à l'heure choisie lors de sa réservation. Les chargés de clientèle du système peuvent en temps réel proposer des solutions d'optimisation pertinentes en fonction des demandes reçues en s'appuyant sur une base cartographique et grâce à la localisation des véhicules par GPS.

Les Taxibus de Strasbourg proposent quant à eux *« une desserte de soirée des communes éloignées du centre. Le service se substitue à un service de bus traditionnel : il dépose chacun de ses clients à l'arrêt de bus le plus proche de son domicile. Cependant, l'itinéraire est laissé à l'appréciation du conducteur, en fonction des destinations des usagers »* [CUS Magazine, Octobre 1999].

La communauté d'agglomération de Saint-Brieuc a mis en place un transport à la demande avec le soutien de l'ADEME en 1990. L'informatisation du système permet *« d'éviter la contrainte des réservations manuelles qui ne peuvent fonctionner 24 h sur 24 et 7 jours sur 7 »* [La gazette des communes, mai 2001]. *« Grâce à ce système, 50 lignes virtuelles irriguent, en rabattement sur le réseau existant, un espace périurbain peuplé par 20 000 habitants. Comme sur une ligne classique, chacune de ces dessertes dispose d'arrêts et d'horaires fixes (5 à 25 aller-retours*

quotidiens suivant les lignes), mais la ligne est virtuelle : seule une réservation, enregistrée au minimum 30 minutes à l'avance par un serveur vocal, déclenchera l'envoi d'un taxi affrété par le réseau de transport public » [Gart, 1997].

Aux États-Unis enfin, le transport à la demande bénéficie d'un cadre législatif très incitatif puisqu'un principe établit que toute personne n'ayant pas accès à des lignes régulières doit pouvoir être transportée à un prix comparable. Appelé Paratransit, ce mode de transport à la demande est géré à 90% par des entreprises privées. Il représente environ un milliard de dollars par an, soit le dixième du chiffre d'affaire réalisé par l'ensemble des lignes régulières.

Ces quelques exemples illustrent la grande variété des systèmes de transport à la demande existants. De nombreux autres exemples sont cités dans les ouvrages de référence [Gart, 1997 ; Ascher, 2000 ; Bailly & Heurgon, 2001, Datar/DTT/Ademe, 2004]. D'autres encore sont disponibles sur les sites Internet des Autorités Organisatrices de Transports qui les proposent. Une analyse des transports à la demande en France réalisée en 2004 permet de recenser près de 400 transports à la demande [Datar/DTT/Ademe, 2004]. Ces transports à la demande recensés cumulent 1 million de voyages par an, dont :

- environ 400 000 pour les TAD ruraux tous publics,
- environ 300 000 pour les TAD périurbains tous publics,
- environ 300 000 pour les TAD destinés à une catégorie précise.

Seulement 20 à 30 000 personnes, soit 0,2 % de la population rurale française, utilisent les TAD ruraux tous publics, du fait d'une couverture très partielle des zones rurales, mais aussi du fait que les personnes âgées constituent près de 90 % de la clientèle des TAD ruraux existants. La plupart des TAD se gère très facilement « à la main ». Pour cette raison, mais aussi du fait du coût des logiciels, seulement 1 TAD sur 6 utilise un logiciel de gestion [Datar/DTT/Ademe, 2004]. Il est à regretter que beaucoup de ces systèmes de transport à la demande souffrent d'un déficit d'efficacité dans les solutions technologiques avancées. Leur amélioration ouvre un champ de recherche prometteur.

Conclusion

L'automobile reste le mode de transport privilégié dans la plupart des villes alors qu'elle engendre des coûts économiques, sociaux et environnementaux qui contreviennent au développement durable. L'usage de l'automobile est la conséquence de l'étalement urbain qui pénalise les transports publics peu adaptés à une desserte diffuse. Pourtant, les autorités publiques se doivent de garantir un droit au transport pour tous, tout en respectant les principes du développement durable. Pour ce faire, les autorités en question doivent repenser leurs orientations politiques en matière d'urbanisme et de transport. C'est donc au cœur de ces enjeux environnementaux et sociaux que se situe le transport à la demande comme alternative à la voiture particulière.

Dans cette perspective, le recours aux techniques les plus avancées telles qu'elles sont développées dans les systèmes dits « de transport intelligent » offre une vraie chance de succès au transport collectif en leur permettant de surmonter certains handicaps structurels. A cet égard, le TAD est particulièrement bien placé pour tirer le meilleur parti de l'offre technologique et de ses progrès rapides.

Chapitre 2 : « Système de transport intelligent » et transport à la demande

Dans la littérature francophone [ATEC, 2001], le terme anglophone *Intelligent Transport System* est souvent systématiquement traduit par le terme *Système de Transport Intelligent* ou par *Système intelligent de transport*. Encore faut-il préciser que le terme Intelligent en anglais a pris un sens étendu qui ne définit pas seulement une capacité à raisonner mais tend aussi à s'appliquer aux phénomènes s'auto organisant par rétroaction. Ainsi, le domaine des *Intelligent Transport System* concerne principalement l'utilisation de la télécommunication et de l'informatique dans le transport. Par commodité, nous utiliserons le sigle ITS consacré par l'usage.

Dans un premier temps, une présentation des principales applications ITS sera proposée. Ensuite, les présentations de technologies ITS transposables au transport à la demande puis de logiciels de gestion de transport de marchandises et de transport à la demande clôtureront ce chapitre.

1 Le développement des applications ITS pour le transport terrestre

Les ITS ont concernés, par ordre chronologique, tous les modes de transport aériens, maritimes et terrestres. En effet, « *le transport aérien commercial connaissait, pratiquement depuis ses débuts, une régulation par un système de contrôle au sol et les avions ont embarqué très tôt des moyens radio* » [Philippe, 2001]. Le transport maritime a utilisé également l'électronique très tôt pour guider les navires grâce aux radars et aux sonars. Enfin, il faut préciser que les ITS s'appliquent à l'ensemble du système de transport terrestre, incluant l'automobile la logistique des marchandises et le transport public tout mode confondus, même si la publicité faite autour de la « voiture intelligente » laisse à penser que la télématique et l'électronique concernent avant tout ce mode de transport [McQueen, 1999]. Dans ce contexte, précisons que notre attention se porte sur le transport terrestre de voyageurs (figure 15).

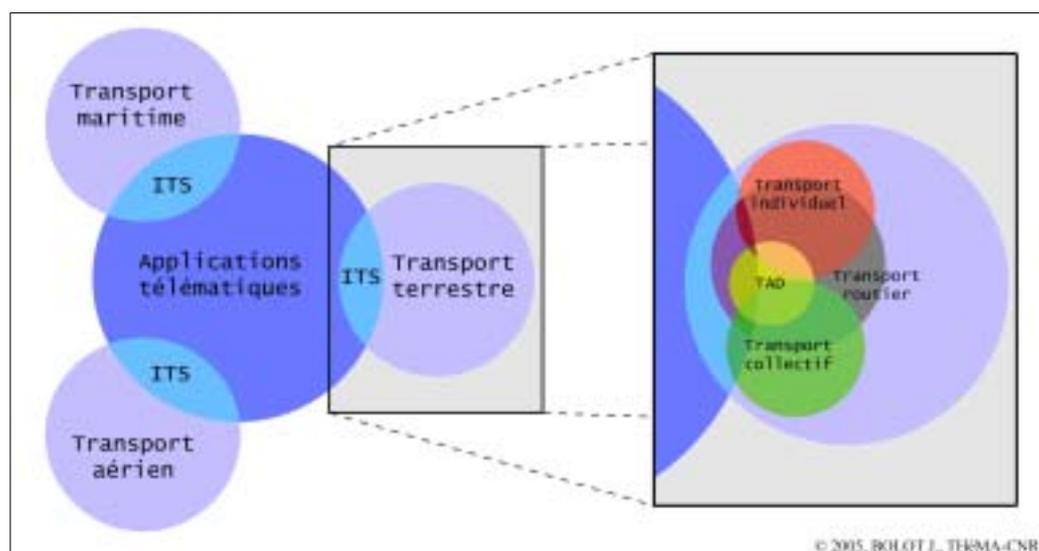


figure 15 : Les transports et la télématique

Dans ce domaine, les applications ITS en cours de développement peuvent être regroupées en plusieurs catégories. Tout d'abord, l'autoroute automatique permet de créer des trains de voitures où ces dernières sont pilotées par l'infrastructure. Ensuite, la gestion de trafic permet au gestionnaire des infrastructures routières de mieux connaître les conditions de circulation sur les réseaux et d'informer les usagers de manière automatique et continue. L'électronique embarquée à bord des véhicules permet d'améliorer les conditions de conduite en termes de confort et de sécurité.

1.1 L'autoroute automatisée pilote les voitures

Aux États-Unis, les démonstrations de conduite automatique menées par General Motors, Radio Corporation of America et l'Université de l'Ohio marquèrent en 1971 l'avènement de l'autoroute automatique qui consiste à faire circuler des trains de voitures. Cet essai effectué dans le cadre du programme stratégique de recherche du département des Transports permettait aux conducteurs de lâcher leur volant puisque la voiture était téléguidée par des émetteurs électroniques balisant la route. Cet ambitieux projet fut le fer de lance des ITS aux États-Unis⁹ et pu monopoliser des fonds importants ainsi que l'intérêt des chercheurs. Mais devant les difficultés prévisibles de partage des responsabilités entre conducteur et exploitant en cas d'accident, ce projet s'est brutalement interrompu [Janin, 2001]. Dans le même temps, au Japon, un projet de conduite automatique vit le jour pour des véhicules guidés par un câble co-axial jouxtant l'infrastructure.

Ce n'est que bien plus tard que d'autres grandes expérimentations eurent lieu. En 1997, une grande démonstration relative à la route automatisée est organisée à San Diego par un consortium américain public-privé. En 2000, au Japon, une démonstration importante est menée présentant des dispositifs automatisés d'aide à la conduite avec une communication entre l'infrastructure et les véhicules [Péan, 2004].

En France, le consortium « LA Route Automatisée - LARA » réunit l'Institut de Recherches INRETS, l'INRIA et le LCPC avec la collaboration technique de grandes écoles. Dès 1999, il s'investit sur des projets de recherche relatifs à la route automatisée et aux aides à la conduite.

1.2 La gestion de trafic

Dans le domaine de la gestion et du contrôle de la circulation, le programme dénommé *Urban Traffic Control System*, destiné à l'interconnexion des feux de carrefours, fut une étape importante qui marquait également la venue de l'ordinateur dans les centres de gestion de la circulation.

Ce type de préoccupation présent aux États-Unis dès le début des années soixante, touche l'Europe plus tard. En Grande-Bretagne, le programme d'optimisation du trafic *Transyt* a été développé par des chercheurs et des consultants à la fin des

⁹ <http://www.itsa.org>

années 60. Cette expérience donnera lieu au développement du logiciel de contrôle de trafic « Scoot ».

En France, l'information relative à la circulation est dépendante de l'institution publique, principalement du ministère des transports et des services de police. Cette situation entraîne des répercussions particulières tant au niveau organisationnel et technique que financier. De nombreux projets ont vu le jour tels que le Centre national d'informations routières (Rosny-sous-Bois), les sept centres régionaux d'information et de coordination routière, le service interdépartemental d'exploitation routière d'Île-de-France. Ces initiatives ont été accompagnées de développements technologiques concernant les capteurs et les logiciels de gestion de trafic. Ceux-ci ont équipé les principales agglomérations (Bordeaux, Nice, Paris, Strasbourg, Toulouse...), sans toutefois permettre l'essor d'une véritable industrie française des systèmes de gestion de la circulation. Des sociétés de conseil spécialisées ont cependant vu le jour [Ygnace J-L., De Banville E., 1999].

1.3 L'information routière embarquée

La communauté européenne a lancé de grands programmes pour soutenir le développement des *ITS*. C'est le début des applications d'électronique embarquée.

Le projet « Prometheus » fut mené par 15 constructeurs, 56 sociétés d'équipement et d'électroniques et 115 instituts de recherche. Cela permit d'obtenir des résultats notamment dans les systèmes d'alerte rapprochée en cas d'accident, les dispositifs de régulation de la vitesse et de la distance, l'amélioration de la visibilité de nuit ou par mauvaises conditions météorologiques, les dispositifs de gestion de flotte.

Initié en 1986, « Carminat » était un programme d'aide à la conduite qui fédérait des projets antérieurs de Philips, Sagem, Renault et Télédiffusion de France. Ce projet avait pour objectif de tester la faisabilité, puis de développer des prototypes de systèmes embarqués. Ceux-ci visaient à informer et aider le conducteur dans sa navigation.

Les programmes de recherche et développement Drive I (1988-1991) & Drive II (1990-1994) insistent sur l'intégration et la diffusion de l'information routière par des systèmes embarqués sans se limiter à la fonction de guidage. Des expérimentations sont menées sur des grands corridors autoroutiers et des régions fortement urbanisées. L'objectif est d'expérimenter l'information routière en temps réel avec une coordination des données provenant de plusieurs centres d'exploitation

français et étrangers, et de diffuser cette information à bord des voitures équipées de systèmes de navigation embarqués [Péan, 2004].

Aux États-Unis, les débuts de l'électronique, sur fond de conquête spatiale, ont donné une impulsion significative à la recherche qui a permis la mise au point d'un système de guidage routier opérationnel. Les technologies de cartographie numérique, de communication entre la route et le véhicule, étaient déjà utilisées par ce système. En faisant appel à l'informatique embarquée, les chercheurs se sont portés vers les systèmes de guidage autonome. Un tel produit fut testé sur une flotte de véhicules utilisés pour la distribution de journaux. Mais l'expérience ne fut pas poursuivie car les financements publics pour la recherche et le développement aux États-Unis furent fortement revus à la baisse par l'administration Reagan.

En 1990, le programme *Intelligent Vehicle Highway Systems* (IVHS) démarre dans le but de développer la télématique automobile. En 1994, l'administration Clinton affiche une politique de transports qui ne se limite pas à l'automobile. Le programme désigné *Intelligent Transport System* (ITS) intègre tous les modes de transport (terrestre, maritime et aérien). L'effort consenti en matière de cartographie numérique à l'époque assure toujours aux États-Unis une position prépondérante.

La cartographie embarquée sur les téléphones portables ne pourra véritablement voir le jour qu'avec la généralisation du GRPS ou, mieux, le téléphone de troisième génération. Néanmoins, des produits sont déjà disponibles. Ainsi, le téléphone GSM (figure 16-a), doté d'un GPS affiche la localisation, la vitesse, la direction et les itinéraires. La base de données cartographique s'enrichit via un téléchargement sur Internet. Le second produit se branche sur les agendas électroniques (figure 16-b). Enfin, le troisième produit, le Streetpilot III¹⁰ (figure 16c) permet un guidage, vocal ou par icônes.

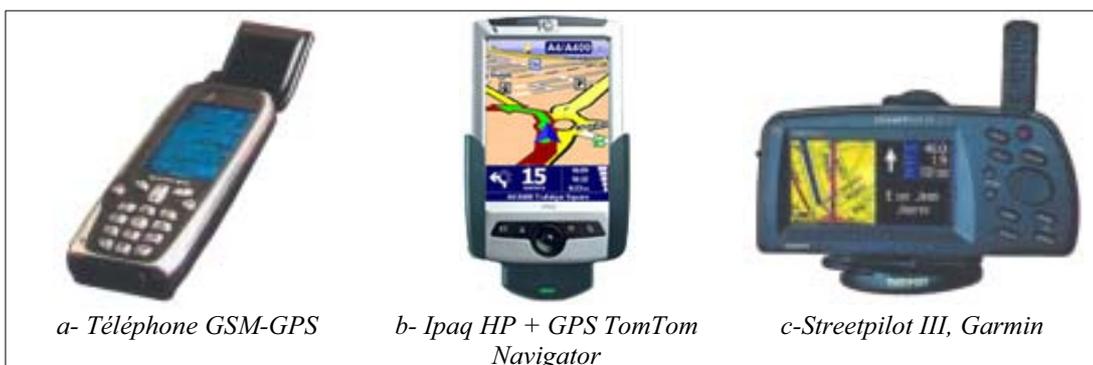


figure 16 : Les nouveaux mobiles tracent la route

¹⁰ <http://www.garmin.com>

Nous verrons dans les pages suivantes que les applications liées à l'électronique embarquée peuvent être profitable au transport à la demande.

Aujourd'hui, il semble que les réflexions relatives aux *ITS* concernent plus la problématique du déploiement que du développement. La recherche se focalise désormais sur les usages sociaux des technologies avec l'apport des sciences humaines ainsi que les raisons de l'échec (freins institutionnels, organisationnels, juridiques, sociaux, économiques plus que techniques ...) du déploiement dans certains domaines [Dobias G., Baret F., Péan S., 2005].

2 Les outils *ITS* transférables au transport à la demande

Les technologies de l'information telles que nous venons de les évoquer peuvent beaucoup apporter aux transports à la demande. Les technologies embarquées, intégrant système de billettique, de localisation par satellites et logiciels de cartographie automatique, constituent l'essentiel de ces apports.

2.1 Les systèmes électroniques embarqués

Nous identifions trois types de systèmes électroniques pouvant directement être utilisés par le transport à la demande. La billettique permet par exemple une bonne pratique de l'intermodalité. Le positionnement par satellite permet d'optimiser les dessertes en connaissant précisément la position des véhicules. Enfin, les systèmes d'aide à la navigation cartographiques calculent les meilleurs itinéraires.

Les systèmes de billettique

La billettique, apparue au milieu des années 1990 vient de franchir une étape décisive avec l'adoption, en 2002, de la norme Intercode, permettant l'interopérabilité. Cette norme est née du besoin de rendre compatibles entre eux les différents systèmes de billettique des réseaux de transports publics, qu'ils soient urbains, départementaux ou régionaux, et de faciliter ainsi le développement de la multimodalité [Transport public, octobre 2003]. Dans ce cadre, le ministère de l'Équipement propose, ACTIF¹¹, un cadre de travail destiné à la mise en oeuvre des transports interopérables en France.

Pour développer une alternative à la voiture dans le bassin rennais mais aussi partout en Bretagne, Rennes Métropole, le Conseil Régional de Bretagne et le Conseil Général d'Ille et Vilaine ont créé la carte unique KorriGo¹². Les titres de transports des différents réseaux pourront être progressivement rechargés cette carte billettique (depuis mars 2006, le réseau de Rennes Métropole, depuis le 20 octobre 2006 pour les TER, à partir de septembre 2007 pour le réseau département).

L'agglomération Clermontoise va proposer pour la fin de l'année 2006, un système de billettique. Ce service constituera une grande étape avec l'application urbaine à grande

¹¹ <http://www.its-actif.org/>

¹² <http://www.star.fr/rubrique.aspx?RubriqueID=241&LangueID=1>

échelle de l'abandon des titres de transport classiques. Seule la vente à l'unité pour un trajet simple sera maintenue. Le rechargement automatique des cartes à puces sera proposé dans tous les points de vente du réseau mais aussi à bord des véhicules et aux stations de tram. De plus, la tarification sera identique pour le tram et le bus. Une offre beaucoup plus performante qui ouvre la voie pour créer de futurs titres de transport multimodaux¹³.

A Tours, un système de télébillettique interopérable à la norme Intercode a été mis en service en 2003. Une carte à puce sans contact est valable dans les bus du réseau urbain et dans les TER de la SNCF. La répartition des recettes n'est pas effectuée en fonction des trajets réellement effectués par les voyageurs mais en fonction des ventes des abonnements. Ainsi, pour chaque abonnement vendu, une somme fixe revient au transporteur-vendeur tandis que le reste est versé aux autres opérateurs sous forme de compensation [Rail & Transports, 25 juin 2003].

Les entreprises proposant des outils de billettiques sont nombreuses (Actoll, Amiel Electronix, Applicam, Ascom Monetel, ASK, Automatic Systems, Cubit France Technologies, ERG, Schlumberger, Sogedex, Thales, Traidis...) ce qui explique la nécessité d'une normalisation dans ce domaine. Dans le même ordre, le souci d'harmoniser le système de billettique d'un territoire oblige au lancement d'appels d'offres communs entre différentes autorités organisatrices de transports. C'est le cas, par exemple, de celui qui associe l'agglomération de Strasbourg et le département du Bas-Rhin. Dans d'autres cas, l'interfaçage des systèmes de billettiques avec les systèmes d'aides à l'exploitation et à l'information voyageurs est recherché. C'est le cas à Clermont-Ferrand où l'appel d'offres comprend l'information aux voyageurs, le système d'aide à l'exploitation (SAE) et la billettique. L'intérêt est de réaliser des économies d'échelles en centralisant les informations [Transport public, octobre 2003].

Gilles de Chanterac, directeur délégué billettique-monétique à la SNCF indique pour finir que *« la billettique dans les transports publics a démarré sous l'impulsion de l'Ile-de-France qui avait besoin de renouveler son système de péages devenu obsolète. La technologie du sans-contact alors balbutiante laissait entrevoir des perspectives fantastiques, notamment en matière de lutte contre la fraude et de relation personnalisée avec les clients. Un rêve que l'on commence à toucher du*

¹³ http://www.letram-clermontferrand.com/atouts/billettique_monetique.php

doigt, même si les choses sont moins simples qu'on ne les imaginait au départ » [Transport public, octobre 2003].

Les systèmes de positionnement par satellites

Il existe plusieurs systèmes de positionnement utilisant les technologies satellitaires mais le *Global Positioning System* (GPS) américain domine actuellement le marché. Le système russe Glonass, équivalent du GPS, souffre des difficultés que rencontre actuellement la Russie, qui ne semble pas en mesure d'assurer le développement et la maintenance de son système. Le projet Européen Galileo¹⁴ [Karamali A., 2002] ne sera opérationnel qu'en 2011.

Le système GPS fonctionne sur une constellation de 24 satellites, répartis sur 6 orbites circulaires à environ 20000 kilomètres d'altitude. Le système utilise le principe de la mesure de la distance basée sur le temps de propagation et du décalage Doppler des signaux émis par les satellites [Haudebourg in Philippe, 2001].

Les transports collectifs de voyageurs en zones urbaines bénéficient d'applications utilisant le système GPS. Cela permet au transporteur de connaître les positions des véhicules, de mesurer leur avance ou leur retard et de demander au chauffeur de réguler en conséquence l'éventuel écart entre la position du véhicule et celle qu'il devrait occuper. Cette information est transmise aux usagers par l'intermédiaire de panneaux d'affichage situés près des stations de bus. Ces systèmes sont de plus en plus développés et fonctionnent selon l'architecture générale présentée par la figure 17.

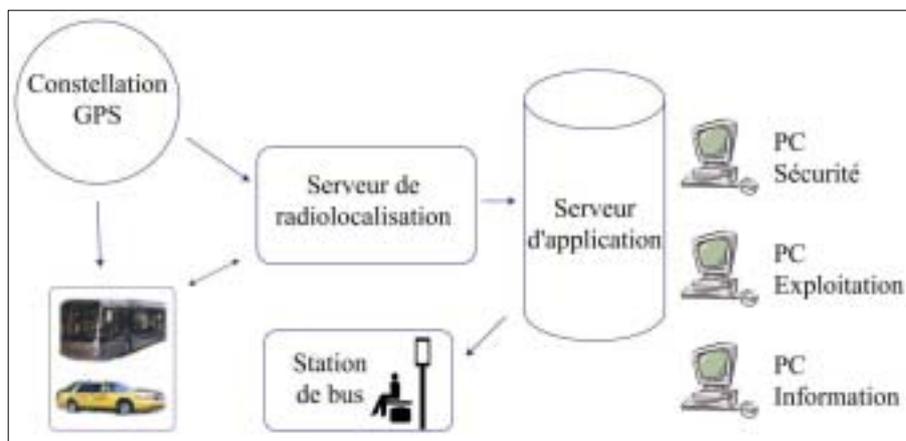


figure 17 : Architecture générale d'un système de gestion de bus

Source : Haudebourg, 2001

¹⁴ http://www.europa.eu.int/comm/energy_transport/en/gal_en.html

La gestion de flotte de véhicules comme les Taxis est une autre application du GPS. A ce titre, la compagnie des Taxis bleus parisiens équipe les véhicules de boîtiers de localisation GPS pour :

- affecter les courses de taxi avec équité entre les chauffeurs tout en optimisant les délais d'approche,
- améliorer le service au client en lui communiquant immédiatement un délai d'arrivée du taxi fiable et en diminuant le temps d'attente par la constitution d'une base de données de temps de parcours,
- informer en temps réel les taxis sur l'offre et la demande [Haudebourg in Philippe, 2001].

Ce projet, en exploitation sur l'ensemble du parc depuis mars 1996, a nécessité deux années de recherche et de développement [Bondarenco, 2001].

La compagnie parisienne G7 équipe également ses véhicules de récepteurs GPS couplés à un système de navigation. Ce système d'aide à la navigation permet de proposer des itinéraires optimisés pour un gain de temps moyen estimé de 10 à 20% par course [Bondarenco, 2001]. En outre, les systèmes de gestion de flotte peuvent également inclure les gestions techniques en planifiant la maintenance des véhicules, en contrôlant les parcours effectués, en optimisant les tournées ce qui améliore les taux de remplissage et limite les parcours à vide. Enfin, il serait possible d'optimiser les tarifs en adaptant l'offre de ceux-ci à la demande [Bollo & Frybourg in Philippe, 2001].

L'efficacité des GPS en milieu urbain est toutefois limitée par certains problèmes techniques. D'une part, le signal GPS peut présenter des pertes de fréquence (50 % d'indisponibilité) provoquées par les obstacles que constituent les immeubles. D'autre part, la précision peut être dégradée selon un facteur de 2 à 10 en fonction des réflexions multiples des ondes radioélectriques sur la façade des constructions. Des systèmes de corrections permettent néanmoins de pallier ces inconvénients mais restent encore coûteux [Haudebourg in Philippe, 2001]. Ils sont par exemple mis en place dans les grandes villes.

Enfin, les bases de données de gestion de trafic commencent à équiper les flottes de véhicules des administrations, des compagnies de transport public, des sociétés de

taxi. C'est le cas à Toulouse ainsi qu'à Paris avec le système Visionaute¹⁵. La société Médiamobile gérant le service Visionaute collecte des données sur le trafic en temps réel fournies par les opérateurs routiers du secteur public (Ville de Paris, DDE) et du secteur privé (opérateurs autoroutiers, compagnies de Taxi). Médiamobile traite ces informations, les met en forme pour qu'elles soient accessibles à l'utilisateur final par Internet, téléphonie mobile ou système de navigation embarqué.

La cartographie embarquée et dynamique

Les produits de cartographie embarquée destinés au grand public sont directement issus des recherches financées dans le cadre des *ITS*. Les éditeurs de cartographie numérique offrent aux usagers en plus des « classiques » calculs d'itinéraires et des systèmes de navigation en temps réel tout un panel d'informations concernant, par exemple, les hôtels, les stations-services, le tourisme. Les bases de données sont régulièrement mises à jour par Internet ou par CD-ROM. Le marché de ces cartes numériques est en plein essor même lorsqu'elles ne sont pas destinées à une utilisation dans un véhicule. En effet, en France, il se vend chaque année pas moins de 100 000 cédéroms dédiés à la cartographie.

Cette démocratisation de la cartographie numérique vient en amoindrir les coûts et favorise les mises à jour régulières.

La cartographie dynamique donne également la possibilité aux exploitants de rafraichir les informations cartographiques en temps-réel sur leur site Web. Lors de la modification, la mise à jour s'effectue directement dans la base et le programme d'affichage en tient compte aussitôt. La société Actigraph¹⁶, par exemple, commercialise cette technologie qui est utilisée par les compagnies de transports en commun à Caen et à Reims notamment [Transport public, juin 2003].

Dans ce domaine, les progrès logiciels sont constants et les produits deviennent vite dépassés. Pour augmenter la durée de vie des appareils, il est nécessaire que les mises à jour des bases de données puissent être réalisées facilement et à moindre coût.

¹⁵ <http://www.visionaute.tm.fr/visionaute.html>

¹⁶ <http://www.actigraph.com/special/majcarte>

2.2 Des logiciels de gestion de tournées issus des ITS

Le transport de marchandises constitue le domaine d'application privilégié par les éditeurs de logiciels qui sont en forte concurrence [Transport & Technologies, Juillet/août 2002]. De ce fait, les technologies évoluent très vite vers des solutions en temps réels dont peut bénéficier à son tour le transport à la demande.

Les logiciels dédiés au fret

Les spécialistes de la logistique proposent des logiciels adaptés à la planification des services et des tournées de distribution de marchandises. L'une des solutions consiste à munir les véhicules d'une informatique embarquée qui couplée au positionnement par satellites et aux transmissions par GSM, permet le temps-réel. Ainsi, Distriplanner, logiciel édité par Logsyal¹⁷ (Air Liquide) suit chaque véhicule équipé, relève sa position et trace son itinéraire sur la carte, analyse au coup par coup les livraisons. Il peut donc proposer des améliorations de trajectoires, intégrer immédiatement les conséquences d'une modification, et publier en même temps, en Intranet ou sur Internet, les informations destinées aux opérateurs ou aux clients [Rail & Transport, mai 2002].

La société Inovia¹⁸ s'est associée à Maporama¹⁹ pour proposer des solutions d'optimisation de tournées grâce à un langage de type système expert. Les secteurs à desservir sont définis à partir d'une liste d'adresses et en fonction des contraintes de distribution : horaires des livraisons, capacité des camions, distances à parcourir, gestion des temps de tournées, etc.

La société Magellan, editrice du module Chronomap couplé au système d'information géographique MapInfo, a produit Tour Solver, un logiciel d'optimisation de tournées. Développé pour MapPoint 2002 de Microsoft, il permet de calculer et visualiser plusieurs itinéraires en même temps sur toute l'Europe.

¹⁷ www.logsyal.com/fr/som_gen.htm

¹⁸ www.inovia.fr

¹⁹ www.maporama.com

Enfin, les sociétés Data & Mobiles²⁰, Visual Lab²¹, AVL, Scoresoft Technologies²², Jacqueson Développement²³, Loxane²⁴, Mercedes-Benz²⁵, Ortec²⁶ et Urios Wintrans²⁷ sont spécialisées dans la logistique du transport de fret et offrent des services informatiques ou électroniques concernant la gestion et le suivi de flottes de véhicules.

Tous ces exemples sont riches en enseignement pour notre problématique liée au transport à la demande. Toutefois, ils doivent être replacé dans un contexte de transport de marchandises qui est différent de celui du transport de voyageurs. Une gestion très tendue des trajets tend à accroître la prise de risque. Certaines marchandises non périssables peuvent être livrées avec retard mais le voyageur accepte rarement les modifications du contrat et exige d'être transporté aux horaires convenus. Les compagnies aériennes, qui fonctionnent avec cette souplesse, le font au prix de dédommagements conséquents envers leurs clients laissés sur le quai.

Pour être complet, il faut faire état du problème juridique que posent ces systèmes qui peuvent devenir des outils de contrôle si puissants qu'ils portent atteinte aux libertés individuelles.

Les logiciels de gestion de transport à la demande

Le secteur du transport à la demande requiert également des logiciels de gestion de flotte et de tournées que proposent des sociétés informatiques. Parmi la dizaine de sociétés (Iter, Publicar, Mobirouter, Paragon, Prorentsoft, PTV, Norlink, Finmatica, Mentz...) proposant des logiciels de gestion de transport à la demande, peu d'entre elles offrent une fonction d'optimisation des tournées comme le font déjà les logiciels dédiés à la gestion du transport de marchandises. Nous présentons deux logiciels (Mobiter, Optitod) sur lesquels nous avons obtenus des renseignements suffisants.

²⁰ www.data-mobiles.com/deftech.html

²¹ www.visual-lab.fr/

²² www.scoresoft.com/

²³ www.jdev.com/

²⁴ www.loxane.com/

²⁵ http://www.fleetboard.info/show_page_f1.php4?mantourplanning,f

²⁶ www.ortec.nl/index2.html

²⁷ www.wintrans.com/

Le logiciel Mobiter développé par la société Iter²⁸ est le moins avancé des trois. Il ne calcule pas d'itinéraire et n'optimise pas les trajets. Il n'opère pas de cartographie automatique et ce n'est pas un outil adapté pour les horaires non fixes. Il permet uniquement d'enregistrer dans une base de données les demandes des usagers pour un service existant et celui-ci se déclenche dès lors qu'une demande est enregistrée.

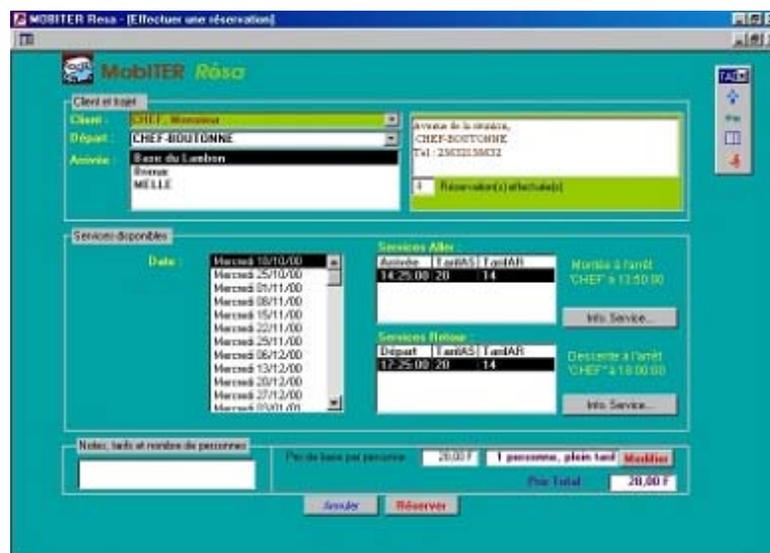


figure 18 : La fenêtre de réservation du logiciel Mobiter

Mobiter est utilisé quotidiennement par la Communauté de Communes de Varilhes (Ariège), la Communauté de Commune du Ségala Carmausin (Tarn) et la SEMVAT, pour les services introduits par Tisseo sur le territoire du Sicoval (Haute Garonne).

Optitod est un logiciel de gestion et d'optimisation d'un système de transport à la demande, développé à l'origine par la société TOD, absorbée depuis par I2E²⁹ ; il est le résultat d'un programme expérimental conduit sur cinq sites en Europe. Il propose un serveur vocal automate et des interfaces avec d'autres modes de communications (Internet, radios...) pour prendre les réservations. Un autre serveur signale les demandes aux taxis. Enfin, le système informatique assure le suivi des factures et élabore des statistiques d'utilisation.

Jusqu'en 2003, Optitod fonctionnait en mode fixe, les arrêts, trajets et horaires étant prédéfinis. Depuis 2003, une nouvelle version a été mise en place afin de permettre également la gestion en mode dynamique :

²⁸ <http://www.iter.fr>

²⁹ <http://www.transport-on-demand.com>

- mode fixe : les arrêts, trajets et horaires sont prédéfinis. Dans ce cas, un voyage est activé dès qu'une personne effectue une réservation sur un itinéraire à une heure donnée (figure 19-a).
- mode dynamique : les itinéraires sont élaborés en fonction de la demande des usagers comme pour les taxis. A cette fin, le territoire est découpé en plusieurs zones de transport (figure 19-b). Le système choisit le véhicule le mieux placé pour réaliser la course en fonction des différentes demandes, des trajets à effectuer pendant la même tranche horaire...

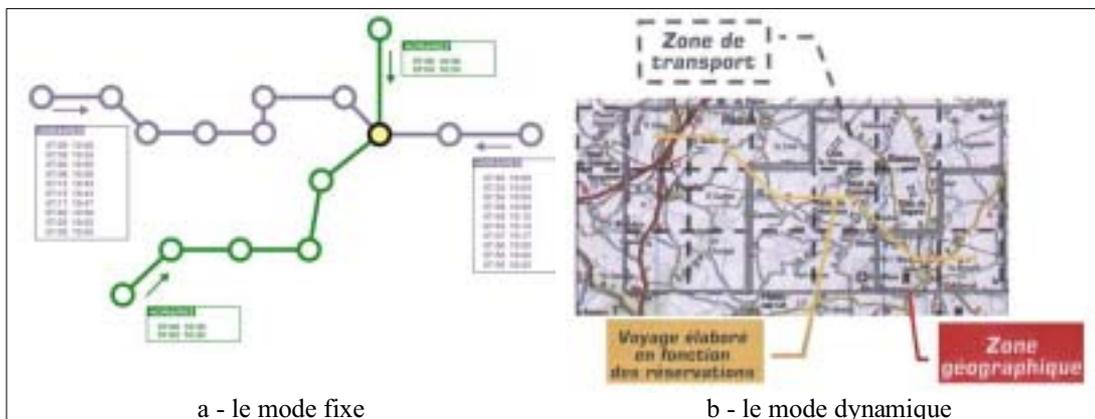


figure 19 : Les deux modes de transport à la demande sous Optitod

En fonction des réservations faites par les clients, le progiciel choisit et appelle le transporteur le plus adapté pour effectuer la prestation. Le serveur informe ensuite l'exploitant des opérations en cours et prépare la facturation des transporteurs.

La pluridisciplinarité des interventions dans le domaine des *ITS* est manifeste et l'omniprésence de l'électronique souligne l'importance accordée à l'information en général, à son recueil, son traitement et sa divulgation en particulier. Le caractère spatial des informations mérite d'être sérieusement pris en considération car celui-ci peut considérablement améliorer les systèmes existants.

Conclusion

L'insertion des technologies de l'électronique et de l'informatique dans le domaine des transports représente un enjeu de taille. Nous avons vu que ces technologies sont largement utilisées dans le domaine du transport de marchandises pour en améliorer l'efficacité. Le transport collectif les utilise également dans le même but. Nous avons remarqué que les solutions informatiques de gestion de flotte de transport à la demande restent plus rudimentaires. Pourtant, le transport à la demande a des besoins en *ITS* de haut niveau pour assurer correctement ses missions. Sans même avoir recours au GPS, il est déjà possible d'améliorer les outils de gestion de flotte de transport à la demande en s'inspirant des logiciels dédiés au fret. Notre contribution à l'étude puis à la mise en oeuvre du transport à la demande Evolis-Gare à Besançon nous permet d'en faire la preuve.



Chapitre 3 : Evolis-Gare, une expérience de transport à la demande en vraie grandeur à Besançon

Evolis-Gare³⁰ est système de transport à la demande qui a pour objectif d'acheminer en gare les usagers du TGV de très bonne heure le matin et de les ramener à leur domicile en soirée. A ces heures de la journée, l'offre de transport collectif de la ville est réduite et la plupart des voyageurs utilisent leur voiture ou le taxi pour rejoindre la gare ou en revenir. Nous verrons que le service de transport à la demande proposé constitue une alternative à l'automobile dans la mesure où les problèmes à résoudre ont été convenablement formalisés et traités d'un point de vue technique et méthodologique.

³⁰ Ce projet présenté par messieurs Arnaud Banos, Thomas Thévenin et Jérôme Bolot a remporté le troisième prix du développement local organisé en 2001 conjointement par la Caisse des dépôts et Consignation et par le Conseil Régional de Franche-Comté.

- Evolis-Gare a reçu le Mercure d'OR 2000, décerné par l'ensemble des services marketing des filiales de la société Kéolis.
- Evolis-Gare a bénéficié d'un passage en télévision nationale à heure de forte audience ainsi que d'une couverture médiatique locale (annexe).

1 Besançon, un cadre favorable pour la mise en oeuvre d'un TAD par une recherche pluridisciplinaire

En 1998, la Compagnie des Transports de Besançon (CTB) organise une première enquête concernant la fréquentation des TGV matinaux au départ de Besançon. Les résultats révèlent l'existence d'un besoin de déplacements non satisfait par l'offre proposée à ce moment de la journée. Dans le même temps, dans le cadre du Programme de Recherche (PREDIT) un groupe de travail interdisciplinaire composé d'un transporteur (le groupe Kéolis) et de géographes a été initié par le laboratoire Théma pour réfléchir et faire des propositions en matière de transports à la demande... De là viendra la réalisation d'Evolis-Gare à Besançon.

1.1 Besançon, un espace test favorable à la généralisation

La ville de Besançon présente un contexte géographique intéressant dans le cadre de notre recherche car ce site s'inscrit pleinement dans le processus d'évolution suivi par la plupart des villes moyennes françaises. Les résultats de la recherche menée sur ce territoire peuvent donc être reproductibles sur d'autres sites comparables à Besançon.

Nous commençons la description de la ville par la présentation de sa topographie (figure 20) car celle-ci s'est avérée souvent décisive dans les choix urbanistiques.

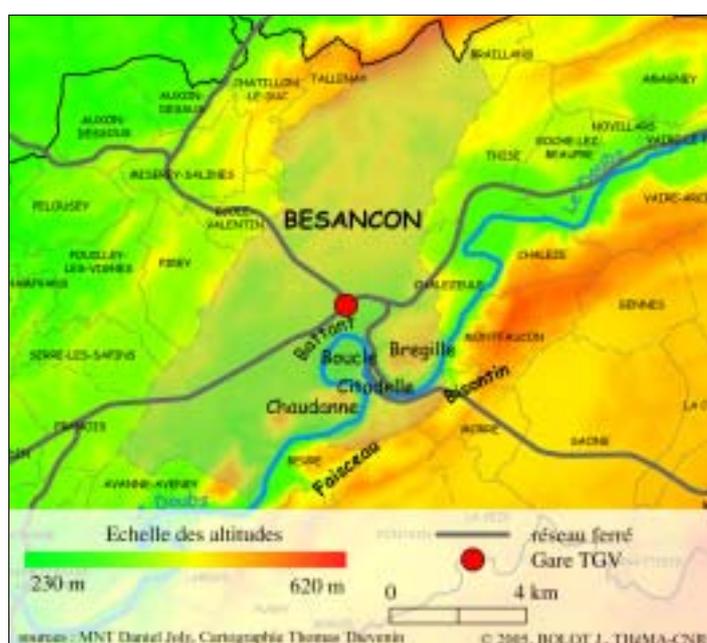


figure 20 : Le réseau ferré ne passe pas par le centre-ville de Besançon

Les premiers quartiers qui aujourd'hui composent le centre ville se sont insérés dans la boucle du Doubs encadrée par le relief voisin. Le site présente des qualités défensives naturelles puisqu'il est protégé par un escarpement et par un cours d'eau. En périphérie de ce quartier ancien, les autres quartiers se sont peu à peu construits comme le montre la figure 21.

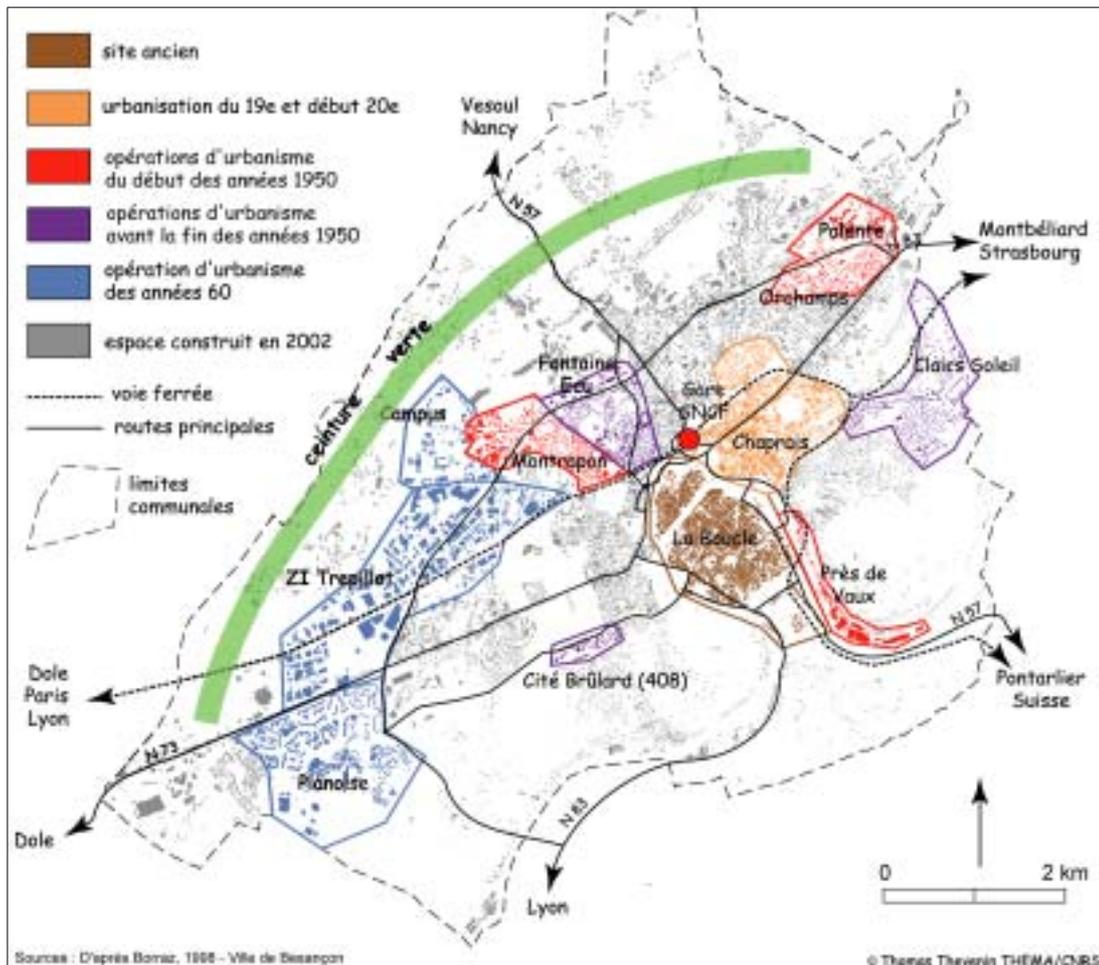


figure 21 : L'évolution du bâti à Besançon

Cette situation géographique favorable pour l'époque médiévale ne l'est plus quelques siècles plus tard. En effet, la topographie du site devient alors contraignante et la ville, fermée sur elle-même, a du mal à s'agrandir. En outre, la topographie conditionne également le tracé des voies de communication. Ainsi, l'infrastructure ferroviaire évite les reliefs et passe à l'écart du centre-ville. Il en est de même pour les pénétrantes routières qui ne rentrent pas au coeur de la cité et convergent vers la gare. C'est le cas des rues de Dole, Vesoul et Belfort. Ainsi, même si elle n'est pas très éloignée du centre ancien, la gare principale n'y est pas directement connectée. Cette position excentrée favorise l'accès en voiture au détriment des bus dont le réseau est

organisé à partir du centre-ville. Ainsi, en 2001, aux heures de franges, c'est à dire tôt le matin et tard le soir, le faible nombre de bus en circulation rend la gare peu accessible à la plupart des bisontins dont la figure 22 présente la répartition sur la base des Iris. Une carte de localisation par cercles et une carte de densité font ressortir les zones favorables au transport collectif. Ainsi, nous voyons que les zones peu denses sont en périphérie de l'agglomération et correspondent soit à des zones d'activités, soit à des espaces boisés ou montagneux. Nous observons deux zones denses. La première se situe autour de la gare dans un rayon de 2,5 km et compte près de 50% des 112000 bisontins. La seconde compte près de 20000 personnes et se situe au sud-ouest de Besançon.

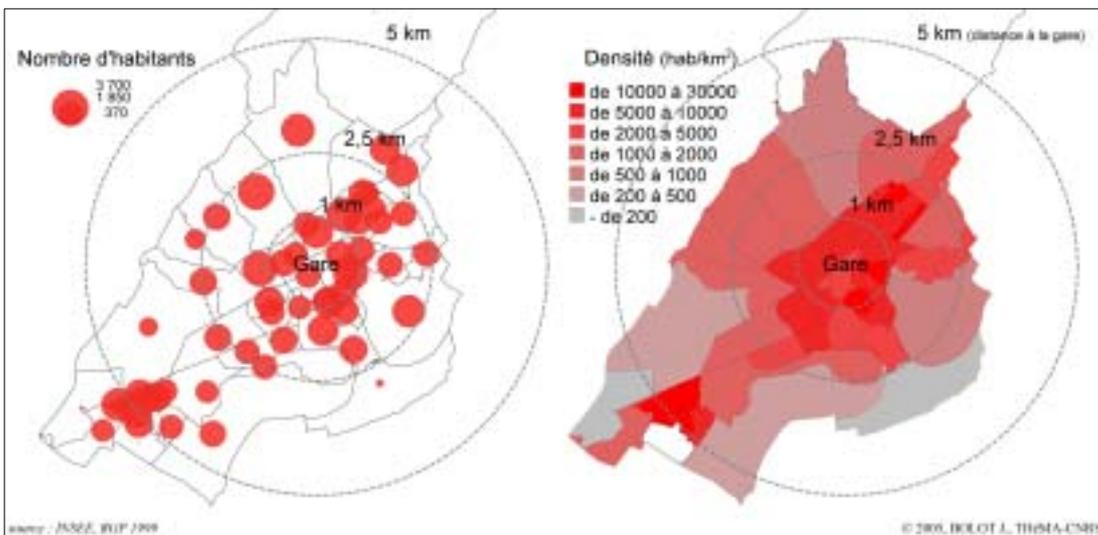


figure 22 : La répartition de la population et la densité à Besançon

1.2 Un groupe de travail pluridisciplinaire

L'objectif initial de l'équipe pluridisciplinaire est d'analyser les concepts de transport à la demande et de réfléchir à un repositionnement sur leur marché, puis d'identifier des territoires propices à la mise en place des TAD innovants. Un second objectif, d'ordre opérationnel, vise à évaluer l'efficacité des services proposés sur quelques sites choisis.

À partir de ces objectifs, trois thèmes de réflexion ont été définis autour du concept de rabattement sur un pôle, en fonction des types de générateurs de déplacements concernés :

- desserte d'équipements de loisir en périphérie de ville (sites pilotes à La Roche sur Yon et Dijon) ;

- desserte de zones industrielles (site pilote Montbéliard) ;
- desserte de gares (site pilote Besançon).

Les deux premiers cas n'ont pas donné lieu à une réelle expérimentation contrairement au site de Besançon qui constitue le projet le plus abouti en raison des multiples partenaires qui ont été associés à la démarche. Outre la coopération des autorités organisatrices des transports, il faut souligner le rôle majeur des services de la ville de Besançon, ainsi que du service marketing de la CTB. Enfin, la création de la centrale de mobilité « Mobiligne » en septembre 2000 a constitué une conjoncture favorable pour le développement des transports à la demande à Besançon. En effet, ce service de renseignement téléphonique dispose de personnels formés pour enregistrer les réservations des usagers au cours de la journée.

Les échanges avec ces équipes opérationnelles et les chercheurs du laboratoire THEMA furent fructueux. Le groupe de travail s'est, par la suite, élargi à une équipe d'informaticiens du Laboratoire d'Informatique de Franche-Comté (LIFC) dans le cadre du programme de l'Institut des Sciences et Techniques de l'Information (ISTI) mis en place par le Conseil Régional de Franche-Comté pour favoriser l'interdisciplinarité autour des Technologies de l'Information et de la Communication. La figure 23 montre le schéma organisationnel de cette structure qui s'organise autour de l'équipe SAD² (Service à la demande, Système d'aide à la décision) du laboratoire Théma [Josselin et al., 2002]. Cette équipe s'est aujourd'hui élargie à d'autres sites et laboratoires (Avignon, Pau et Dijon) sur le nom du groupe « Tadvance ». Nous verrons au fur et à mesure de la lecture les articulations entre les différents partenaires et les rôles de chacun.

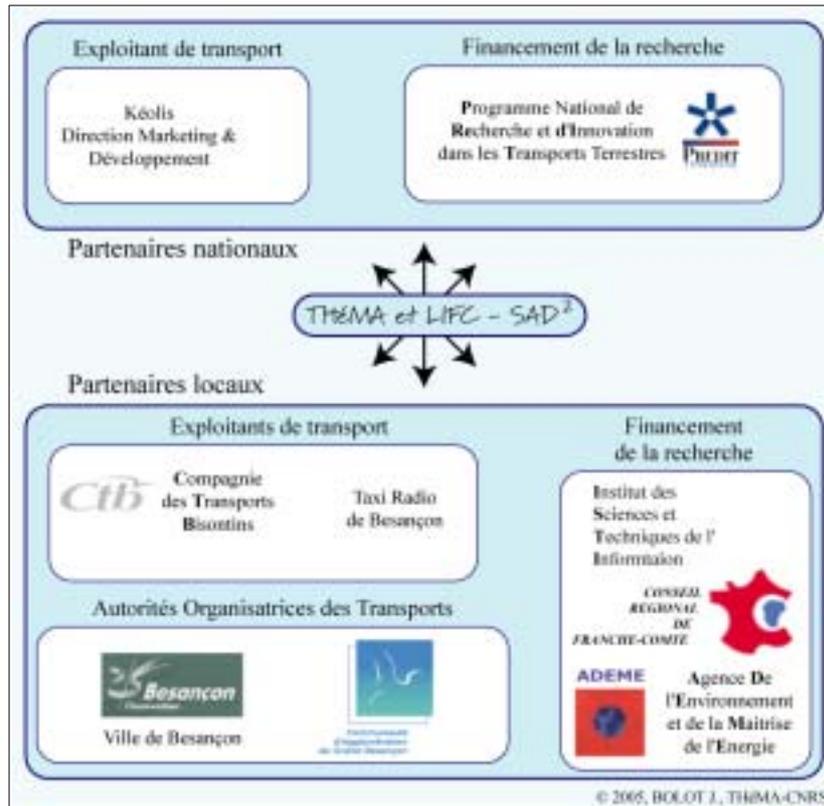


figure 23 : Les partenaires de l'équipe SAD² sur le projet Evolis-Gare

1.3 Élaboration d'un service convergence-divergence unipolaire

Le transport à la demande Evolis-Gare est un système organisé en convergence-divergence sur un unique générateur de flux [Bolot et al., 2002]. C'est à dire que ce service ne dessert qu'un seul pôle, en l'occurrence, la gare SNCF, en assurant un transport collectif des usagers répartis dans la ville (figure 24). Celui-ci est destiné à acheminer les usagers des TGV quittant Besançon avant 7h et à assurer leur retour à leur domicile le soir après 19h. Le matin, les flux convergent vers la gare tandis qu'en soirée ceux-ci divergent dans l'autre sens. Ce service complète l'offre de transport public classique qui est réduite à ces heures particulières de la journée.

La principale contrainte à intégrer, dans le cadre de ce projet, est d'ordre temporel pour deux raisons au moins. Tout d'abord, Evolis constitue le premier maillon d'une chaîne de déplacements intermodale. Le service envisagé doit mettre l'accent sur la fiabilité et la ponctualité afin de vaincre les hésitations des clients les plus dubitatifs quant à son caractère opérationnel. Ensuite, compte-tenu des horaires de fonctionnement pressentis (avant sept heures du matin), les temps de parcours

proposés doivent être davantage comparables à ceux de la voiture qu'à ceux d'un transport en commun classique.

Les résultats d'une enquête³¹ à bord des TGV, réalisée quelques mois avant le lancement du service, permettent de définir les paramètres liés à cette contrainte horaire et de proposer des engagements auprès des clients.

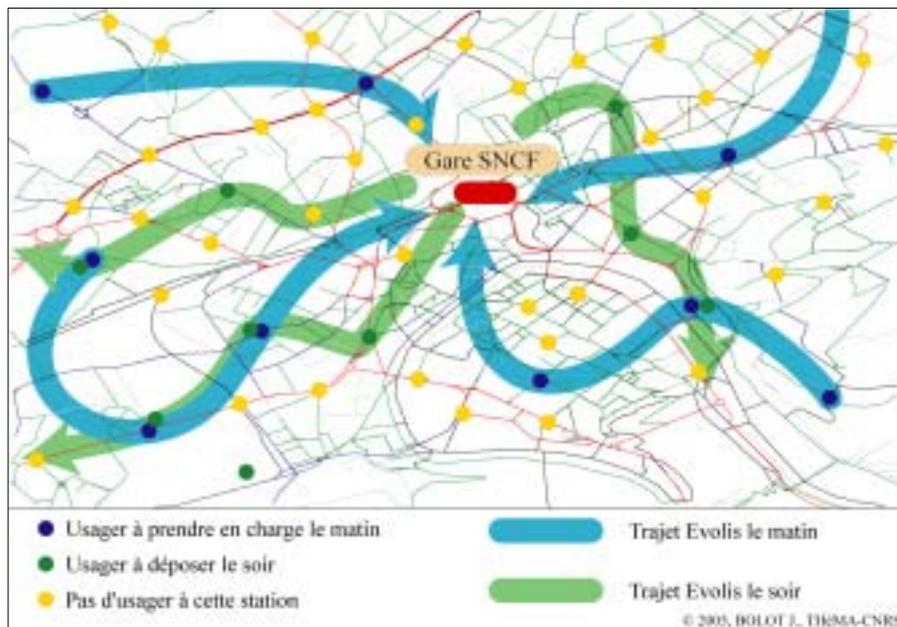


figure 24 : Evolis-Gare, un TAD convergent-divergent pour la desserte de la gare SNCF

Les engagements auprès des clients

L'équipe de travail a été particulièrement vigilante sur les réponses relatives au temps, afin de déterminer des engagements conformes aux attentes des clients :

- **Premier engagement** : la prise en charge du client s'effectue à la station la plus proche du domicile accessible en 5 minutes à pied au maximum. Lorsque la station la plus proche excède ces 5 minutes, des points de rencontres ont été déterminés sur l'ensemble la commune ;
- **Second engagement** : 60 % des bisontins enquêtés se déclarent satisfait pour une attente à la station de 10 minutes au maximum. Notre équipe a opté pour réduire le délai d'attente à 5 minutes ;

³¹ Voir le rapport PREDIT [Banos A. et Josselin D., 1999] pour des informations plus précises concernant la méthodologie et le matériel utilisé lors de cette enquête.

- **Troisième engagement** : 80 % des clients potentiels acceptent un temps de trajet de 15 minutes au maximum, c'est pourquoi le fonctionnement du service a été prévu sur cette base ;
- **Quatrième engagement** : 58 % des bisontins enquêtés veulent arriver 5 minutes avant le départ du TGV. Néanmoins, afin de prévenir d'éventuels perturbations, une arrivée en gare, 10 minutes avant le départ du TGV a été fixée comme contrainte ;
- **Cinquième engagement** : 55 % des clients potentiels sont prêts à payer un prix maximum de 18 francs pour Besançon ; ce tarif a donc été retenu pour l'exploitation du service. Une réduction a toutefois été accordée aux abonnés CTB et SNCF ainsi qu'aux clients voyageant accompagnés. Ce dernier principe est une incitation au regroupement et fonctionne pour toute réservation conjointe de deux personnes (même TGV, même station de prise en charge).

Comme on le voit, ces engagements suivent au plus près les résultats de l'enquête sur tous les points qui servent à paramétrer le système (figure 25).

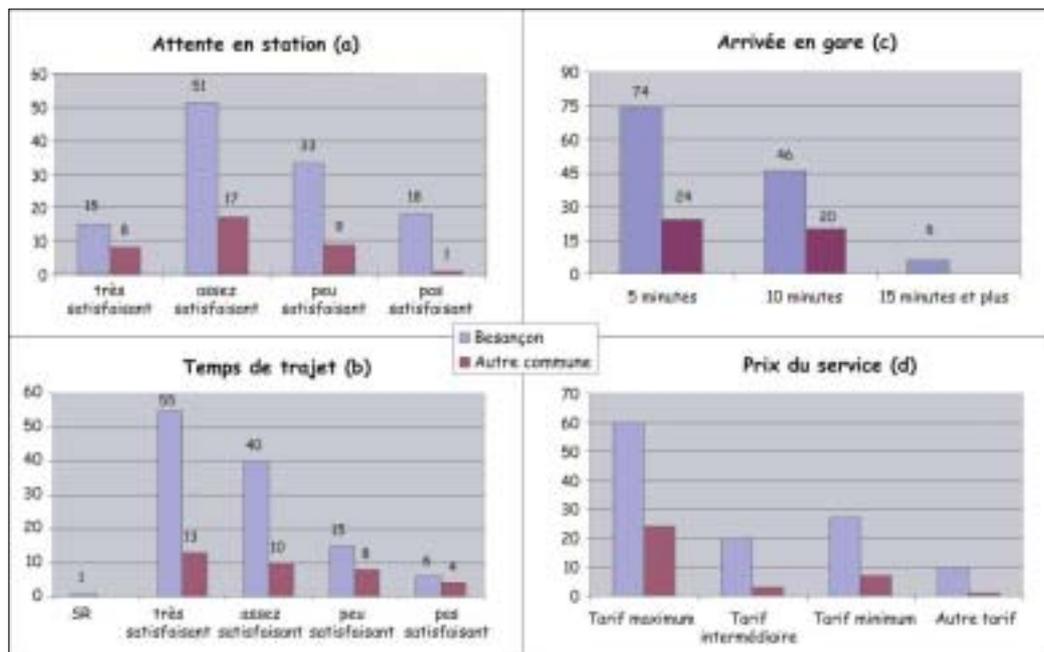


figure 25 : Les attentes des clients potentiels

Source : Banos, 2001

Ces engagements ont abouti à la définition d'un service, original et fonctionnel sur le territoire bisontin. Le service se présente de la manière suivante : en téléphonant à un

numéro unique (0.825.00.22.44) jusqu'à 18h00 la veille au soir du départ, le client peut réserver son service Evolis pour les trois premiers TGV du matin. Pour cela, il communique à l'opérateur l'heure de son TGV ET son adresse qui lui propose un lieu de prise en charge au plus proche de son domicile, ainsi qu'un horaire de passage pré-optimisé. La figure 26 synthétise le déroulement d'un trajet selon les 5 engagements auprès du client. Au retour, la réservation est ouverte jusqu'à 18h00 le jour même, avec une assurance de service jusqu'à 30 minutes après l'horaire théorique, en cas de retard du TGV.

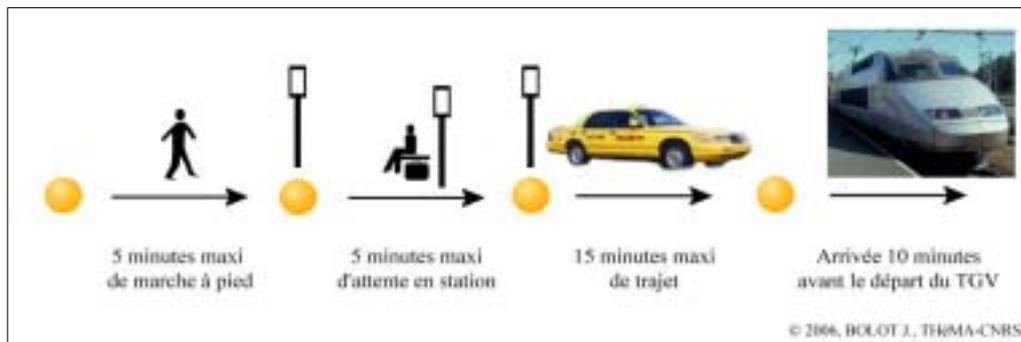


figure 26 : Les engagements client pour un trajet Evolis-Gare

2 Un outil d'aide à l'exploitation d'un service à la demande

Le choix de développer un outil spécifique fut imposé par le caractère expérimental du projet, à durée limitée dans le temps. En outre, il semblait acceptable de partir d'une base instrumentale rudimentaire à condition de pouvoir intervenir rapidement sur chacune des fonctionnalités. Ainsi, le logiciel « **RESAD²** »³² fut développé spécifiquement et repose sur deux outils autonomes. Le premier prend en charge les réservations, c'est l'interface entre les usagers et le transporteur. Le second construit les trajets une fois les réservations effectuées.

2.1 La réservation, la première étape dans la capture d'information

Nous avons entièrement développé le premier module permettant l'intégration des réservations des usagers. Il bénéficie d'une interface graphique appropriée à la relation téléphonique entre un télé-conseiller et l'utilisateur.

La réservation téléphonique s'effectue de -30 à -1 jours du voyage. Elle permet à l'utilisateur de connaître le lieu (la station de bus la plus proche de son domicile) ainsi que l'horaire de passage théorique du véhicule effectuant le service.

Cette réservation s'effectue en quatre étapes.

- La première concerne l'identité de l'utilisateur ;
- La seconde oriente l'utilisateur vers la station de bus la plus proche ;
- La troisième enregistre les informations relatives au train ;
- Enfin, la dernière récapitule les points importants.

Toutes ces informations concernant l'utilisateur et les conditions de son voyage sont affichées en permanence sur l'écran de Resad² (figure 27). Cet environnement de réservation est maintenant disponible sur le site Internet du transporteur³³.

³² ©RESAD2, Dépôt de la marque et du code source du logiciel gérant opérationnellement, depuis novembre 2001, le Transport à la Demande Evolis-Gare à Besançon., (co-dépôt CNRS, Université de Franche-Comté, Groupe Kéolis, Communauté d'Agglomération du Grand Besançon) ; licence d'exploitation cédée à la société Prorentdof

³³ http://www.ginkobus.com/g_evolis_g.asp (cf annexes)

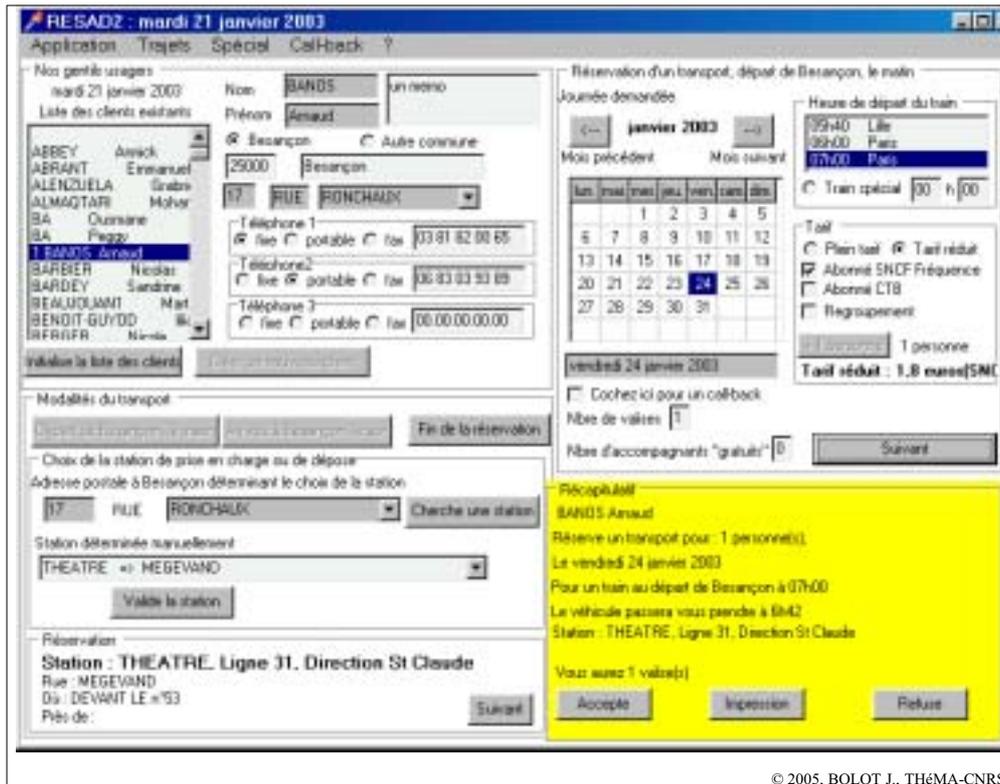


figure 27 : Resad², fenêtre de saisie vue par l'opérateur de la centrale de réservation

Identification et localisation des usagers

La première fenêtre concerne les usagers du service. Chaque nouveau client est enregistré dans une base de données où, en plus des informations concernant son domicile, une case spécifique permet de mémoriser celles qui sont plus particulières.

Le choix de prendre en charge les personnes à une station de bus et non pas directement à leur domicile provient d'une décision collective qui satisfait l'ensemble des partenaires :

- le transporteur est soucieux de proposer un service complémentaire au réseau de bus à la condition que les points de prise en charge et de dépose des usagers restent communs avec ceux du transport public ;
- l'affectation à une station de bus plutôt qu'à l'adresse postale présente aussi l'avantage de considérablement diminuer les temps de calculs nécessaires lors des constructions de tournées car le nombre de points à considérer est faible (500 stations au lieu de 14000 adresses postales) ;
- le service n'empiète pas sur le segment du porte-à-porte plutôt réservé aux taxis.

Cependant, la répartition géographique inadaptée des stations de bus sur l'espace résidentiel a nécessité l'ajout de stations supplémentaires en quelques points choisis afin de couvrir l'ensemble de l'espace à desservir. Ces stations sont représentées par des bornes à incendie, des carrefours ou d'autres points significatifs clairement identifiés. Ainsi, chaque bisontin se trouve théoriquement à moins de 5 minutes à pied d'une station.

L'affectation automatique de l'utilisateur à une station de bus en fonction de son domicile ou d'une autre adresse comme le lieu de travail s'obtient par un module de géocodage automatique.

Les adresses postales constituent une information géographique à part entière. A Besançon, 14000 points géoréférencés renseignent chacune d'elles (n° d'adresse et rue). Le module de géocodage associé à la base de données (figure 28) recherche d'abord le point correspondant au mieux à l'adresse donnée.

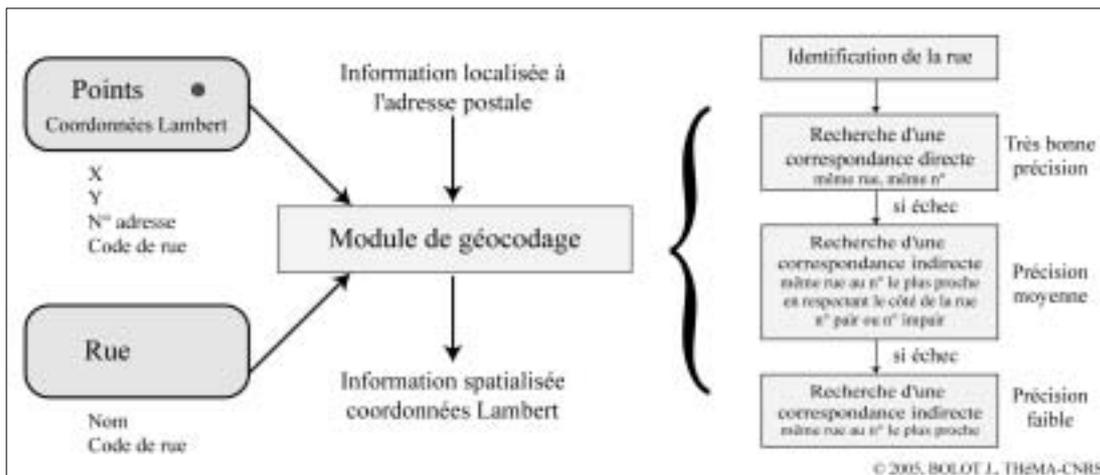


figure 28 : Affectation automatique d'une adresse postale à la station la plus proche

En cas d'absence de correspondance directe, l'adresse la plus proche est affectée en respectant le côté pair ou impair de la rue. Enfin, en cas d'échec une dernière opération consiste à rechercher le n° le plus proche qu'il soit pair ou impair. La précision dans la spatialisation décroît au fur et à mesure des échecs.

La base de données géographiques intégrée dans le SIG MapInfo permet d'établir au préalable les premiers calculs d'accessibilité nécessaires à la recherche de la station de bus la plus proche d'une adresse postale. Le résultat de cette étape qui nécessite des temps de calculs relativement longs est enregistré dans le système. Il est ainsi possible de délivrer une réponse très précise à un usager sans aucun temps d'attente lors de sa réservation, même si l'adresse est incomplète ou peu fiable. Il est

cependant toujours possible d'affecter manuellement une autre station ayant la préférence de l'utilisateur (abritée, plus accessible...). Un encart précise la localisation exacte de la station choisie afin d'aider l'utilisateur à localiser la station lorsque celui-ci n'est pas un habitué des transports en commun.

Déterminer les composantes du voyage

La fenêtre concernant le choix du voyage permet de déterminer le jour ainsi que l'heure de départ du train. Tous les horaires des TGV sont enregistrés dans des fichiers et le système propose les horaires valides en fonction du jour de voyage.

Enfin, des informations relatives à la tarification permettent d'établir le prix que payera l'utilisateur ainsi que les conditions de son voyage (nombre de valises). Ce dernier paramètre doit être pris en compte avec attention puisqu'il intervient à la fois dans le temps de chargement et de déchargement ainsi que dans la capacité de remplissage du véhicule.

Le processus de réservation se termine par une fenêtre récapitulant l'ensemble des informations fournies par le client et délivrées par le télé-conseiller. De plus, l'heure de passage du véhicule qui est communiqué à l'utilisateur, est établi en fonction de la station de départ, de l'heure du train et d'un tableau des distances-temps entre les stations et la gare. Ces distances-temps sont calculées grâce au système d'information géographique MapInfo et sont pondérées pour chaque station en fonction de leur distance à la gare. Ceci a pour effet de donner un temps de passage sécurisant aux stations les plus éloignées de la gare et un temps de passage plus tendu aux stations les plus proches.

Le schéma de la figure 29 synthétise l'ensemble des relations entre les informations, qu'elles soient acquises par la connaissance ou générées par le système informatique.

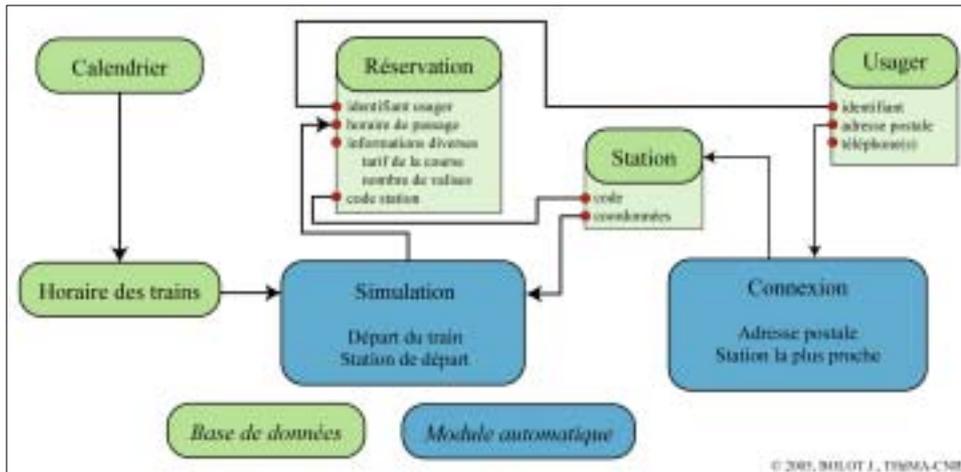


figure 29 : Informations propres à la réservation

2.2 La construction de trajets

Un second outil permet de sélectionner les réservations concernées, de choisir la proposition de service la plus adéquate et de transmettre au chauffeur les feuilles de route récapitulatives de leur service.

Le système propose, le téléconseiller dispose...

Le téléconseiller chargé de la gestion du transport à la demande ouvre le fichier informatique des réservations et, à la lecture de celui-ci, le système délivre automatiquement un maximum de cinq propositions classées en fonction des paramètres définis par le transporteur. Le calcul des cinq propositions s'effectue par un noyau d'optimisation développé par les informaticiens du Laboratoire d'Informatique de Franche-Comté (LIFC). Ce partenariat s'est déroulé dans un programme de recherche pluridisciplinaire financé par la Région de Franche-Comté (ISTI). La construction des solutions par ce noyau se réalise en fonction de plusieurs caractéristiques. Tout d'abord, le trajet doit être le moins cher possible. Comme le coût du service est calculé en fonction du nombre de véhicules utilisés et de la distance parcourue par chacun d'eux, le système cherche avant tout à réduire le nombre de véhicules en action en maximisant leur remplissage. La capacité des véhicules est limitée par une variable correspondant au nombre de places disponibles dans les véhicules.

Le classement des propositions est établi en fonction du coût du service qui est déterminé par les honoraires établis entre la CTB et les transporteurs prestataires que sont les taxis de Besançon. Le télé-conseiller peut ensuite visualiser chacune de ces

propositions grâce à une fenêtre graphique (figure 30). Le coût du service ainsi que l'itinéraire proposé lui permettent de prendre la décision qu'il juge la plus favorable.

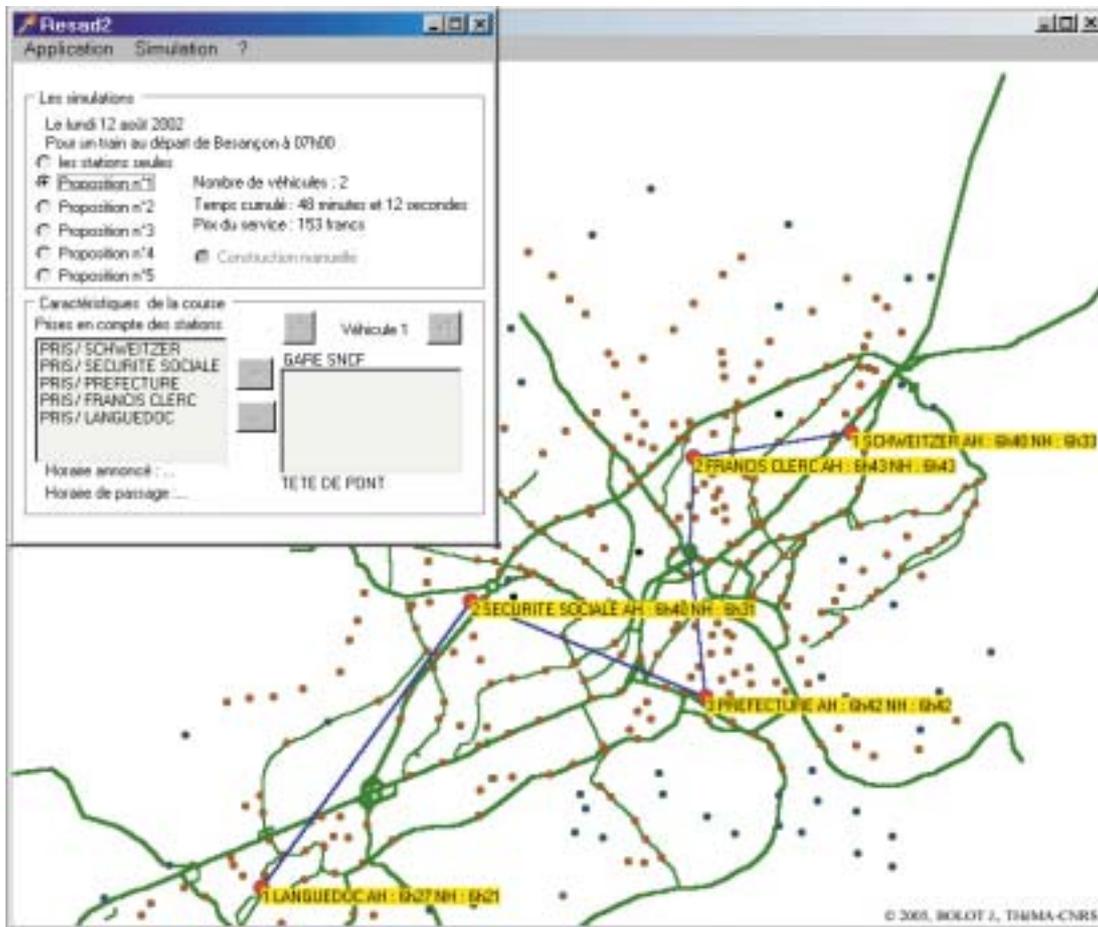


figure 30 : Simulation de lignes virtuelles à J-1 et proposition de services par le logiciel RESAD²

La construction de trajet s'établit après la réservation. Cela revient à dire que l'utilisateur connaît une heure de passage théorique du véhicule de transport à la demande avant même que le système n'établisse les trajets. Dans l'objectif d'optimiser le service, le système est capable de modifier les horaires de passage, en accord avec le client et selon un paramètre de temps de détour acceptable sur l'ensemble de la course. Cette manipulation permet, souvent, d'économiser un ou plusieurs véhicules. Toutefois, il arrive que cette modification ne puisse s'appliquer quand l'utilisateur concerné par celle-ci ne peut être joint par téléphone.

L'exemple présenté à la figure précédente montre une situation où cinq stations sont concernées par une desserte vers la gare. Le service est assuré par deux véhicules.

Les écarts entre les horaires de passage annoncés aux clients au moment de la réservation et les horaires calculés lors de la simulation peuvent être importants. Par

exemple, l'horaire de passage à la station Languedoc est annoncé au client à 6h27. Lors de la construction du trajet, le nouvel horaire est établi à 6h21. Un écart entre horaire prévu et horaire réel est possible mais doit ne pas dépasser 10 minutes.

Véhicule n°1 :

| Stations | Heure de passage annoncée au client | Heure de passage calculée |
|------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Languedoc | 6h27 | 6h21 |
| Sécurité sociale | 6h40 | 6h31 |
| Préfecture | 6h42 | 6h42 |

Véhicule n°2 :

| Stations | Heure de passage annoncée au client | Heure de passage calculée |
|---------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Schweitzer | 6h40 | 6h33 |
| Francis Clerc | 6h43 | 6h43 |

Dans ce cas, si l'un des clients n'est pas d'accord pour modifier son horaire de départ où si le téléconseiller estime que le service, trop tendu, risque d'être difficile à assurer par le chauffeur, celui-ci peut alors choisir une solution moins optimisée et plus sûre mais plus coûteuse pour le gestionnaire du transport à la demande (figure 31).

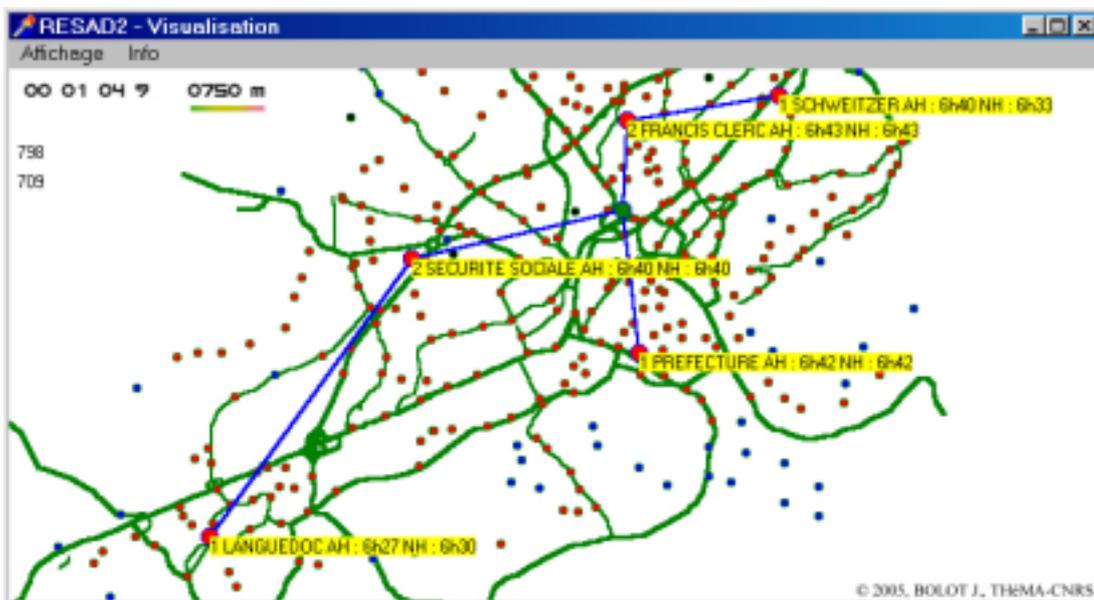


figure 31 : Un service moins tendu mais plus coûteux

Dans ce cas, le système propose une solution qui nécessite d'affréter un troisième véhicule.

Véhicule n°1 :

| Stations | Heure de passage annoncée au client | Heure de passage calculée |
|------------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Languedoc | 6h27 | 6h30 |
| Sécurité sociale | 6h40 | 6h40 |

Véhicule n°2 :

| Stations | Heure de passage annoncée au client | Heure de passage calculée |
|---------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Schweitzer | 6h40 | 6h33 |
| Francis Clerc | 6h43 | 6h43 |

Véhicule n°3 :

| Stations | Heure de passage annoncée au client | Heure de passage calculée |
|------------|-------------------------------------|---------------------------|
| Préfecture | 6h42 | 6h42 |

La feuille de route

Au final, le téléconseiller édite une feuille de route pour chacun des deux véhicules afin d'indiquer aux chauffeurs la liste des clients ainsi que les lieux et horaires de passage (figure 32).

Pour un train au départ de Besançon à 07h00

Le lundi 12 novembre 2001

Numéro de Service EVOLIS :

Nombre de clients transportés : 4

Taxi n° :

| Heure d'arrivée à la station | Heure de départ | Lieu de prise en charge | Nom des clients | Tarifs | Bagages | Observations Taxi |
|------------------------------|-----------------|---|---|--------|-------------|-------------------|
| | 6h28 | Station ORATOIRE Rue DE DOLE AU n°127 FACE LIDL APRES CH.PORTIER | 1 personne Non Prénom | 13 F | 0 valise(s) | |
| | 6h30 | Station BASCULE Rue DE DOLE AVT CARREPOUR RIBOT/ DOLE | 1 personne Non Prénom | 13 F | 0 valise(s) | |
| | 6h39 | Station PREFECTURE Rue DE LA PREFECTURE A HAUTEUR DU n°28 | 1 personne Non Prénom | 13 F | 0 valise(s) | |
| | 6h44 | Station GRANGES Rue DES GRANGES HAUTEUR DU n°59 VERS CINEMA PLAZZA | 1 personne Non Prénom | 13 F | 0 valise(s) | |
| | 6h50 | Dépose des clients à la Gare de Besançon-Viotte | Total : 4 | | Total : 0 | |
| | 7h00 | Départ du TGV | Recette de la course (Tickets vendus à bord) : Tickets plein tarif à 18F 009= Tickets tarif réduit à 12F 012= Total Recette : | | | |

Merci de retourner cette feuille de route renseignée au plus tard le

figure 32 : Une feuille de route Evolis à destination d'un taxi pour un TGV au départ de Besançon

La réalisation des services est déléguée à l'association des artisans taxi de la ville de Besançon. Les chauffeurs retournent cette feuille de route à l'exploitant du service. Il est d'ailleurs regrettable que les informations concernant l'heure réelle d'arrivée à la

station ne soient jamais remplies. Ce retour sur la qualité de fonctionnement effective du service permettrait assurément de lui apporter des perfectionnements intéressants.

Pour conclure la présentation du service Evolis-Gare, nous présentons un schéma (figure 33) décrivant les différentes opérations nécessaires au fonctionnement du service ainsi que le rôle du logiciel Resad2 dans ce processus.

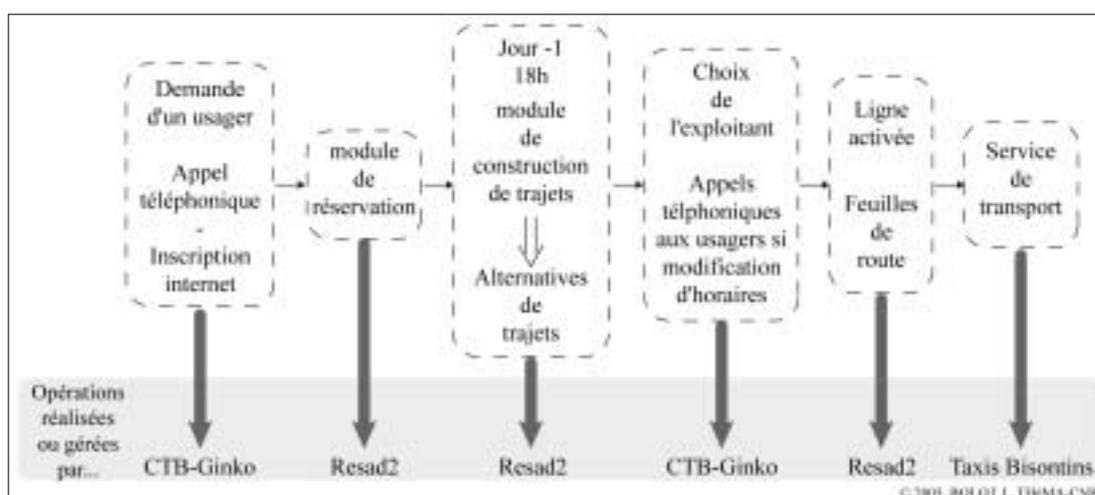


figure 33 : La chaîne de fonctionnement d'Evolis-Gare

Les télé-conseillers de l'exploitant gèrent les appels téléphoniques des usagers et intègrent les demandes à l'aide du module de réservation de Resad2. La veille du voyage, le module de construction de trajet propose cinq solutions de transport optimisées. En fonction de ces solutions, les télé-conseillers peuvent contacter les usagers concernés par une modification de leurs horaires de prise en charge. Le télé-conseiller retient la proposition de transport la plus adéquate en fonction des réponses qu'il a reçu des appels téléphoniques aux usagers pour avancer ou reculer de quelques minutes leurs horaires de prise en charge, si nécessaire. Lorsque le trajet est validé, les feuilles de routes sont éditées et sont faxées à l'association des taxis bisontins qui distribue aux véhicules les trajets à réaliser.

3 Pour aller plus loin

Le service Evolis-gare fonctionne depuis septembre 2000 sur la ville de Besançon. Il s'agit maintenant de dresser un bilan sur la fréquentation du service et de son fonctionnement au quotidien et sur l'articulation de la recherche et de l'action. Enfin, c'est l'occasion de s'interroger sur les évolutions possibles de ce transport à la demande.

3.1 Un premier bilan

Quelques chiffres de fréquentation

Après une année de fonctionnement, 10000 km ont été parcourus pour 1100 courses réalisées. Les 1850 voyages effectués ont permis de constituer un fichier de 600 clients. A noter que 66 % des voyages se font aux tarifs réduits : 30% pour abonnement SNCF, 18% pour abonnement CTB et 18% pour regroupement. Aujourd'hui, le regroupement ne donne plus droit au tarif réduit.

Ce chiffre de 18%, qui a diminué depuis, est intéressant, car il semble démontrer l'utilité de faire fonctionner le regroupement en amont de la mise en place des dessertes, par les clients eux-mêmes. Rappelons que cet avantage tarifaire peut être consenti à des personnes qui n'ont aucun lien familial, ce qui le différencie de la plupart des systèmes classiques de réduction, liés à la structure de la famille ou à l'âge des personnes accompagnées. La seule contrainte est, dans le cas d'Evolis, qu'une réservation conjointe soit associée à un horaire et un lieu de ramassage identique, afin d'inciter au regroupement et faciliter l'optimisation des dessertes.

Sur la période 2002 à 2005, la fréquentation du service est stable puisque environ 3000 voyages sont assurés par un peu plus de 1700 courses chaque année (tableau 6).

| | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|------------------------------|-------|-------|-------|-------|
| Nombre de voyages | 3 044 | 2 757 | 3 087 | 3 141 |
| Nombre de courses | 1 738 | 1 610 | 1 769 | 1788 |
| Nombre de voyages par course | 1,75 | 1,71 | 1,75 | 1,76 |

tableau 6 : La fréquentation du service Evolis-Gare

Sources : CTB-Ginko

Au total, le nombre de réservations Evolis est supérieur au nombre de courses réalisées par les taxis. La figure 34 présente, en détail, le nombre de réservations ainsi que le nombre de courses réalisées en 2001 et 2002. Le taux de croissance du

nombre de réservation entre 2000 et 2001 est de 50% tandis que le taux de croissance du nombre de courses réalisées pour assurer la demande de transport n'est que de 40%. Cette différence s'explique par le fait que la possibilité de mettre plusieurs personnes dans un même véhicule existe et qu'elle est mise à profit dès lors que le nombre d'usagers à prendre en charge augmente. Ce phénomène s'observe durant la période de mars à mai 2002. Le nombre de réservations est en très nette augmentation tandis que le nombre de courses n'augmente pas dans les mêmes proportions.

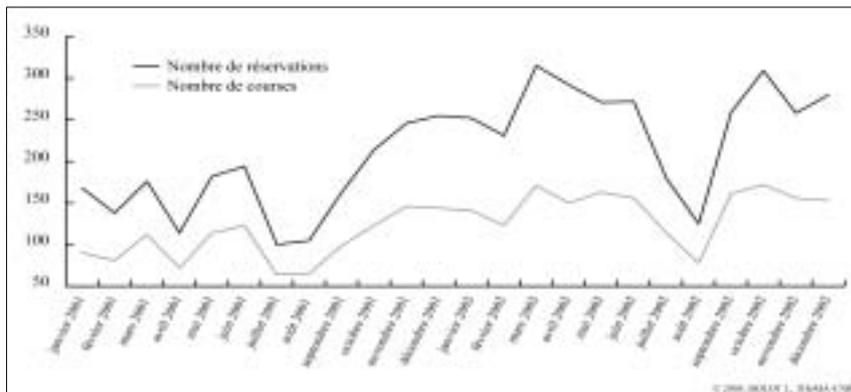


figure 34 : Fréquentation et courses associées du service Evolis-Gare en 2001 et 2002
Sources : CTB-Ginko

Le taux de remplissage (figure 35) des véhicules peut paraître faible. Il se situe pourtant dans une bonne fourchette par rapport à d'autres services de TAD. Cette faiblesse est relative et tient de la dilution du faible nombre d'usagers dans un espace à desservir important. Cela ne facilite guère le regroupement. En revanche, avec un nombre plus importants d'usagers, le taux de remplissage des véhicules augmente tandis que le nombre de véhicules mobilisés augmente peu car, dans ces cas là, quatre personnes peuvent prendre place à bord.

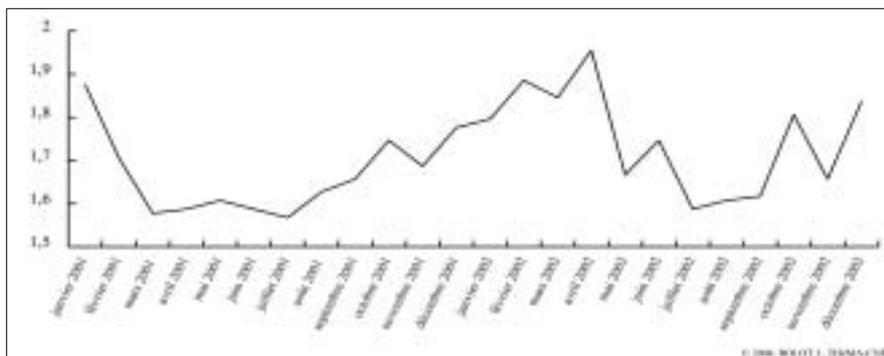


figure 35 : Le taux de remplissage des véhicules
Sources : CTB-Ginko

Sur la période 2001-2005, les résultats sont encourageants, tant pour l'utilisateur que pour le bilan comptable. En effet, compte tenu du prix fixé, nous obtenons déjà, avec un prix calculé sur la base du « compteur kilométrique taxi » (y compris retour à la gare), un ratio Recettes / Dépenses (R/D) d'environ 35 % (tableau 7).

| | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|-----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Recettes | 4295 euros | 6361 euros | 5994 euros | 6974 euros | 7386 euros |
| Dépenses | 12467 euros | 17043 euros | 17162 euros | 20346 euros | 22539 euros |
| Rendement (R/D) | 24 % | 37 % | 35 % | 34 % | 33 % |

tableau 7 : Bilan économique du service Evolis-Gare

Sources : CTB-Ginko

Toutefois, trois raisons amènent à relativiser ces chiffres :

- le R/D technique est calculé en divisant le prix payé par le client par le prix payé au taxi, et ce hors dépenses supplémentaires de la CTB (surcroît de travail, fonctionnement, publicités, frais divers, etc.). C'est toutefois toujours cet indicateur qui est considéré dans les études d'efficacité économiques des TAD ;
- il dépend de la structure commerciale : une structure moins importante, moins solide et/ou moins avertie que la CTB n'aurait peut-être pas la même capacité à intégrer cette innovation dans son fonctionnement,
- le rapport entre la demande exprimée pour Evolis et la capacité du service (nombre et types de véhicules, construction des lignes virtuelles, notamment) est correct et reste supportable par la CTB (en termes de charge de travail et d'organisation), comme pour la collectivité (en terme de coûts).

Une enquête, réalisée en mai 2001, auprès des clients a montré des résultats très encourageants avec un taux de satisfaction de 95% (98% en 2003). En outre, ce service de transport à la demande constitue une réelle alternative à l'utilisation de la voiture, puisque 30 % des clients prenaient auparavant leur véhicule personnel. Ainsi, Evolis contribue à soulager le parking et à réduire la pollution.

Enfin, les taxis coopèrent fortement au service puisque 30 véhicules assurent actuellement en sous-traitance l'ensemble des courses. Ces derniers ont d'ailleurs constaté la ponctualité des voyageurs aux arrêts désignés. Cet état de fait est important pour l'optimisation des lignes et l'amélioration du regroupement.

Discussion autour de la recherche appliquée

Le service imaginé au printemps 2000, six mois avant sa création, devait être inauguré et testé lors de la « semaine des transports publics » durant le mois de septembre 2000. Cette expérimentation d'une semaine devait être suivie de concertations entre les partenaires impliqués dans le transport urbain à Besançon. Notre objectif de départ était donc de préparer un prototype en vue de cette opération ponctuelle. Or, avant sa mise en place, Evolis bénéficia d'un intérêt particulier de la part des édiles de Besançon et c'est ainsi que d'une semaine, le plan d'expérimentation est passé à trois, puis six mois, pour aboutir à un service commercial éprouvé. Cet allongement de la durée d'exploitation confirme l'intérêt d'un tel service et de ses performances. Son caractère opérationnel nous a amené à lui intégrer d'autres fonctionnalités :

- le paramétrage par le transporteur des horaires des trains en fonction des jours de la semaine, des vacances et des jours fériés ;
- le paramétrage des tarifs ;
- la possibilité d'intégrer un accompagnant voyageant gratuitement (enfant en bas âge) ;
- l'élaboration d'une passerelle permettant l'exportation des données vers une base de données Access pour réaliser de façon régulière le suivi statistique du service.

Notre participation à cette expérience procède d'une recherche tournée vers l'action dont la portée s'élargit à la vie de la cité. Ce type d'opération permet au chercheur de se conforter aux besoins qui s'expriment « sur le terrain » et de dégager des solutions qui viennent valider l'ensemble d'une démarche depuis les principes qui la fondent jusqu'à sa mise en oeuvre pratique par le relai d'autres acteurs (collectivités, services, entreprises, usagers).

3.2 Les prolongements d'Evolis-Gare

De nombreuses pistes relatives à l'extension du service Evolis-Gare sont envisageables mais seules quatre intègrent des spécificités géographiques. En effet, il est possible d'étendre la zone desservie par le transport à la demande, d'étendre à la journée le fonctionnement du service, d'attribuer plusieurs points de desserte. Enfin,

une extension peut concerner le mode de réservation qui, au lieu de se réaliser la veille du service, peut s'effectuer en temps réel.

L'extension territoriale d'Evolis-Gare

La plus évidente des suites sera d'étendre le service à l'ensemble de la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon (CAGB). Les administrés de ce nouveau territoire, créé peu après l'inauguration d'Evolis-Gare, manifestent leur attente de ce service dans leur commune. Dès la première semaine de fonctionnement d'Evolis-Gare, des demandes de renseignements émanant d'habitants des communes périphériques arrivaient déjà à la centrale d'information. Enfin, certains habitants des communes limitrophes de Besançon utilisent le service lorsqu'une station de bus bisontine se trouve à proximité de leur domicile où vont même jusqu'à se rendre en voiture sur un parking voisin d'une station de prise en charge.

Une enquête réalisée dans les TGV durant le mois de mai 2000 démontre que le potentiel d'utilisateurs sur le territoire de la CAGB est relativement important même si plus de trois quarts des enquêtés habitent Besançon. De plus, majorité des autres personnes ayant répondu à l'enquête réside dans une commune proche de Besançon. La figure 36 illustre ce résultat en montrant que le potentiel de clientèle devient réduit au delà de 9 km³⁴.

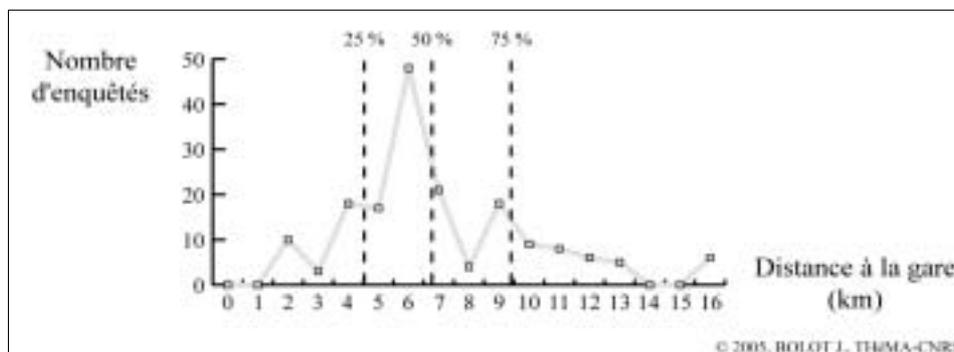


figure 36 : Le potentiel de clients localisés sur la CAGB est plutôt proche de Besançon

Les responsables politiques locaux, en prenant acte de ce besoin exprimé, ont engagé en 2003 une étude d'extension du service Evolis-gare dans l'objectif de desservir l'agglomération bisontine. Cette étude menée par l'UMR Espace d'Avignon, la CTB, Théma et le LIFC, a établi la faisabilité technique et économique de l'extension

³⁴ La distance prise en compte ici est la distance à vol d'oiseau entre le centre de la commune de résidence et la gare SNCF de Besançon.

(quel territoire, quel coût, quel service) et fournies des préconisations quant à l'évolution et la pérennité du service [Houzet & Josselin, 2004].

Un service multipolaire

La desserte d'un multiplexe, d'un hôpital ou d'un autre générateur de déplacements important pose un problème similaire à celui de la desserte d'une gare SNCF. Il est possible d'imaginer des services parallèles, fonctionnant selon le même mode qu'Evolis-Gare et susceptible de s'appeler Evolis-Cinéma, Evolis-Hôpital...etc.

Ces services à finalités distinctes pourraient se regrouper par la création d'un service multipolaire qui, sous une même enseigne Evolis-TAD, desservirait chacun des générateurs de déplacement ciblés. Les usagers embarqués dans un même véhicule pourraient avoir des destinations différentes. Un tel service est évidemment plus complexe à mettre en place qu'un service de type convergent-divergent mais c'est envisageable pour élargir l'assise fonctionnelle des systèmes de transport à la demande du type d'Evolis.

Un service fonctionnant toute la journée

L'extension du service dans le temps, demanderait peu de modifications du système tel qu'il existe : il suffirait d'intégrer dans la base de données des distances-temps correspondants aux différents moments de la journée et tenant compte des autres horaires de train. Dans ce cas, les horaires de passage des véhicules de transport à la demande sont calculés en fonction de l'heure de départ des trains et des temps de parcours entre les stations déterminés par les vitesses de circulations prédéfinies dans le réseau routier informatisé.

Un fonctionnement en temps-réel, c'est anticiper pour mieux réagir

Chacune des améliorations évoquées se traduit pas une complexification mais comme le système de réservation reste très ouvert, il est toujours possible de construire des modèle d'itinéraires adaptés. Classiquement, il revient au transporteur de bloquer les réservations suffisamment tôt pour lui permettre d'élaborer les trajets et l'affrètement des véhicules nécessaires, mais cette procédure n'est plus valide en temps réel puisque les délais d'organisation sont par définition très raccourcis.

Le risque d'affréter un nombre trop important ou trop faible de véhicules devient délicat à contrôler et c'est une limite qu'il faut arriver à dépasser. Ces aspects seront abordés dans la seconde partie de ce document.

Conclusion

Le projet Evolis-Gare constitue un système de transport urbain qui respecte les principes du développement durable. Ce service vient en complément de l'offre classique de transport urbain qui est peu présente aux heures de franges. En outre, ce service s'inscrit dans la notion d'intermodalité et offre à l'utilisateur un moyen efficace d'effectuer son premier déplacement entre son domicile et la gare dans des conditions très proches de celles que lui offre son automobile.

La mise en oeuvre de ce service résulte d'un partenariat fort entre chercheurs et exploitants de transport. La recherche est allée très loin dans son implication puisqu'elle a largement dépassé le stade de la réflexion conceptuelle. La mise en oeuvre, le suivi et l'amélioration du logiciel développé spécifiquement et utilisé au quotidien par le gestionnaire du transport à la demande constitue une implication inhabituelle dans un projet de recherche.

Cette implication est lourde mais en contrepartie, elle permet au chercheur d'observer et d'analyser l'ensemble des mécanismes institutionnels et opérationnels du système de transport à la demande. Cette connaissance est précieuse pour reproduire l'expérience sur d'autres sites ou pour améliorer le service Evolis-Gare lui-même.

Conclusion de la première partie

L'étalement des villes n'est pas un processus uniforme ; il détermine une grande variété de morphologies urbaines, diffuses ou concentrées, en continuité ou en rupture. En même temps, les modes de vie se transforment : les comportements s'individualisent et les rythmes urbains se désynchronisent. Ces mutations font naître de nouveaux besoins de déplacement que seule la voiture peut assurer avec efficacité dans la plupart des cas. Or, nous avons vu que le développement du tout voiture génère de plus en plus de problèmes et finit par porter atteinte à la qualité de vie. L'idée de développement durable procède en bonne part de ce constat.

Ainsi alertées, les autorités publiques doivent revoir leur politique d'aménagement pour contrôler le phénomène de périurbanisation et ses excès. Parmi les dispositifs envisagés, elles peuvent agir sur l'offre de transport public en développant l'intermodalité et plus particulièrement le transport à la demande sur lequel nous avons fait porter notre effort de recherche.

Pour répondre aux attentes, le transport à la demande doit savoir tirer parti de la technologie comme nous l'avons établi dans cette première partie. En effet, le recours aux systèmes électroniques et informatiques permet d'affranchir l'offre de transport public de certaines de ses rigidités structurelles et d'intéresser à nouveau une part significative des usagers potentiels.

Evolis-Gare s'inscrit pleinement dans cette démarche. Il constitue le premier maillon d'une chaîne intermodale de transport. Sa mise en oeuvre fut possible grâce au travail d'une équipe pluridisciplinaire composée de chercheurs et de professionnels du transport urbain. Notre implication personnelle a évidemment compté dans ce dispositif puisque nous en avons réalisé le coeur opérationnel, hormis le noyau d'optimisation, en y intégrant les apports formels de la géographie. Ces apports nous ont permis d'éclairer les enseignements que l'on peut tirer du retour d'expérience d'Evolis-Gare ; ils nous servent maintenant d'appui pour prolonger notre réflexion et nos propositions en matière de transport à la demande.

Partie 2 : Géomatique et intelligence artificielle : éléments pour la gestion d'un transport à la demande en temps-réel

« Modéliser des phénomènes et des processus spatiaux implique le plus souvent de combiner des savoirs et des compétences relatifs à des domaines divers, les uns liés à la thématique de la recherche, les autres issus de l'informatique, la statistique, la physique ou les mathématiques »

Sanders, 2001.

Introduction de la seconde partie

Nous avons vu, dans la première partie les difficultés que représente l'analyse des déplacements des personnes dans le contexte urbain d'aujourd'hui et en quoi le transport à la demande constitue l'une des alternatives à l'automobile en tant que mode de transport durable. En outre, l'exemple d'Evolis-Gare nous a démontré que celui-ci s'inscrit parfaitement dans une chaîne de déplacement intermodale qui valorise chaque mode de transport. Enfin, le transport à la demande comporte de nombreuses déclinaisons parmi lesquelles un fonctionnement en temps-réel qui, vis-à-vis d'un système de réservation en différé, nous apparaît comme l'une des avancées les plus à même de répondre aux besoins individuels des personnes en termes de déplacement.

Nous avons vu que le recours aux technologies issues des *ITS* peut améliorer l'efficacité des systèmes de transport en général et celle du transport à la demande en particulier. Ces technologies comportent des volets très variés allant de la billettique facilitant l'intermodalité aux GPS permettant le suivi des véhicules en temps-réel.

Ainsi, dans cette seconde partie, nous proposons une amélioration du service Evolis-Gare en débloquent la contrainte de réservation qui oblige les usagers à réserver leur transport au plus tard la veille de leur voyage. Ils pourront désormais contacter une centrale de réservation au dernier moment. Cette proposition ne se concrétisera pas par une mise en oeuvre opérationnelle de la recherche mais par un outil de simulation destiné à tester en laboratoire les méthodes élaborées.

Pour mener à bien cette tâche, le géographe doit disposer d'outils de modélisation prompts à formaliser le système qu'il doit étudier ou élaborer. Dans le cas du transport à la demande, la localisation spatiale et temporelle des informations, leur interaction constituent les éléments importants de cette modélisation.

Cette seconde partie se décline en deux volets où le premier présente le concept, les composantes et l'architecture d'un TAD que nous souhaitons développer tandis que le second présente les méthodes reproduisant les processus utilisés pour faire fonctionner le système.

Chapitre 1 : Une approche géographique d'un transport à la demande en temps-réel

La première partie de ce chapitre présente les concepts et les composantes du transport à la demande en temps-réel que nous souhaitons développer. Nous nous appuyons très fortement sur les résultats d'Evolis-Gare pour concrétiser ce nouveau travail. Ensuite, nous présentons la démarche opérationnelle que nous souhaitons mettre en oeuvre. Il s'agit de proposer des outils permettant d'assurer la gestion et l'exploitation d'un transport à la demande tel qu'Evolis-Gare mais fonctionnant en temps-réel. Pour tester et valider ces outils nous proposons l'élaboration d'une plateforme informatique qui modélise toutes les informations nécessaires à la simulation.

1 Le concept de notre TAD en temps-réel

Un premier volet présente le cheminement qui a conduit à définir les caractéristiques du TAD. Un second volet présente le fonctionnement imaginé du système, c'est à dire les différentes opérations qui vont permettre à l'exploitant d'assurer la gestion du TAD. Enfin, le troisième volet présente les informations géographiques utiles au bon fonctionnement du système.

1.1 Élaboration théorique de notre TAD en temps-réel

Lorsque l'expérimentation rencontre la théorie

Tout d'abord, en début de thèse, nous pensions élaborer un simulateur de gestion de TAD sur un territoire virtuel et, pour atteindre cet objectif, nous avons élaboré un prototype destiné à simuler, en laboratoire, la gestion d'une flotte de véhicules de transport à la demande.

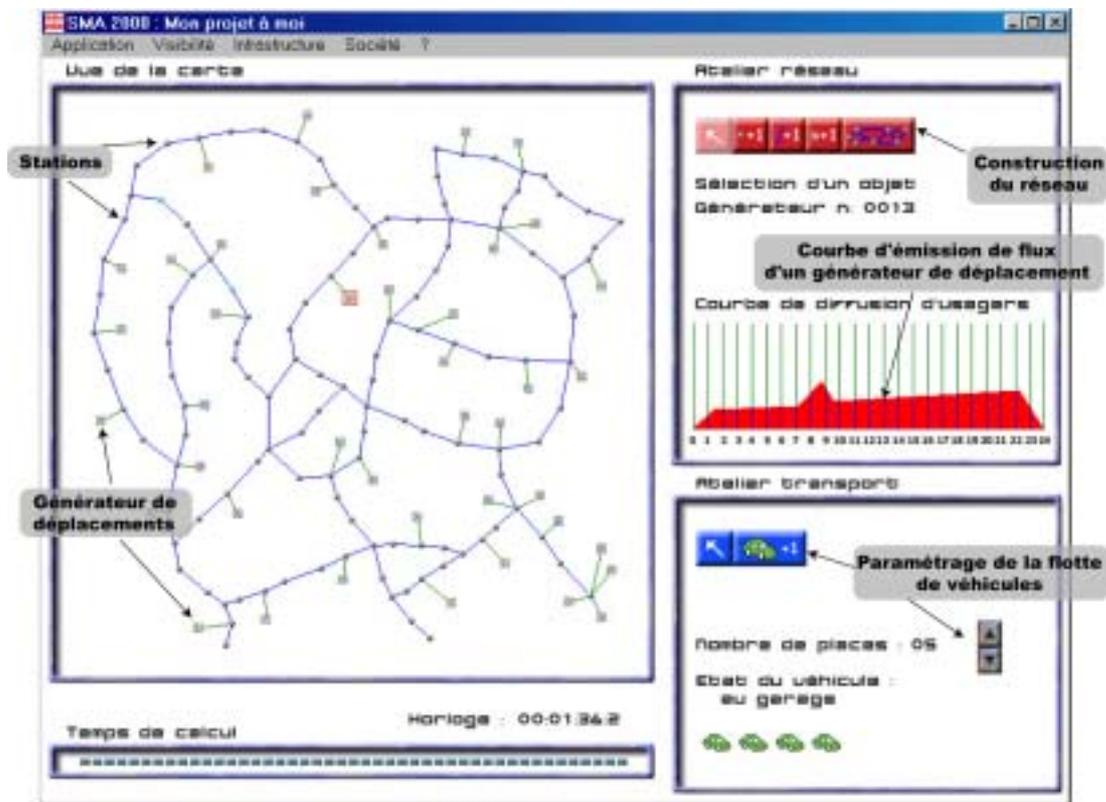


figure 37 : Ébauche d'un simulateur de gestion de flottes d'un transport à la demande

Ce simulateur (figure 37) intègre des **générateurs de déplacements** dotés d'une **courbe d'émission** temporelle d'usagers où à chaque moment de la journée

correspond un niveau d'émission de flux. Il est possible de simuler des types de générateurs différents dont les émissions de déplacements sont réparties tout au long de la journée ou durant des heures précises correspondant aux horaires de travail, par exemple.

Ce simulateur de gestion de transport à la demande permet de **calibrer la flotte de véhicules** en choisissant le nombre de véhicules disponibles ainsi que leur capacité. Cet outil devait être capable de gérer des déplacements de personnes entre tous les points du territoire. Son développement a évolué pour permettre une autre orientation plus proche du service Evolis-Gare qui est devenu un point d'appui essentiel de nos travaux.

Description du service de transport à la demande à mettre en œuvre

Le service reprend les principales caractéristiques proposées par Evolis-Gare car il s'agit de desservir la gare SNCF aux aurores et en soirée, lorsque le transport public classique est absent. L'amélioration sur le nouveau service proposé porte sur le moment de la réservation par les usagers qui s'effectue en temps réel. Lorsque nous parlons de temps-réel, nous ne sommes pas sur le même niveau que le temps-réel en électronique. Nous parlons bien entendu d'un temps-réel « humain » où les délais de réponses du système se comptent plus en secondes qu'en micro-secondes...

Pour mener à bien cette amélioration du service, nous nous appuyons sur une génération de déplacements dont les « palpitations » obéissent à la demande réellement émise par les usagers d'Evolis-Gare et non plus générée de manière aléatoire par un simulateur. Les véhicules constituant la flotte du système de TAD innovant doivent satisfaire les demandes de transport individualisé émises par les usagers. Ces demandes peuvent parvenir à une centrale de réservation à un moment très rapproché de celui de la prise en charge réelle. Le système est alors capable de modifier au dernier moment les trajets des véhicules en circulation pour prendre en charge le nouvel usager et assurer sa demande.

A titre d'exemple, la situation présentée par la figure 38 identifie plusieurs composantes clés de ce système de transport à la demande. Quatre véhicules suivent un itinéraire précis qui se décompose en trajet déjà réalisé (jaune) et en trajet à restant à effectuer (vert) pour atteindre la gare. Chaque véhicule dispose d'un nombre de places libres ou occupées ainsi que des points de passages obligés correspondant à des prises en charge d'usagers programmés. Lorsqu'un appel d'un usager survint, le

Le système insère ce nouvel arrivant en modifiant les itinéraires des véhicules. Cette modification se réalise en veillant au respect des contraintes de remplissage des véhicules tout en minimisant les temps de parcours des usagers déjà présents dans les véhicules et en respectant les délais autorisés des horaires de prises en charge des usagers en attente aux stations.

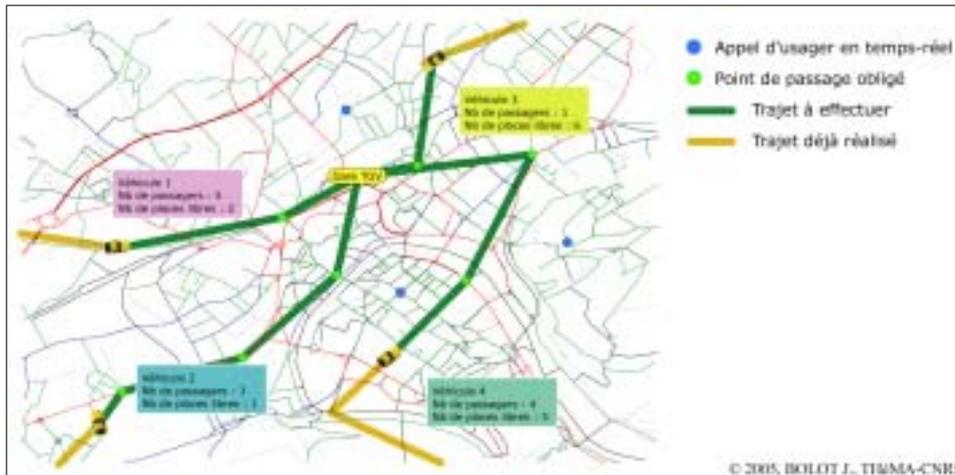


figure 38 : TAD-Innovant, des décisions à prendre très rapidement

La description de ce service de transport à la demande doit être complétée par la description des attentes des usagers et de l'exploitant du transport.

Usagers et exploitant, des attentes parfois antagonistes...

Les attentes des usagers sont différentes de celles du transporteur. Ce dernier tient compte du critère économique de son système et doit mettre en place une stratégie opérationnelle destinée à en minimiser les coûts. Réduire le nombre de véhicules circulant à vide tout en évitant de fonctionner à la limite de la réactivité en affrétant un parc sous dimensionné constitue le principal souci du transporteur.

En revanche, le système doit apparaître transparent et simple d'utilisation à l'utilisateur dont le principal souci est de pouvoir effectuer son déplacement dans les meilleures conditions. Celles-ci sont d'ailleurs difficiles à mesurer car de nombreux seuils relatifs au fonctionnement d'un transport à la demande en temps-réel nous sont inconnus à ce jour. Par exemple, il nous est difficile d'apprécier le temps d'attente qu'un usager est prêt à accepter dès lors qu'il commande un transport à la demande.

Tenir compte des attentes des usagers et de celles du transporteur constitue la ligne directrice de notre recherche. Nous avons pour objectif de mettre en oeuvre un système de transport à la demande respectant ces contraintes.

1.2 Un fonctionnement en trois temps

Pour faire fonctionner ce service de transport à la demande, nous proposons à l'exploitant trois outils distincts à utiliser de manière séquentielle. Le premier est un **outil de prévision** qui fournit une évaluation du nombre d'usagers à transporter dès la veille de la journée de fonctionnement. A la suite de cette prévision, un second outil propose un **service de transport temporaire** qui attribue à chacun des véhicules nécessaires un trajet provisoire. Le troisième outil opère en temps-réel et **met en adéquation les itinéraires préalablement élaborés avec les appels des usagers** [Bolot, 2001b].

Les paragraphes suivants présentent les préconisations conceptuelles de chacun des trois outils. Celles-ci sont pour l'instant déconnectées de toutes solutions méthodologiques et technologiques. Elles nous serviront de feuilles de routes pour lesquelles il sera alors nécessaire de proposer, plus tard, des méthodes appropriées.

Prévision de la demande

La prévision de la demande est le premier outil et il fournit à l'exploitant l'effectif d'usagers localisés dans l'espace qu'il aura à transporter le lendemain. Cette connaissance lui permet de dimensionner et de positionner sa flotte de véhicules sur le territoire.

Pour réaliser cette prévision, nous ne souhaitons pas être tributaire d'une information dont nous ne maîtrisons pas la provenance et en ce sens, nous souhaitons utiliser seulement les informations que peut générer le système de transport à la demande. En outre, pour utiliser une configuration minimale sur la connaissance des usagers, nous utilisons uniquement le lieu de prise en charge, c'est à dire la station de bus, comme information géographique caractérisant un usager. De plus, nous n'identifions pas les usagers par un numéro unique qui permettrait dans certains cas de retracer tous les voyages effectués par une personne. Ces informations sont peut être disponibles aujourd'hui sur le site de Besançon mais rien ne dit qu'elles le seront encore demain ou sur un autre territoire. Les données que nous voulons exploiter doivent toujours

être disponibles et provenir directement de l'exploitation du service de transport à la demande.

Nous utiliserons les informations issues du TAD Evolis-Gare pour simuler un jeu de données existant. A ce jour, nous disposons des réservations effectuées par les clients du Transport à la demande Evolis-Gare de septembre 2000 à juin 2003 pour les trajets du matin et du soir. Nous choisissons arbitrairement de travailler uniquement sur la desserte de la gare en matinée et de ne pas simuler le retour en soirée même si l'optimisation du service à ces deux moments est importante.

Pendant la période matinale, les horaires des trois TGV quittant la gare de Besançon, varient de 5h40 à 7h20. Pour des raisons pratiques, nous agrégeons les réservations de ces trois trains. Cette opération nous permet de bénéficier d'un nombre d'usager plus important tout en respectant dans une large mesure le sens de l'information, à savoir prendre un TGV en partance de Besançon le matin de bonne heure. Tous les appels concernant ces trains sont lissés à l'horaire unique de 7h. Près de 4000 individus composent notre population. Plus tard, nous présenterons plus en détail les caractéristiques spatiales et temporelles de ces informations.

Construction de trajets provisoires

La méthode de prévision établit une demande potentielle correspondant aux usagers prévisionnels souhaitant se rendre à la gare SNCF le matin en utilisant le service Evolis-Gare. Cette demande potentielle devra être localisée sur les stations de prise en charge des usagers. Ensuite, le second outil, en fonction des informations issues de la prévision, construit une offre de service optimisée en définissant le nombre de véhicules, en les positionnant sur le territoire et en attribuant pour chacun d'eux un itinéraire.

La construction de ces itinéraires optimisés doit se référer aux temps de parcours relatifs à l'utilisation du réseau routier. Il convient donc d'intégrer dans une modélisation les informations permettant d'établir des calculs d'accessibilité entre toutes les stations. La modélisation du réseau routier doit contenir les informations indiquant les longueurs, les vitesses de déplacement pour chaque tronçon, les sens uniques...

Le résultat de cette intégration se présentera sous la forme d'une matrice Origine/Destination du même type que celle utilisée par le logiciel Resad2 indiquant

pour chaque station le temps nécessaire pour rejoindre chaque station ainsi que la distance kilométrique à parcourir.

La construction de trajets provisoires doit pouvoir proposer des itinéraires permettant la prise en charge de tous les usagers en utilisant le minimum de véhicules. Pour chaque situation, il peut exister de nombreuses solutions de transport acceptables. Resad2, dans le cas d'Evolis-gare, préfère les solutions les plus économiques. Il en est autrement ici car, même si nous souhaitons également que le système préconise les solutions économiques, nous voulons qu'il intègre une bonne répartition des véhicules sur le territoire afin que ce dernier soit le mieux couvert par la flotte de véhicules. Le système pourra mieux réagir à un appel dont la localisation, surprenante, aura échappé à la prévision...

Gestion en temps-réel du transport à la demande

La gestion du service en temps-réel constitue l'étape la plus compliquée. Elle doit intégrer des méthodes performantes par leur aptitude à trouver une solution aux problèmes rencontrés et ce rapidement.

Lorsqu'un usager se déclare, le système doit être capable de choisir le véhicule qui lui semble le mieux placé pour prendre en charge ce nouveau client. Ce choix n'est pas anodin et repose essentiellement sur deux critères :

- la capacité de chacun des véhicules à prendre en charge un usager supplémentaire ;
- la distance de chacun des véhicules vis-à-vis de l'usager.

Le premier critère indique qu'il faut prendre en compte le nombre de places encore disponibles à l'intérieur de chaque véhicule en comptabilisant les voyageurs déjà pris en charge et ceux qui vont l'être prochainement mais qui, pour l'instant, sont en attente aux stations. Pour chaque véhicule, cela revient à considérer le nombre de places vides restantes en arrivée en gare.

Le second critère établissant la distance entre un véhicule et un usager est délicat à établir. En effet, la figure 39-a présente les mesures des distances entre les positions de deux usagers et la position actuelle du véhicule. L'usager A est plus proche du véhicule que l'usager B. Cependant, pour établir ces mesures nous pouvons considérer un autre point de vue : nous cherchons à calculer la distance du détour que devra faire le véhicule pour atteindre les usagers. La figure 39-b considère la distance

entre un usager et une position que va occuper le véhicule prochainement. Dans ce cas, l'usager B est plus proche du parcours que va suivre le véhicule que l'usager A. Ce principe est utilisé par des systèmes d'optimisation de transport à la demande existants tel que Publicar.

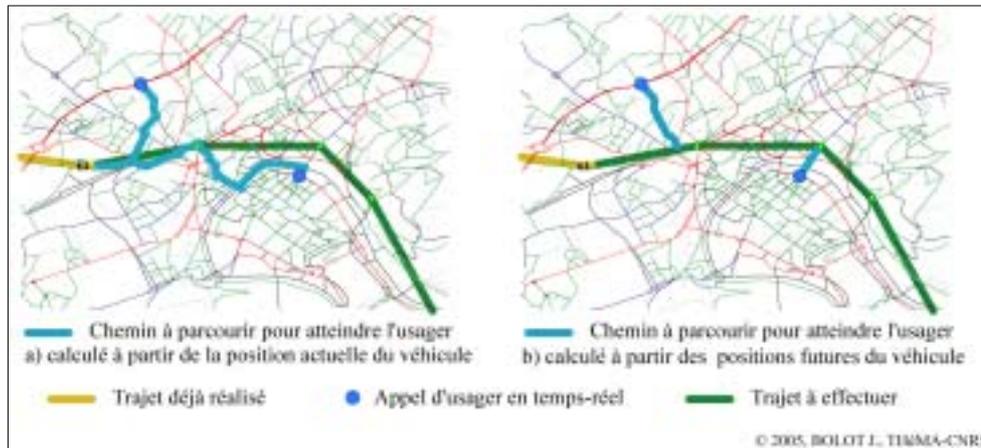


figure 39 : Distance entre un véhicule et un usager

La méthode permettant de répondre au premier critère, calculer la distance la plus courte entre un usager et un point de passage d'un véhicule, nécessite le recours à des calculs de plus court chemin entre chaque point du réseau. Il faut également savoir si un véhicule a techniquement le temps de faire un détour pour aller chercher un usager. En d'autres termes, la distance précédemment calculée n'est pas forcément le seul critère à considérer. Par exemple, un véhicule débutant sa tournée a une marge de manœuvre plus importante qu'un véhicule terminant sa tournée et se trouvant à proximité de la gare. D'une part, les clients à bord d'un véhicule arrivant à proximité de l'objectif accepteront difficilement de voir leur navette prendre une direction trop éloignée de leur destination finale. D'autre part, un véhicule arrivant à proximité du point de desserte n'a plus beaucoup de temps de disponible et ne peut pas, quoiqu'il en soit, effectuer de grandes modifications d'itinéraires. En définitive, il doit exister un seuil au-delà duquel une modification d'itinéraire n'est plus possible. Pour matérialiser ce seuil, nous proposons l'utilisation d'aires de dessertes destinées à délimiter l'étendue de la zone de couverture de chaque véhicule. Un usager ne se localisant pas dans l'aire de desserte d'un véhicule ne pourra pas être pris en charge quelles que soient les configurations.

Tous les points présentés dans ce paragraphe sont, pour l'instant, théoriques. Ils sont cependant issus de réflexions menées par le groupe Tadvance. Certaines de ces

réflexions se sont réalisées avec d'autres collègues lors de projets de recherches auquel le groupe était associé (Predit, Psig 2001).

La figure 40 synthétise le fonctionnement du système et présente les informations en entrée et en sortie de chacune des trois étapes.

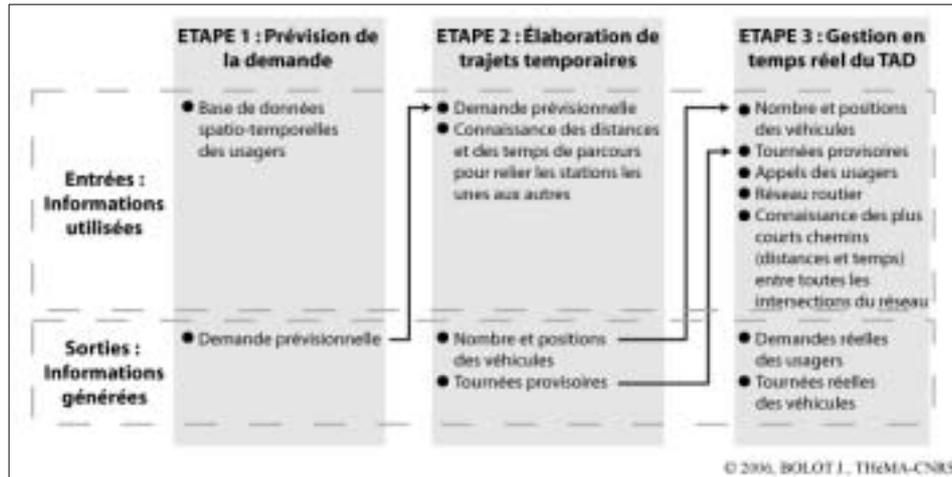


figure 40 : Fonctionnement et entrées-sorties de TAD-I

1.3 Formalisation géographique du transport à la demande

Ce paragraphe a pour objectif de formaliser le transport à la demande en temps-réel présenté précédemment dans ses diverses composantes : demandes de transport, routes, stations, véhicules, et itinéraires. A cette fin, les apports de la géographie seront décisifs puisque toutes ces composantes se réfèrent à l'espace et subsidiairement au temps.

La demande de transport, une information spatio-temporelle

La demande de transport se définit dans l'espace par sa séquence de coordonnées (origine-destination) et dans le temps, par son moment d'émission et son temps de parcours. Les demandes de transport d'Evolis-Gare enregistrées depuis septembre 2000 sont à cet égard conformes et peuvent servir à simuler une prévision de la demande.

Afin de prendre en compte cette conjonction de l'espace et du temps, nous reprenons à notre compte les fondements de la *time-geography* dont le suédois Torsten Hägerstrand est fondateur de cette discipline [Wachowicz, 1999 ; Chardonnel, 1999 ; Saint-Julien, 2001]. Dans les années 1940, un travail sur les conséquences de la

grande vague d'émigration touchant les habitants d'un village près de Stockholm en direction des États-Unis lui servira d'appui pour élaborer cette théorie. Celle-ci pose l'individu comme être indivisible, avec ses fonctions, sa situation sociale, économique et ses rapports avec les autres individus. L'ensemble des interactions qui en découlent est transcrit dans un formalisme posant l'espace et le temps comme référentiel.

La théorie de la *time-géographie* prend corps à travers la mise en place de diagrammes tridimensionnels (figure 2-a). Ceux-ci donnent une représentation sensible de phénomènes difficilement observables dans leur globalité spatiale et temporelle [Chardonnel, 2001]. Ainsi, selon Hägerstrand [1970], « si l'on s'imagine l'espace géographique ramené à un plan, alors, l'échelle et la direction du temps peuvent être indiquées le long d'un axe vertical. De cette façon, le mouvement est transformé en forme géométrique. Même ce qui est immobile dans l'espace a une étendue dans le temps. Une action isolée devient cependant un point, mais est dotée d'une position à la fois dans l'espace et dans le temps ». L'espace de déplacement des individus autour d'un point unique entre deux moments déterminés dans une journée peut se représenter sous la forme d'un prisme journalier (figure 2-b) qui figure l'espace-temps dont l'individu dispose au cours de la journée. Ce volume potentiel contient celui qui marquera le parcours effectif de l'individu [Chardonnel, 2001].

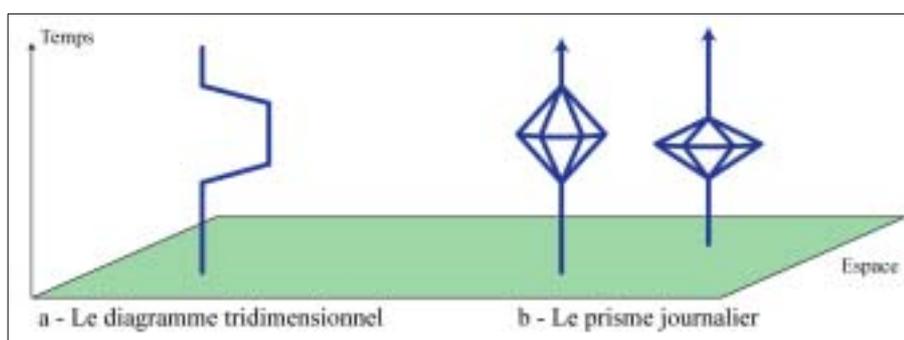


figure 41 : Les représentations graphiques de la time-geography
Sources : Chardonnel, 1999, 2001

Ces représentations graphiques qui expriment la théorie d'Hägerstrand doivent « s'inscrire dans nos consciences et nous permettre de traduire au moins mentalement la réalité en termes de situation et processus » [Chardonnel, 1999]. Ainsi, Hägerstrand indique que la représentation graphique en question est d'abord un schéma d'ordre conceptuel avant d'être un outil d'analyse [Hägerstrand, 1991]. Il permet toutefois de représenter l'ensemble d'un parcours journalier comme une ligne

brisée dont les segments sont coordonnés dans l'espace-temps [Chardonnel, 2001]. Cette transcription tridimensionnelle permet, par exemple, de bien saisir la complexité des pérégrinations d'une famille au cours de la journée (figure 3).

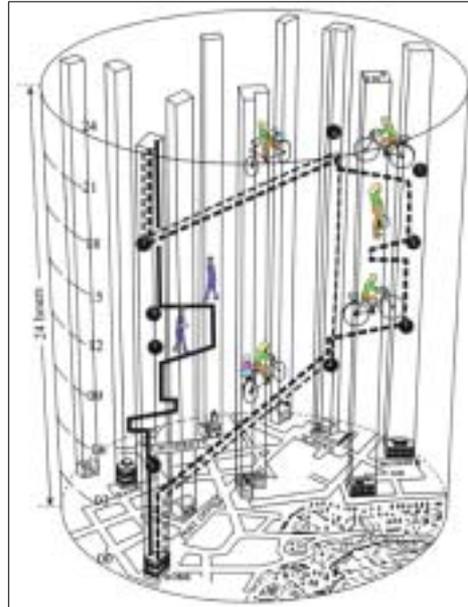


figure 42 : Les pérégrinations vues par la time-geography
 Source : Wachowicz, 1999, d'après Hägerstrand

Pour les besoins de notre projet, ce schéma de représentation sera requis pour conscrire les caractéristiques spatio-temporelles des informations relatives aux usagers. La figure 43 montre comment sont empilées, sous forme de couches, les informations spatiales et temporelles relatives aux réservations.

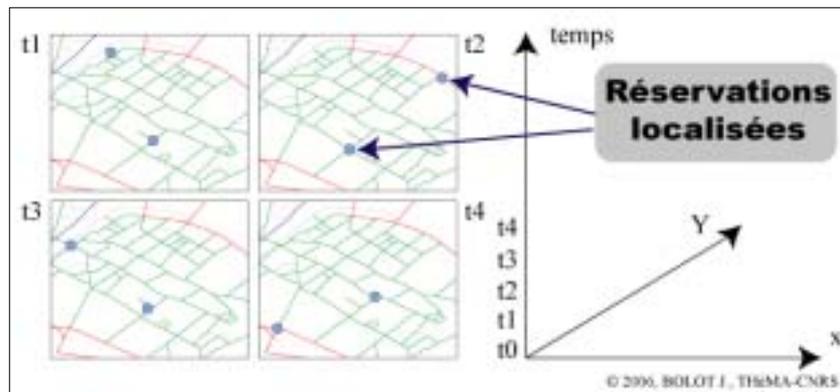


figure 43 : Représentation des dimensions spatio-temporelle des réservations

Modélisation de l'infrastructure et des ses composantes

Les routes et les stations d'arrêt des véhicules composent l'infrastructure de transport.

Le travail réalisé lors de la mise en œuvre d'Evolis-Gare a permis de circonscrire les zones localisées à moins de cinq minutes à pied d'un point d'arrêt. Celles-ci sont représentées par les plages de couleurs foncées de l'isochrone (figure 44). La part de ces espaces résiduels reste importante.

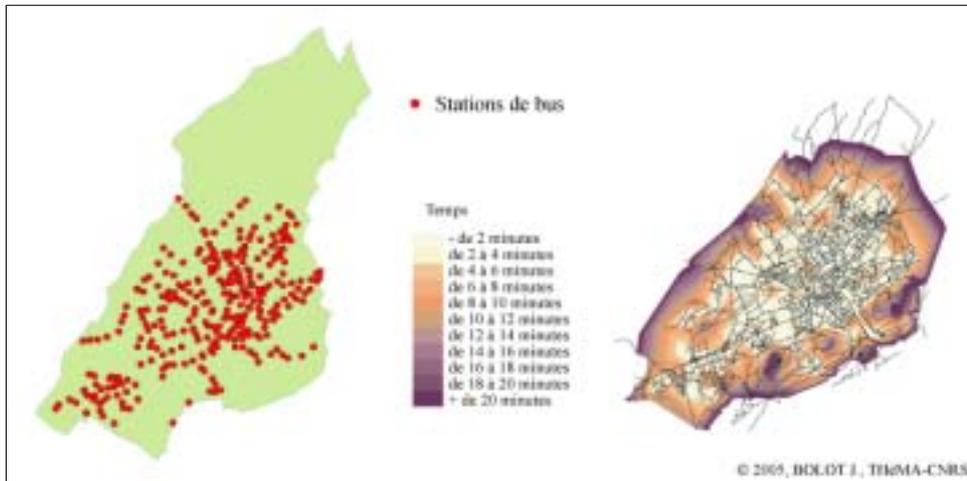


figure 44 : Les stations du réseau urbain ne couvrent pas la totalité de Besançon

Source : Thévenin, 2002

Pour remédier à ce problème en couvrant toute la zone (figure 45), de nouvelles stations sont spécialement créées. Certaines sont matérialisées par des poteaux tandis que d'autres sont identifiées par des éléments caractéristiques tels que des carrefours, des bornes à incendie, bâtiments remarquables.

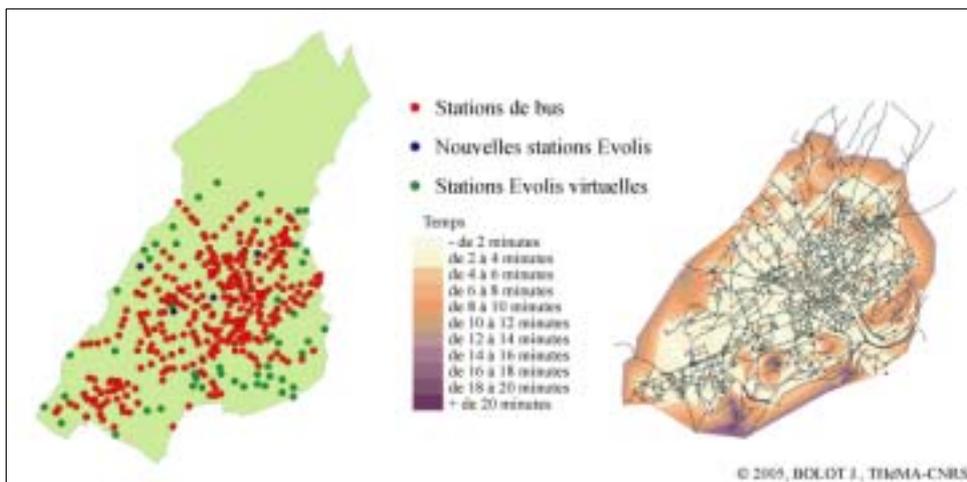


figure 45 : L'accessibilité au transport à la demande pour les bisontins

Source : Thévenin, 2002

Une fois les stations déterminées et connectées au réseau routier, les calculs d'accessibilité permettant d'établir les cheminements les plus rapides peuvent être réalisés.

Généralement, les tronçons des bases de données routières (BDCarto, Route500) sont renseignés par la largeur et le type de voie, la sinuosité, l'environnement traversé. Ces informations aident à ajuster les temps de parcours en fonction d'une vitesse modulée par les conditions de circulation. Cependant, comme l'information utilisée n'était pas à l'origine destinée au calcul de vitesse, les corrections ont été apportées manuellement, pratiquement tronçon par tronçon en tenant compte du contexte particulier de l'heure de fonctionnement du service (figure 46).

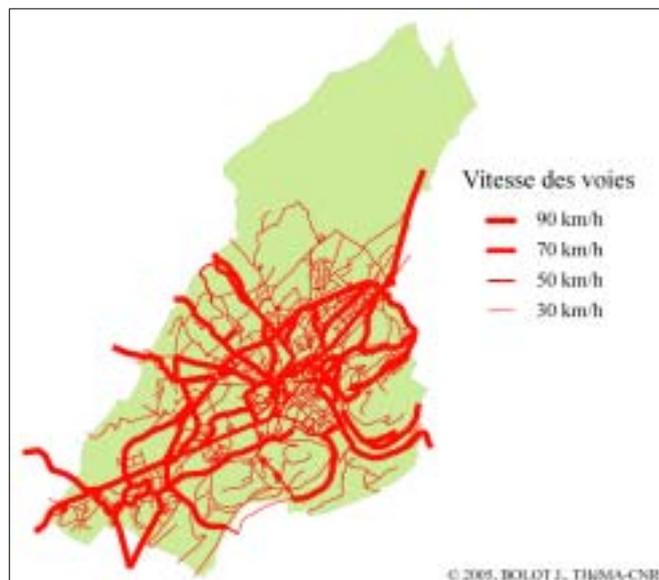


figure 46 : Les vitesses de circulation du réseau routier de Besançon

D'une manière générale, l'accessibilité entre les différents points du réseau est définie à l'aide d'outils de calcul de plus court chemin, basés sur les algorithmes de Floyd-Warshall, de Johnson ou de Dijkstra [Cormen et al., 2000 ; Sakarovitch, 1984, Price, 1974].

Les SIG courants (ArcView, MapInfo, GéoConcept, ArcInfo) reconnaissent pour la plupart les différents formats de données commerciales (IGN, Michelin). Ainsi, les réseaux routiers y sont déjà paramétrés et les calculs d'accessibilité se font directement une fois que toutes les données sont conformes. Débute alors la phase de calibrages, de tests et enfin de validations qui rendra le modèle du réseau routier satisfaisant.

Constructions des itinéraires

Le schéma de prise en charge des usagers s'organise à partir des itinéraires (figure 47). Aucun d'eux n'est figé car chacun peut changer au fil du temps, en fonction de la demande émise par les usagers. La construction des itinéraires doit tenir compte de nombreux paramètres, considérés alors comme des contraintes, liés aux véhicules, aux usagers et au réseau tel qu'il a été préfiguré sur le territoire à desservir. Il s'agit ensuite de trouver, parmi toutes les combinaisons possibles l'itinéraire qui s'ajuste le mieux aux contraintes définies.

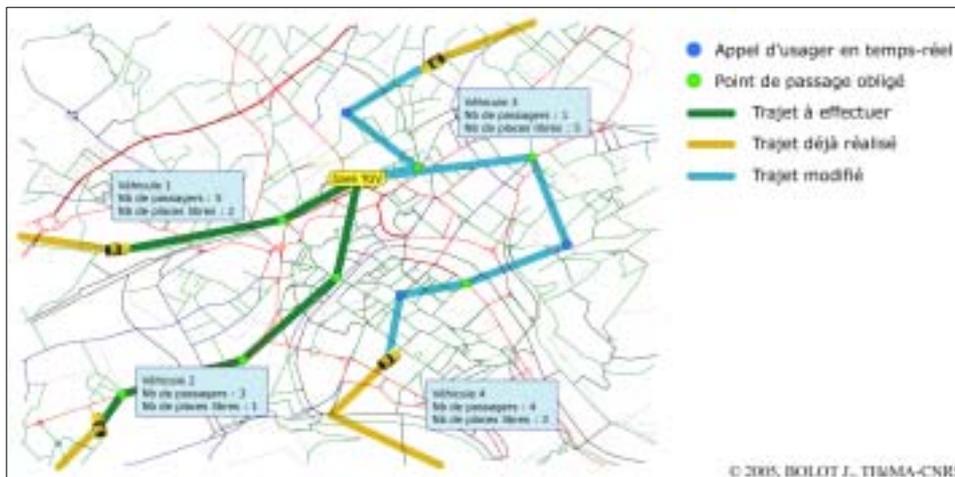


figure 47 : Modification des itinéraires

Les véhicules

Les véhicules sont conçus comme des objets mobiles dont la position doit être connue à tout instant et rapportée à l'itinéraire. En effet, un retard ou une avance du véhicule peut entraîner une modification de l'itinéraire. Pour cette raison, le chauffeur doit connaître sa position et l'état de la demande afin de réagir au mieux à chaque modification de situation (modification des conditions de déplacement sur le réseau routier, difficulté pour un autre véhicule à assurer ses prises en charge...).

Après avoir défini et formalisé les différents constituants du système, il convient de voir maintenant comment va s'opérer leur réagencement fonctionnel. A cette fin, nous proposons l'élaboration d'un « atelier » spécifique.

2 Un atelier dédié au transport à la demande

L'atelier en question prend la forme d'une chaîne de production composée d'outils dédiés aux trois phases majeures que sont la préparation de l'information, les calculs d'accessibilité et la gestion dynamiques des opérations.

2.1 Un SIG pour préparer les informations géographiques

Les informations à préparer concernent le réseau routier, les stations et les demandes de transport émises pour le service Evolis-Gare.

Le réseau routier

Il s'agit de renseigner chaque tronçon de caractéristiques telles que vitesses de franchissement, interdictions de tourner à gauche ou à droite, sens uniques... Il faut également vérifier que les connexions géométriques sont bien réalisées entre les tronçons.

Dans cette tâche, nous avons eu recours à MapInfo dont les fonctionnalités offertes sont suffisantes pour assurer la mise à jour de l'information.

La représentation géométrique du réseau routier peut être modulée au besoin. Par exemple, les routes (figure 48-a) peuvent être symbolisées par des lignes simples (figure 48-b) sur lesquelles se greffent les informations attributaires où par des entités plus complexes en reproduisant les voies de circulation (figure 48-c). La base que nous utilisons provient du SIG de la ville de Besançon, elle n'a pas été conçue pour une telle application et demanderait à être adaptée pour fournir une description géométrique du réseau beaucoup plus fine.

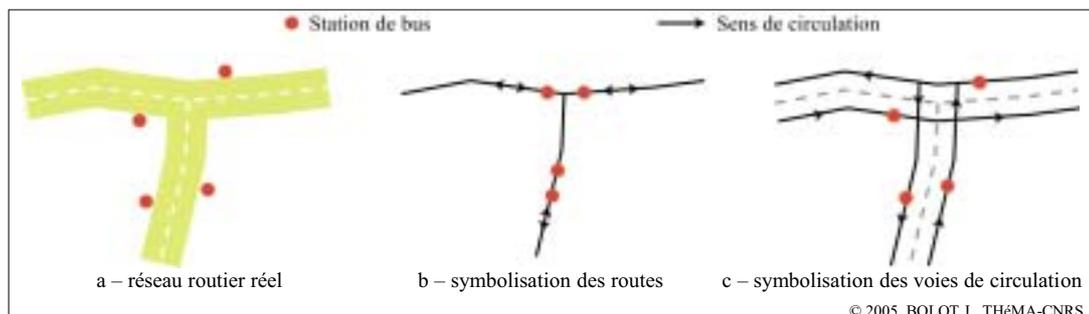


figure 48 : Deux façons d'intégrer le réseau routier

Le positionnement des stations et leur connexion au réseau

La figure 48 met également en place sur le réseau les stations de prise en charge des usagers. Dans la réalité, la connexion entre station et réseau n'est pas directe puisqu'il reste une distance entre les deux que l'utilisateur doit parcourir à pied. Pour simplifier, nous positionnons les stations directement sur le réseau routier de sorte que les coordonnées géographiques de chaque station s'ajustent sur l'extrémité d'un tronçon routier. Pour y parvenir, il peut être nécessaire de déplacer une station vers une extrémité de tronçon, ou, lorsqu'une station est trop éloignée d'un tronçon existant, de créer un nouveau tronçon.

Collecter les réservations provenant d'Evolis-Gare

Les informations relatives aux demandes de transport émanant du service Evolis-gare sont les plus compliquées à préparer. En effet, le logiciel Resad2 enregistre les réservations des usagers dans des fichiers spécifiques à chaque train qui sont identifiés par la date du voyage et l'heure de départ du train. Ainsi le fichier nommé 2002_05_14_05_59.txt contient les réservations pour le TGV qui part de Besançon à 5h59 le 14 mai 2002.

2.2 Calcul d'accessibilité et plus courts chemins

Gérée en temps réel, la décision de prise en charge par un véhicule donné est principalement déterminé par le temps de parcours requis pour atteindre l'utilisateur.

Mesurer l'accessibilité aux différents points de la ville

Établir les plus courts chemins pour relier deux points d'un territoire peut être fait par ordinateur. Cela consiste à calculer par des algorithmes appropriés (cf page 119) les distances entre tous les noeuds d'un réseau pour trouver les meilleurs parcours. La figure 49 présente, en exemple, la liste des plus courts chemins reliant le point 1 aux autres points du réseau.

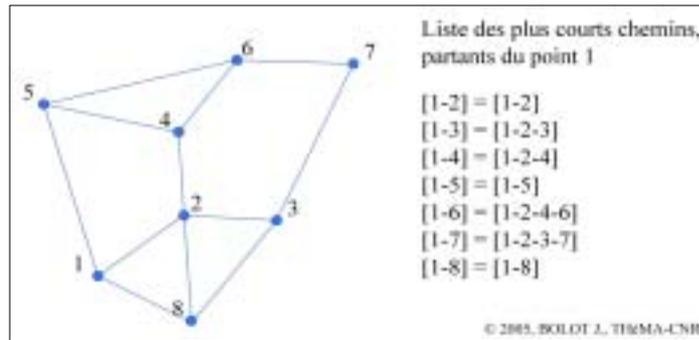


figure 49 : Lister les cheminement des plus courts chemins d'un réseau

Cette information sur l'accessibilité et les cheminements potentiels peut être prédéfinie et stockée en mémoire, pour être restituée au fur et à mesure des besoins. Ce calcul peut également être réalisé en temps-réel et dans ce cas peut intégrer des modifications de dernier instant du réseau routier. Mais cela nécessite des complications algorithmiques qui allongent les temps de calcul pour un bénéfice qui reste discutable en l'état actuel de notre projet. Signalons toutefois les recherches, menées dans ce domaine par les équipes de Ben Akiva du MIT et de Mahmassani de l'université du Texas [Certu, 2000]. Ces avancées seront à intégrer plus tard quand on pourra effectuer des correctifs issus de relevés effectués par GPS ou Galiléo.

Au final, l'accès entre deux points se définit par un temps de parcours en secondes, une distance en mètres et une liste de nœuds jalonnant ce parcours. Cette information est établie une fois pour toutes et les résultats sont enregistrés sous la forme d'une matrice multidimensionnelle à laquelle on se référera dans la suite du processus.

Calculer les distances et les itinéraires des plus courts chemins

Pour cette opération, nous avons préféré recourir à un outil commercial éprouvé plutôt que de développer un algorithme spécifique. Nous avons le choix entre ArcInfo et Cube³⁵ de Citilabs qui proposent la fonction requise. Le logiciel Cube a été préféré en raison de sa capacité; il charge en mémoire les informations provenant du Sig MapInfo, génère un modèle topologique lui permettant d'effectuer les calculs d'accessibilité et de générer la liste des nœuds composant les plus courts chemins.

La matrice multidimensionnelle de tous les chemins possibles représente une masse considérable d'information. Celle du réseau de Besançon compte environ 150 millions de points de passage correspondant à la somme de tous les chemins existants

³⁵ Cube est un outil destiné à la modélisation de trafic. Nous avons utilisé le module AVROAD dédié aux calculs de plus court chemin.

(4.986.289 exactement) entre tous les nœuds (2233 intersections). Le volume d'une telle matrice est supérieur à 3 Giga octets. Un travail d'optimisation sur le format de données a permis de ramener cette taille à 400 Méga octets. Dans la mesure où chaque chemin compte un nombre de points de passage différent, un premier fichier³⁶ configure préalablement les entrées de la matrice en indiquant pour chaque chemin les points de passage qu'il comporte.

2.3 La gestion du TAD

Contrairement aux deux opérations précédentes qui relèvent de principes bien connus, la gestion de TAD mobilise des moyens bien spécifiques assortis de deux possibilités.

La première prend appui sur un système d'information géographique existant en y greffant des modules propres à la gestion du transport à la demande. MapInfo, Arcview, GéoConcept ou même SmallWorld combinés à la programmation (C, Visual, Basic, Avenue, Map Basic, Magik...) permettent d'envisager une telle approche.

La seconde possibilité plus efficace mais plus exigeante consiste à élaborer un outil complet et autonome qui développe les fonctions de base d'un SIG accompagnées des fonctionnalités spécifiques qu'il est difficile d'implémenter sur un outil classique. Les réflexions et les travaux menés à l'occasion du projet Evolis-Gare nous ont conduit à opter pour un outil autonome. En effet, la gestion d'objets et de situations dynamiques n'est pas suffisamment bien conçue dans les SIG courants pour réaliser le type de simulation souhaité.

De plus, si notre projet devait dépasser le statut de prototype, l'expérience ainsi acquise serait directement valorisée.

Les éléments géographiques composant le système de transport à la demande sont préparés et doivent maintenant être intégrés dans un système informatique dédié à la gestion du TAD que nous dénommons plate-forme. Qu'il s'agisse de la prévision de la demande, de la construction de trajets ou de la gestion en temps-réel du service, chacune de ces tâches implique une mise en forme adéquate, notamment pour

³⁶ Pour information, le fichier « configurateur » de la matrice multidimensionnelle issue du réseau bisontin pèse à lui seul près de 10 Méga-Octets.

permettre une mobilisation interactive des systèmes dans ses différentes fonctionnalités.

Modélisation de l'infrastructure routière adaptée aux besoins de la gestion du TAD

Le réseau routier intervient à deux fins. Tout d'abord, il sert à l'habillage graphique de l'espace à couvrir et aide à localiser certains lieux clés comme les stations de bus, par exemple. Ensuite, pendant la gestion en temps-réel du transport, il fournit la base d'information nécessaire pour repérer et optimiser les trajets. Il est donc nécessaire de procéder à une modélisation du réseau routier qui permette ces deux opérations.

Il existe plusieurs modèles de réseaux. Le plus simple est appelé modèle spaghetti par les spécialistes [Scholl et al., 1996]. Celui-ci tire son nom de la comparaison avec le plat de pâtes (dans un plat de spaghettis, on peut extraire un spaghetti sans déplacer les autres). Chaque objet est construit indépendamment des autres comme le montre la représentation « physique » des objets spatiaux, détaillée par l'utilisation des constructeurs de n-uplets ([]) et de listes (< >) :

Point = [abscisse : réel, ordonnée : réel]

Arc = <[abscisse : réel, ordonnée : réel]>

On aboutit ainsi à des listes de coordonnées indépendantes. Ce modèle convient mal aux travaux d'analyse spatiale puisqu'il est nécessaire de recalculer la topologie à chaque opération ou d'identifier les relations spatiales entre les objets (inclusion, adjacence..) en balayant les coordonnées géographiques une à une.

Le second modèle est appelé modèle de réseau. La primitive point du précédent modèle est remplacée par une nouvelle primitive, le nœud. Celui-ci, selon Scholl [1996] « est soit un nœud isolé (le point isolé du modèle spaghetti), soit l'une des extrémités d'un arc. Les arcs sont alors décrits par leurs nœuds extrémités et par les coordonnées des sommets intermédiaires. Le nœud permet la description de la topologie d'un réseau (deux arcs sont connexes s'ils partagent un nœud extrémité) et rend ainsi plus efficaces les opérations topologiques telles que le test de connexité de deux lignes et les opérations de calcul des réseaux ».

Noeud = [abscisse : réel, ordonnée : réel, <Arc>]

Arc = [Noeudorig, Noeudest, <[abscisse : réel, ordonnée : réel]>]

Le nœud est identifié par ses coordonnées suivies d'une liste d'arc. Les arcs sont décrits par deux nœuds puis par une liste contenant l'ensemble des sommets intermédiaires. Le premier identifie le nœud d'origine (le premier point) de l'arc tandis que le second nœud identifie la destination (le dernier point) de l'arc. Ainsi, chaque arc est orienté en fonction de cet ordre. Dans cette construction, un nœud est toujours décrit par ses coordonnées suivies d'une liste d'arcs. Si cette dernière est vide, il s'agit d'un point isolé. L'absence de redondance caractérise ce modèle. En effet, une coordonnée n'apparaît qu'une seule fois dans la base de données ce qui rend les mises à jour efficaces et aisées. [Scholl et al, 1996].

Pour mettre en oeuvre notre modèle topologique de réseau, nous avons repris certaines caractéristiques existantes dans Cube et MapInfo. Le modèle topologique de Cube dédié aux calculs d'accessibilité procède par une représentation simplifiée du réseau et ne conserve que les extrémités des tronçons. En contrepartie, la finesse de tracé du réseau routier tel que l'intègre MapInfo via un modèle de type spaghetti est perdue. Nous intégrons un modèle topologique (de type Arcinfo) qui combine les points positifs des deux sources (figure 55).

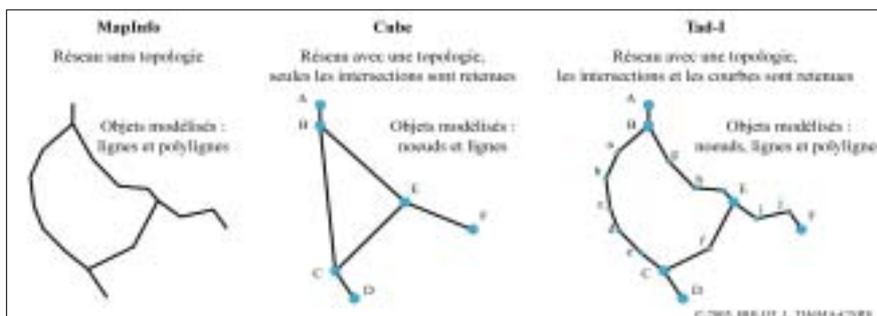


figure 50 : Le réseau, d'un modèle spaghetti vers un modèle topologique

La topologie retenue est présentée à la figure 51. Deux types de noeuds coexistent. Les premiers se rapportent aux intersections entre les arcs tandis que les seconds ne font que préciser les tracés.

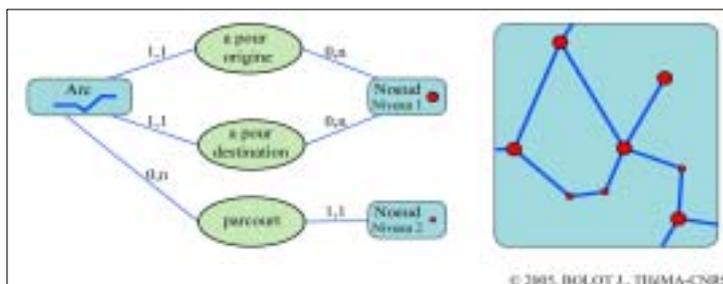


figure 51 : Représentation des arcs par le modèle topologique de réseau

Dans la plate-forme, ce modèle topologique est appliqué aux données liées au réseau routier. Un algorithme spécifique permet de réaliser ce couplage entre données réseaux issues de MapInfo et fichiers d'accessibilité tels qu'ils sont générés par Cube. Cette opération génère à son tour une nouvelle modélisation du réseau routier. Cette nouvelle architecture d'information est sauvegardée pour éviter de reproduire l'opération à chaque requête. En effet, le calcul nécessaire demande tout de même quelques secondes, il est donc préférable de le réitérer, uniquement en cas de modification du réseau.

Modélisation spatio-temporelle des informations liées aux usagers

Les informations relatives aux usagers ont un double usage. Elles sont utilisées une première fois pour la prévision de la demande puis une seconde fois, pour la gestion en temps-réel de celle-ci.

La localisation géographique des usagers s'effectue à la station de bus qu'ils doivent rejoindre et non à leur adresse postale. Il y a deux raisons d'ordre technique à cela, les usagers peuvent souhaiter une prise en charge ailleurs qu'à leur domicile (travail, loisir...). La connaissance de l'adresse peut être utile pour évaluer le potentiel local d'un territoire mais elle ne présente pas, en l'occurrence, de nécessité opérationnelle pour le TAD. En outre, travailler sur un semis fini d'arrêts permet de travailler sur une matrice d'accessibilité précalculée.

Après l'espace, le temps est le second terme à prendre en compte pour fixer les caractéristiques du déplacement de l'utilisateur. Ce sont les moments suivants : arrivée à la station, prise en charge, dépose au lieu d'arrivée, la gare SNCF dans notre cas ; ces éléments sont ensuite recalés dans le référentiel général de la journée.

Ces informations constituent les données attributaires caractérisant l'utilisateur et les particularités de son déplacement ; soit :

Usager

[Identifiant]

Déplacement

[Identifiant, Identifiant-Usager, jour de réservation, jour du déplacement, station, heure de prise en charge, heure de dépose, bagage, regroupement < Identifiant-Usager >]

La journée de déplacement obéit à la codification [jj/mm/aaaa]. Afin de mieux pointer certaines caractéristiques des journées, quatre éléments ont été ajoutés : le jour de la semaine [**lundi, mardi, mercredi, jeudi, vendredi, samedi, dimanche**], être ou non en période de vacances [**1, 0**], être ou non un jour est férié [**1, 0**], position de la semaine dans l'année [**1...52**] (tableau 8).

| Nom du champ | Date | Jour de la semaine | Jour férié | Période de vacances | Numéro de la semaine |
|--------------|------------|--|------------------|---------------------|----------------------|
| Codification | jj/mm/aaaa | [lundi, mardi, mercredi, jeudi, vendredi, samedi dimanche] | 0 = non, 1 = oui | 0 = non, 1 = oui | 1 ≤ entier ≤ 52 |

tableau 8 : Codification du calendrier

Ces informations additionnelles permettent d'affiner notre connaissance de la demande en fonction des différents repères temporels qu'elles constituent.

Un système de cases à cocher a été privilégié pour assurer un mode d'interrogation ergonomique des données requises (figure 52).

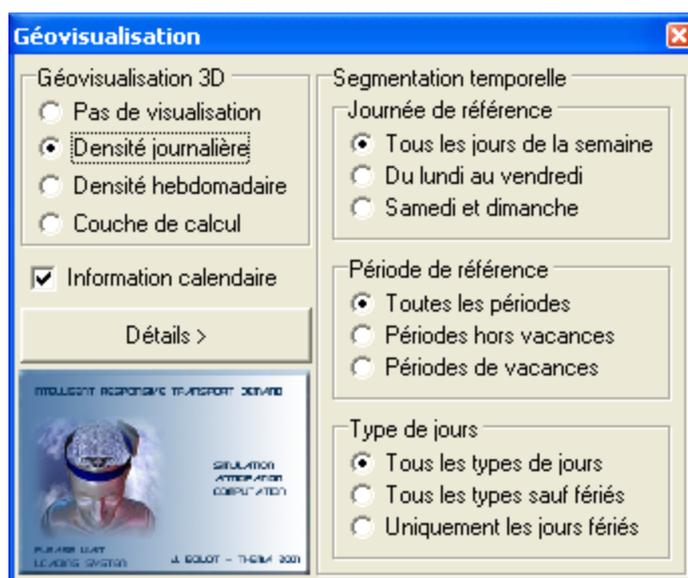


figure 52 : Sélection temporelle des informations via une interface presse-bouton

En effet, la fenêtre intitulée « géovisualisation 3D » offre la possibilité d'afficher ou non des couches d'informations obtenues lors de calculs qui seront présentés au troisième chapitre ci-après. La sélection temporelle s'effectue en cliquant sur l'option souhaitée de chaque fenêtre. De la sorte, on peut visualiser un grand nombre de configurations temporelles.

Ainsi, tous les termes de formalisation des déplacements sont maintenant en place. D'un point de vue spatial, chaque déplacement est identifié par sa station de prise en

charge sur laquelle viendront se greffer les autres caractéristiques du parcours encore à déterminer. La transcription géométrique s'opère par l'affichage de ponctuels selon le modèle utilisé pour la représentation graphique de l'infrastructure routière. Le temps tel que nous l'avons pris en compte (page 117), constitue une troisième dimension et transforme l'espace géométrique planaire $[x, y]$ en un espace volumique $[x, y, t]$ dans lequel il restera à inscrire les trajets du mobile avec sa vitesse.

L'utilisateur peut visualiser la répartition des informations dans l'espace et dans le temps. Le système offre un modèle spatio-temporel tridimensionnel comparable à celui développé par le Département des Sciences Informatiques de l'université d'Aalborg au Danemark [Böhlen & al, 2003].

Modélisation et visualisation des véhicules, les objets mobiles du système

La modélisation du véhicule est en fait étendue au binôme chauffeur-véhicule puisque l'on destina à celui-ci les directives futures sur l'itinéraire à suivre, les passagers à prendre en charge et à déposer.

La modélisation requise s'appuie sur de nombreux travaux menés au sein de l'INRETS (figure 53) et de l'INRIA ou d'organes d'ingénierie (Prolexia³⁷) proposant des plates-formes de simulation en temps-réel. Ces travaux du domaine des ITS trouvent leur origine dans des projets de conduite automatique des véhicules ou de simulation de trafic.

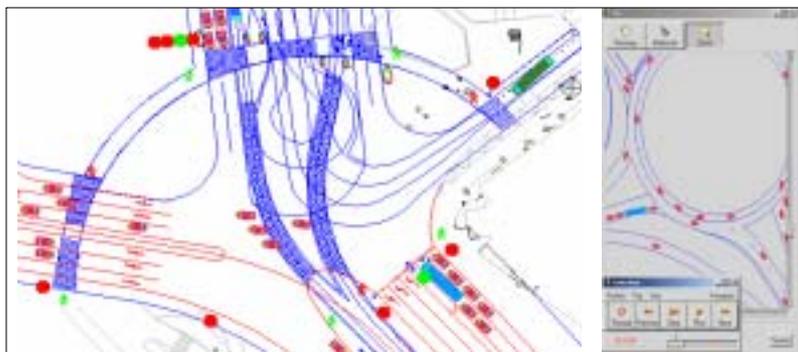


figure 53 : Fenêtre de visualisation du simulateur de Dynasim³⁸

Pour parvenir à formaliser au mieux les événements dans leur temporalité, le système de la plate-forme est cadencé par une horloge autonome dont le pas de temps paramétrable permet à l'utilisateur de régler la vitesse d'exécution de la simulation. Les déplacements des véhicules sont donc indexés sur cette horloge. La vitesse de

³⁷ http://www.prolexia.fr/francais/frame_francais1.htm

³⁸ <http://www.dynasim.fr/Animations.htm>

déplacement d'un véhicule est établie en fonction des caractéristiques de chaque tronçon définies par la modélisation du réseau routier. Un vecteur dont la longueur correspond au temps de parcours du tronçon divisé par le pas de temps permet d'incrémenter la position du véhicule à chaque avancée de l'horloge (figure 54). Enfin, l'orientation du véhicule calculée en fonction de l'angle du tronçon parcouru est destinée à améliorer le rendu visuel de la simulation en apportant une petite touche de réalisme.

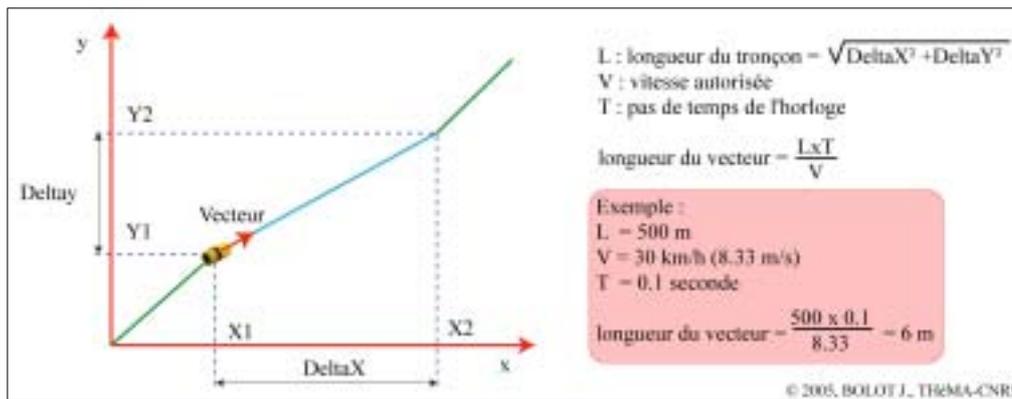


figure 54 : Calcul du vecteur vitesse des véhicules

La fenêtre de visualisation dynamique de la plate-forme permet de suivre pas à pas le trajet d'un véhicule (figure 55). Les numéros grisés localisés sur le réseau correspondent à des intersections indiquant la présence d'un carrefour ou d'une station.

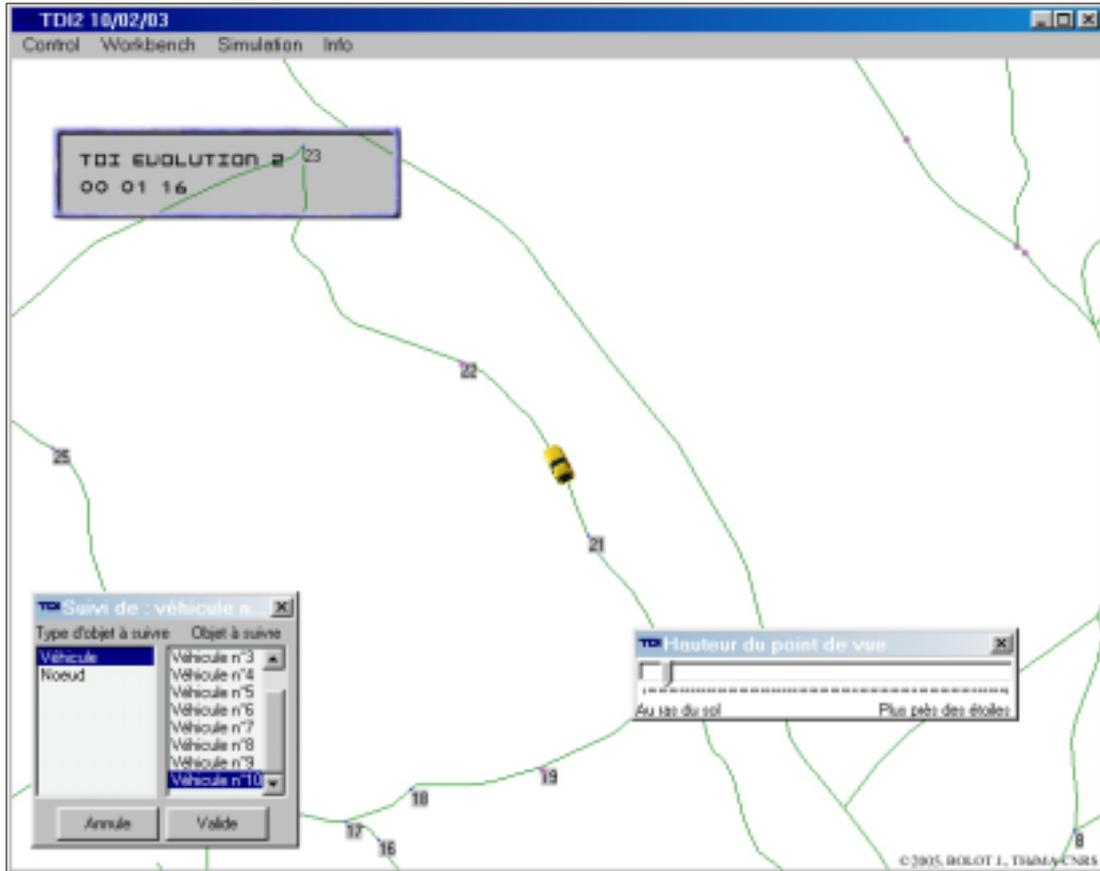


figure 55 : Visualisation d'un véhicule et de son trajet sous TAD-I

Conclusion

Ce chapitre a montré les premières étapes de la construction du système de transport à la demande. Nous avons présenté dans un premier temps la réflexion géographique qui a permis d'aborder quelques points de théorie utiles à la mise en oeuvre. Ensuite, ont été traitées les préoccupations plus techniques relevant de la géomatique ; elles ont abouti à proposer un canevas instrumental approprié pour donner corps aux éléments théoriques précédemment établis. Une chaîne de production est spécifiquement mise en place pour mener à bien l'ensemble des opérations nécessaires à notre recherche. Cette démarche est synthétisée par la figure 56.

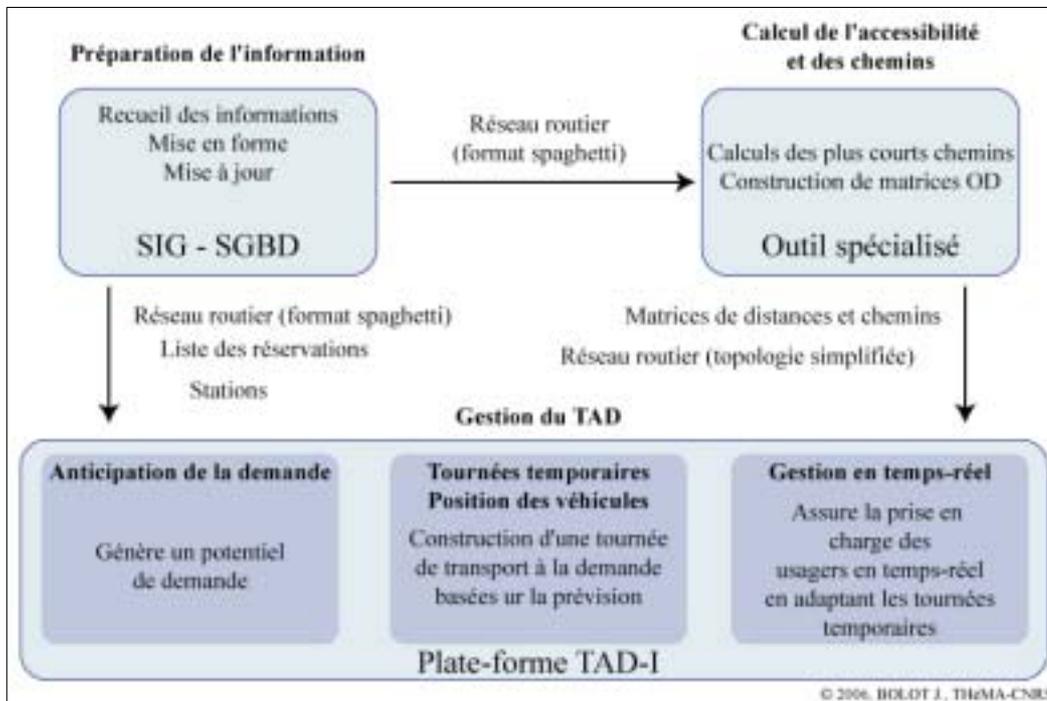


figure 56 : Des outils dédiés à chaque opération

La plate-forme de simulation est maintenant prête pour qu'on y installe le reste des éléments requis pour l'anticipation de la demande, la construction de tournées temporaires et la gestion en temps-réel du TAD.

Chapitre 2 : Le transport à la demande par la simulation et l'intelligence artificielle

Chacune des trois étapes opérationnelles de notre système est l'occasion de mettre notre démarche à l'épreuve. La prévision de la demande s'effectue via des calculs de densité dans un espace à trois dimensions. Les trajets temporaires sont élaborés par des algorithmes génétiques reprenant les concepts de la théorie de l'évolution énoncés par Darwin. Enfin, la gestion en temps-réel du transport à la demande s'appuie sur le principe des insectes sociaux...

1 Définir la demande dans l'espace et dans le temps

Nous souhaitons élaborer un outil capable de donner à l'exploitant de transport les principales caractéristiques de la demande en devenir sur une journée. En fait, il s'agit d'élaborer une prévision facilitant la gestion du parc de véhicules. Cette prévision s'appuie sur les informations issues de déplacements antérieurs connus. Nous utilisons les informations générées par le service Evolis-Gare pour mener nos investigations et caler nos prévisions.

1.1 Les informations relatives aux usagers

Rappelons que les informations sur la prise en charge des usagers sont consignées dans une base de données et référencées selon les trois dimensions (x, y, t) de l'espace et du temps.

La répartition temporelle des informations

L'historique de la fréquentation journalière du service de transport à la demande Evolis-Gare (figure 57) fait ressortir des disparités en termes de fréquentation. Certaines s'expliquent facilement en raison d'événement particulier comme la grève, d'autres sont plus difficiles à cerner et peuvent dépendre de l'intensité des campagnes de publicités faites autour du service (la demande croit de façon très significative durant ces périodes) ou liées aux périodes de vacances scolaires (la fréquentation est en baisse dans ces cas-là).

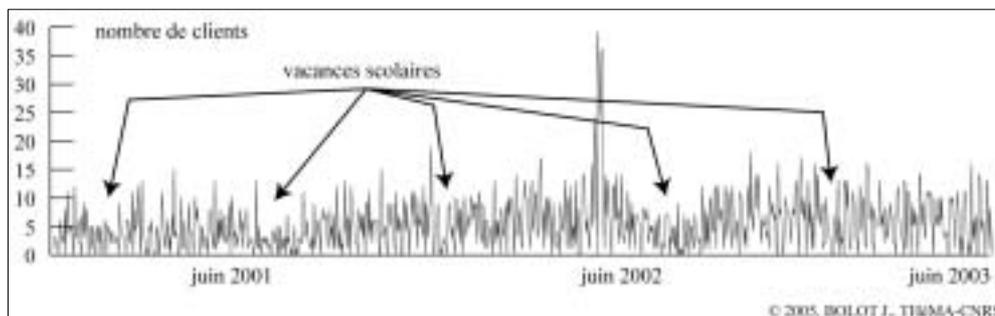


figure 57 : Fréquentation journalière du service le matin de janvier à mai 2003

L'une des principales observations des gestionnaires du service concerne la fréquentation au jour le jour durant la semaine. Les figures 58-a et -b montrent que le profil de fréquentation sur la semaine varie peu en fonction des périodes considérées.

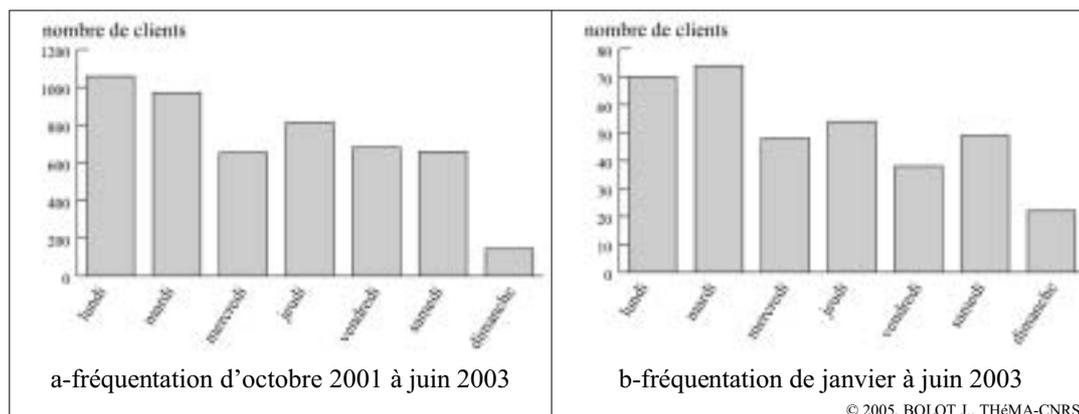


figure 58 : La répartition de la fréquentation du TAD pour les trains de 7 heures

Les deux premiers jours de la semaine sont les plus fréquentés. Ce constat se marque d'avantage encore en 2003. Un palier intervient ensuite jusqu'au samedi avec une chute très forte le dimanche. L'historique des fréquentations détaillées du service pour chaque jour de la semaine (figure 59) permet d'observer des tendances en terme de pics ou de creux dans la fréquentation selon les périodes.

Des pics concernant la plupart des jours de la semaine apparaissent nettement au cours du mois de mai 2002 et principalement le lundi 27 mai. Cette hausse est difficilement explicable car elle ne porte pas sur une période de vacances scolaires. Peut être est-elle à mettre au compte des campagnes de promotion ou d'un événement non repéré. En tout état de cause, ces pics sont révélateurs d'un potentiel de clientèle encore sous exploité pour l'instant. Cette faiblesse s'explique par le caractère toujours expérimental du service qui touche à peine 1 % de la population bisontine. En effet, la SNCF ne veut pas mettre trop en avant le produit dans sa politique commerciale tant que celui-ci n'est pas définitivement adopté à la suite d'une décision officielle. Des opérations publicitaires ponctuelles et exceptionnelles ont tout de même révélé cette offre de service auprès du grand public. En outre, le fonctionnement actuel repose sur une délégation de service public au profit d'une association de taxis bisontin. Or, ce mode de fonctionnement montre ses limites dès lors que la demande atteint un niveau élevé. Les opérateurs, pour l'instant, trouvent un intérêt à ce que le service reste modeste en terme de pénétration. Cette réserve prudente va à l'encontre des besoins du prévisionniste, du statisticien...et des intérêts de la cité soucieuse de transport s'inscrivant dans la démarche du développement durable.

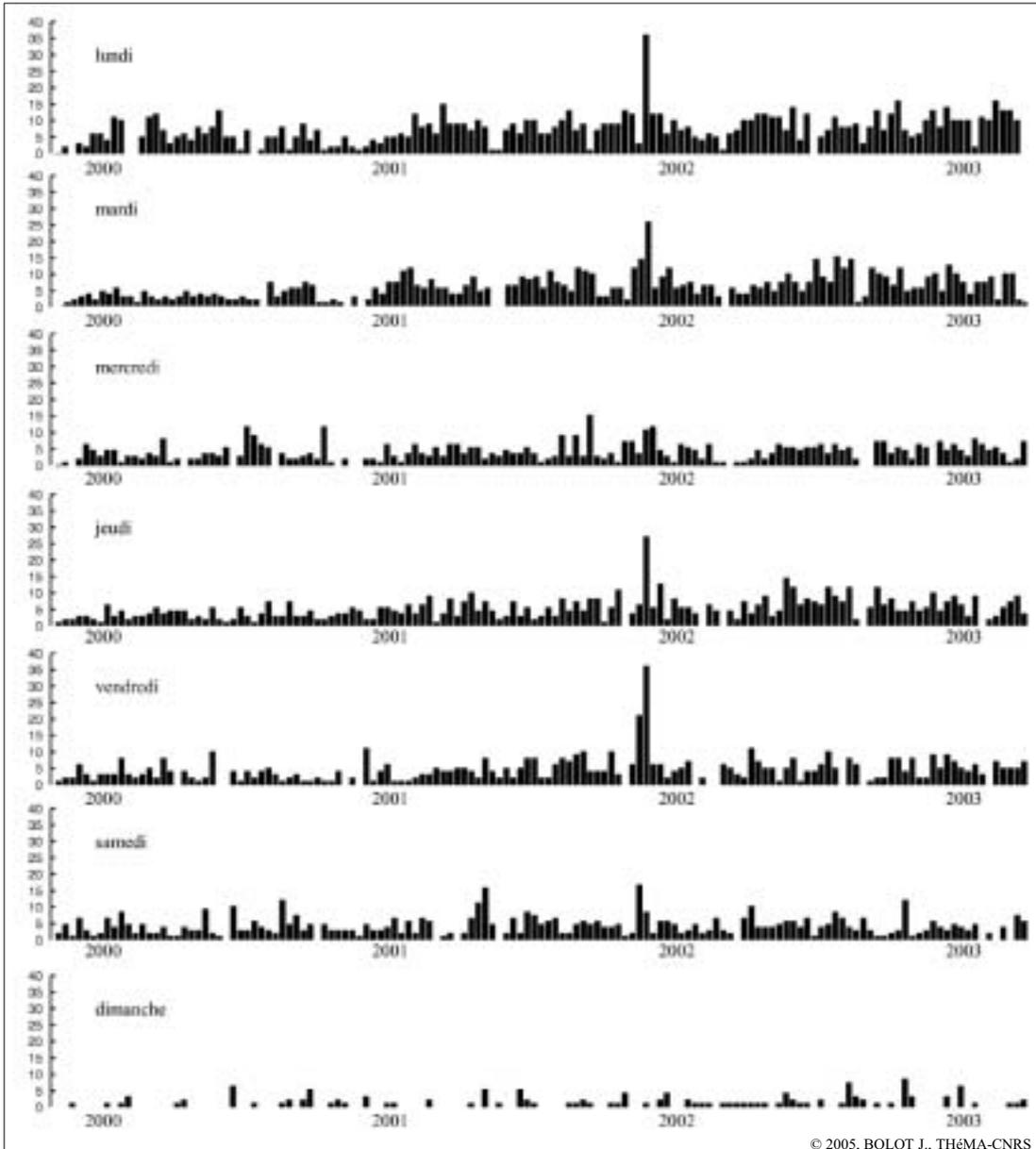


figure 59 : Fréquentation entre 2000 et 2003 selon le jour de la semaine

La répartition spatiale des données de la demande

La localisation des usagers est faite par celle de la station de prise en charge. La carte de la figure 60-a positionne les appels ainsi recensés autour de la gare SNCF. Parce que bon nombre de points se superposent, une dispersion arbitraire dans un rayon de 300 mètres autour des points de densités les plus fortes permet de faire apparaître un territoire contrasté (figure 60-b).

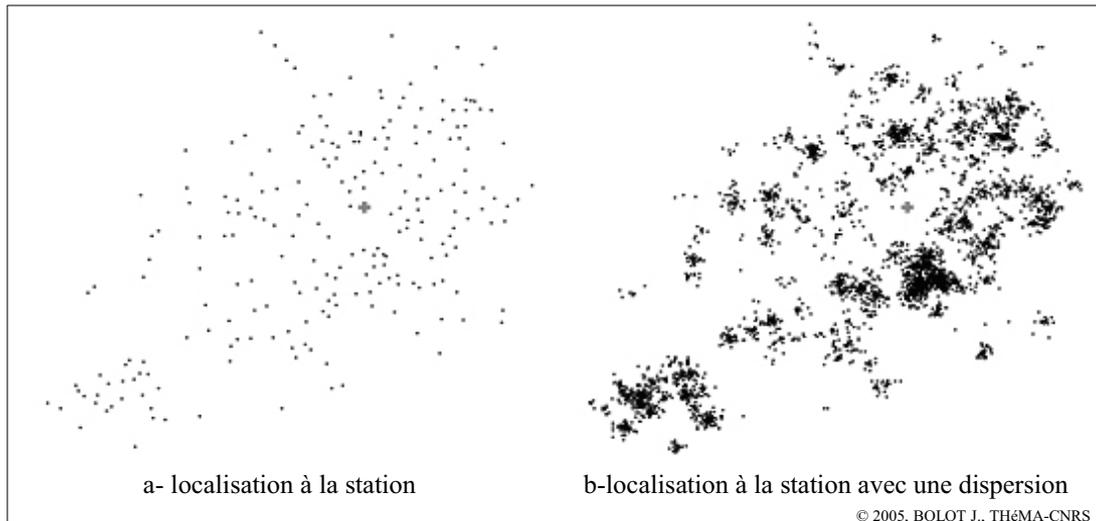


figure 60 : La répartition spatiale des points de départ des demandes de transport

Quelques pôles générateurs de déplacement émergent. Le centre-ville en est le plus important. Le nombre d'appels localisés permet d'établir une cartographie de la demande et d'en analyser la répartition. Plusieurs méthodes de représentation de la densité sont disponibles [Banos & Bolot, 2001] mais celle qui repose sur la mise en œuvre d'un carroyage est à la fois commode et adaptée (figure 61), car elle offre la possibilité de comparer de façon simple une même portion du territoire, identifiée par une maille, à des dates différentes. Il est bien entendu toujours possible de comparer deux cartes de densité issues d'interpolations mais cette tâche devient plus malaisée dès lors que l'on souhaite l'automatiser.

La cartographie de la demande sur une période relativement longue montre que l'essentiel du territoire bisontin est couvert hormis le massif forestier de Chailluz au nord-est de la ville. La demande, en revanche, n'est pas distribuée de manière homogène sur le territoire.

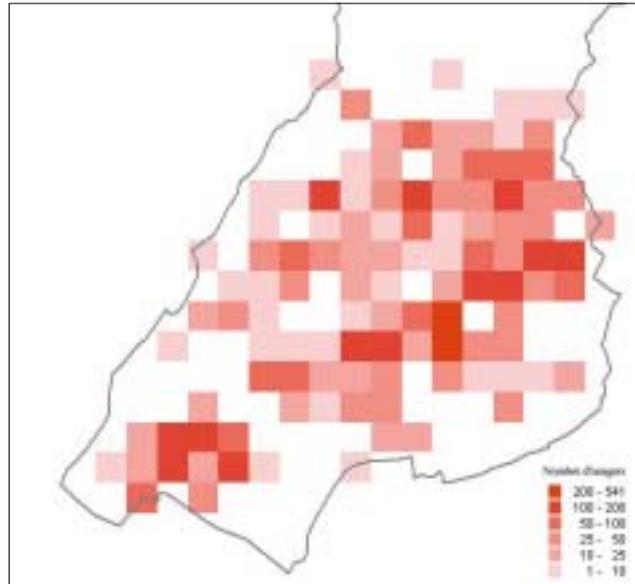


figure 61 : La répartition des appels sur le territoire bisontin

1.2 Le traitement des informations tridimensionnelles

L'inscription des informations dans un référentiel à trois dimensions figurant l'espace et le temps complique quelque peu cette partie du travail. Nous procédons à une discrétisation de la dimension temporelle de manière à comparer un empilement de couches géoréférencées consultable comme les pages d'un agenda.

Segmentation des dimensions spatiales et temporelles

Tout d'abord, l'espace est carroyé selon une maille dont la taille unitaire correspond à l'aire de chalandise d'un véhicule à l'arrêt. Cette taille paramétrable est fixée à 1000 mètres de coté.

Quant à la dimension temporelle, elle est prise en compte par une suite de couches espacées par un pas de temps variable entre le 20 décembre 2002 et le 30 juin 2003.

En prenant la journée comme référentiel temporel, on aboutit à la superposition de 921 couches calées sur le nombre de jours composant cette période. Quant il s'agit de la semaine, l'ensemble se réduit à 133 couches. Chacun des carreaux renseignés de chaque couche comptabilise le nombre de réservations localisées (figure 62).

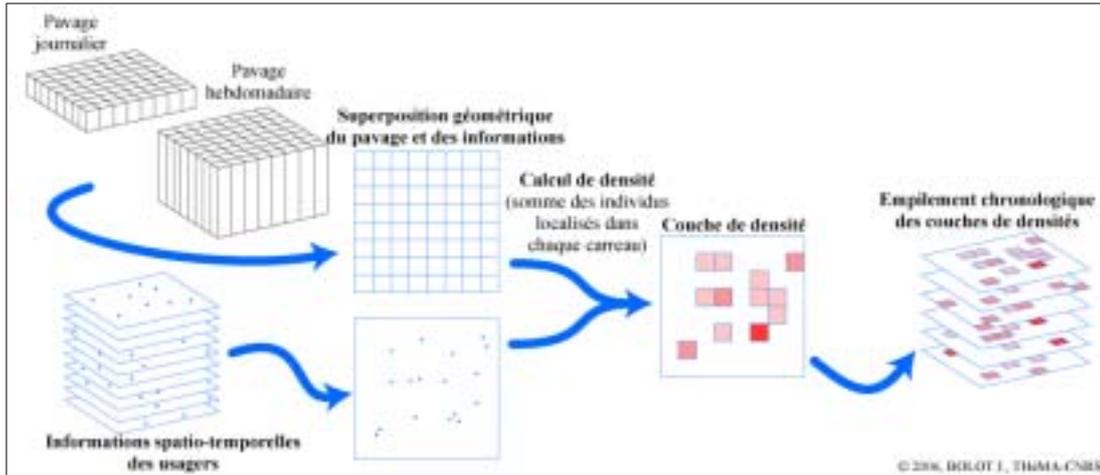


figure 62 : Symbolisation du découpage tri-dimensionnel

La mise en oeuvre

Un module de traitement permet d’effectuer les calculs requis sur les différentes couches puis d’en représenter graphiquement les résultats.

A titre d'illustration, nous proposons de cartographier la répartition spatiale de la demande selon certains jours ou groupes de jours de la semaine. Pour cela, nous procédons à la somme des valeurs de tous les carreaux qui se superposent géométriquement, à la condition que chaque carreau réponde aux critères temporels du calendrier définis par la boîte à bouton de la figure 63.

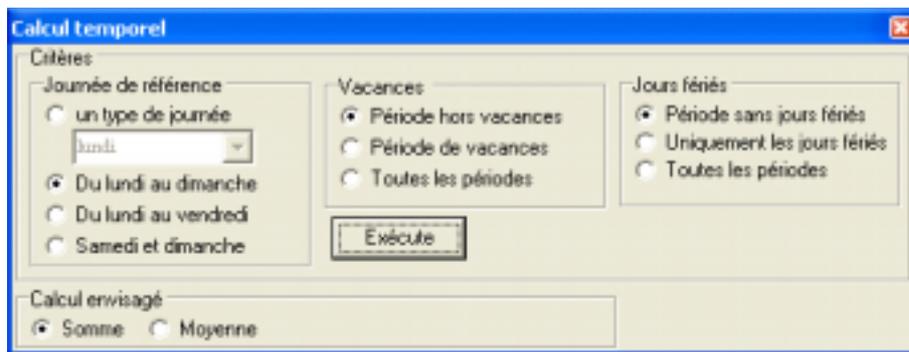


figure 63 : Sélection des critères temporels via le calendrier

Le résultat de cette somme est stocké dans une nouvelle couche qui s’affiche à l’écran en activant l’option adéquate à l’aide d’une commande dans la boîte de géovisualisation présentée page 128. Dans cet exemple, les requêtes temporelles ont été effectuées en sélectionnant les différents jours de la semaine hors vacances et hors jours fériés.

La représentation graphique des résultats

Les cartes présentées à la figure 64 permettent de visualiser l'ensemble des résultats des requêtes effectuées. La légende est redéfinie pour chaque situation puisque les classes de chaque carte présentent une égale amplitude de densité. La comparaison des documents doit tenir compte de cette distinction.

La demande au centre-ville est importante dans chacun des cas et très fortement marquée le mardi et le vendredi.

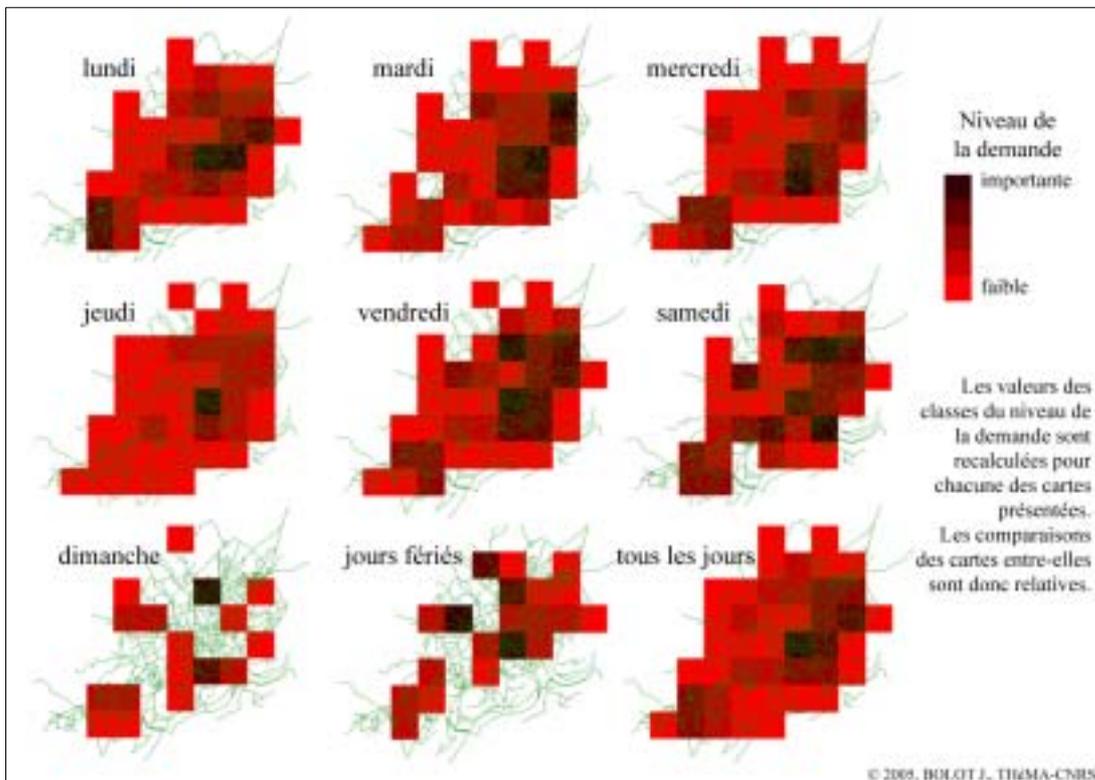


figure 64 : La répartition relative des points d'appels selon les jours de la semaine

Ainsi conçu et nourri en données, le module de requêtes spatio-temporelles, de calcul automatique et de visualisation est opérationnel pour répondre à des questions plus spécifiques concernant la prévision de la demande.

1.3 Prévision de la demande

Les informations issues d'Evolis-gare sont pour l'instant insuffisamment nombreuses pour assurer la validité statistique de la prévision. Outre les grèves, la permanence assurée ou non de publicité, les vacances scolaires, la qualité du service rendu par les

artisans-taxi sont autant de paramètres qui perturbent le calendrier d'observation permettant de caler le modèle de prévision.

Analyse du passé pour prévoir le futur

L'approche que nous présentons consiste à effectuer dans un premier temps une prévision globale de la demande à l'échelle de la ville puis de ventiler le résultat obtenu sur les cellules de la grille spatiale.

L'analyse d'une série chronologique nécessite de séparer les événements réguliers (cycliques ou en tendance) des événements ponctuels (aléas, accidents). Une analyse des journées au fil du temps permet d'isoler les fluctuations saisonnières et de les éliminer au besoin. De même, les accidents dus par exemple aux mouvements sociaux ou d'autres causes erratiques constituent des éléments qui perturbent la démarche de prévision. Pour être plus complet dans cette approche, il faudrait ajouter à notre calendrier les périodes de grèves ou de défaillances de la société de taxis qui jouent sur la fréquentation du service. Ces journées pourraient ainsi être soustraites à la base de données.

L'art de la prévision repose en grande partie sur le poids relatif que l'on accorde aux différents termes de la séquence considérée [Coutrot, 1990]. La figure 65, par exemple, montre que la même base factuelle peut donner lieu à trois scénarios différents (P0, P1, P2) selon la façon dont on modélise l'observation.

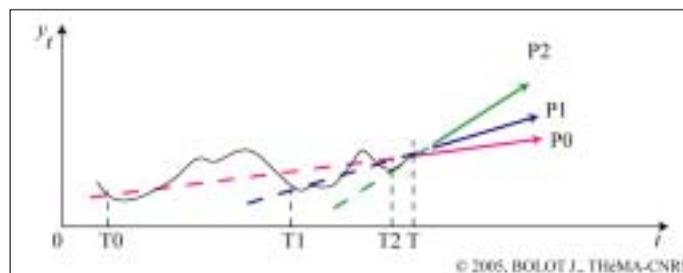


figure 65 : Prolonger une série temporelle, l'embarras des choix

La prévision P0 est conforme à la tendance générale de la série temporelle dont on a réalisé l'ajustement statistique d'ordre 1. La prévision P2, réduit le pas de temps au proche passé dont elle confirme la dynamique tandis que la prévision P1 constitue un moyen terme. Or, d'un point de vue opérationnel, les trois hypothèses peuvent mériter attention pour prendre la bonne option. Une analyse critique de la série doit donc être faite au regard de l'objectif poursuivi.

Ainsi, pour déterminer la demande sur une journée quelconque, nous prendrons en compte les demandes observées des journées dont les caractéristiques sont identiques (jour de semaine, période de vacances...). Le principe retenu consiste à calculer la moyenne de toutes les observations passées concernées et de comparer cette moyenne à la demande réelle observée durant la journée de référence. La longueur de la période d'observation des demandes effectuées par le passé est paramétrable (figure 66).

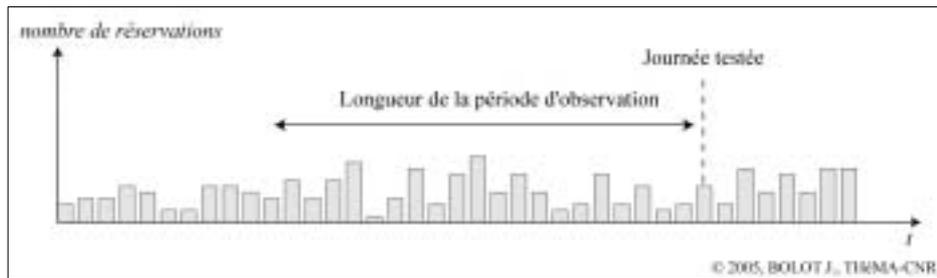


figure 66 : Regarder le passé pour construire une prévision

Pour procéder à cette opération, nous mobilisons une fois encore les données spatio-temporelles relatives aux usagers telles qu'elles sont disponibles dans le logiciel TAD-I. La boîte à outil dédiée au calcul temporel présentée page 139 est assortie ici de nouvelles options (figure 67).

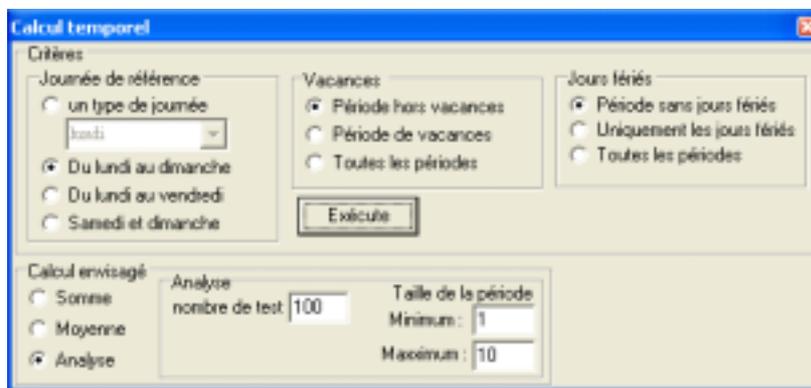


figure 67 : Fenêtre du calcul temporel en vue d'évaluer la pertinence de l'analyse du passé

La fenêtre **analyse** sert à définir la période prise en compte et le nombre de tests à effectuer, sachant que leur nombre doit être satisfaisant pour assurer la validité de l'opération. Ces deux paramètres sont définis par l'utilisateur. Pour chaque test, le système tire au sort avec remise une journée dont les caractéristiques correspondent aux critères sélectionnés (jour de semaine, période de vacances...). Pour chaque journée testée, le système effectue le calcul en prenant en compte toutes les journées

précédentes qui obéissent aux critères définis préalablement. En sortie, le système génère un fichier dont la structure est donnée par le tableau 9.

| Demande réelle de la journée | Nombre de réservations issues de la prévision s'appuyant sur une période temporelle dont la longueur varie de 1 à 10 semaines | | | | | | | | | |
|------------------------------|---|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|-------------|
| | 1 semaine | 2 semaines | 3 semaines | 4 semaines | 5 semaines | 6 semaines | 7 semaines | 8 semaines | 9 semaines | 10 semaines |
| 10 | 6 | 9 | 10 | 16 | 14 | 14 | 13 | 13 | 12 | 12 |
| 14 | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 11 | 11 | 10 | 11 |
| 10 | 7 | 8 | 8 | 8 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 9 |
| 8 | 10 | 8 | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| 11 | 12 | 12 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| 8 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 5 | 5 | 7 | 7 | 7 |
| 13 | 16 | 13 | 12 | 12 | 12 | 12 | 11 | 12 | 11 | 12 |
| 16 | 12 | 10 | 11 | 10 | 10 | 10 | 10 | 9 | 10 | 9 |
| 8 | 5 | 5 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 6 | 6 |
| 7 | 12 | 12 | 9 | 9 | 9 | 10 | 10 | 9 | 8 | 8 |
| 5 | 0 | 8 | 6 | 6 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 | 5 |
| 6 | 0 | 0 | 10 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| 7 | 11 | 11 | 11 | 12 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 | 11 |
| 10 | 0 | 0 | 7 | 12 | 12 | 10 | 11 | 10 | 10 | 10 |
| 6 | 9 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |

tableau 9 : Extrait d'un calcul de la moyenne des réservations des journées du passé

Chaque ligne du tableau correspond à une journée de test. La première colonne correspond à la demande observée sur la journée de référence. Ensuite, chacune des colonnes suivantes indique la prévision calculée à partir de la moyenne des journées du passé répondant aux mêmes critères temporels. Par exemple la valeur 10 de la première ligne indique qu'il y exactement 10 personnes qui ont pris le service Evolis-Gare ce lundi matin là. En se basant sur la fréquentation de la semaine précédente, la prévision indique une fréquentation de 6 personnes. En se basant sur les 2 semaines précédentes, la prévision indique une fréquentation de 9 personnes, etc.

Ces prévisions donnent des résultats probants (tableau 10). En effet, en sommant chaque colonne du tableau précédemment calculé et en comparant les valeurs théoriques ainsi obtenues à la demande réellement observée, on constate une forte convergence. Cependant, on peut noter que la prévision est généralement en dessous de l'observation mais l'écart se réduit avec l'allongement de la période d'observation.

| Demandes réelles cumulées | Nombre de semaines prises en compte pour calculer la demande prévisionnelle | | | | | | | | | |
|---------------------------|---|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
| 927 | 687 | 738 | 823 | 863 | 853 | 864 | 862 | 858 | 848 | 850 |
| 100 % | 74 % | 80 % | 89 % | 93 % | 92 % | 93 % | 93 % | 93 % | 91 % | 92 % |

tableau 10 : Niveau de prévision

Ces résultats tels qu'ils se présentent sont, rappelons-le, une valeur globale. En effet, lorsque l'observation est faite ligne par ligne, dans l'extrait présenté au tableau 9, ils sont nettement moins bons, leur qualité globale en masque les écarts locaux.

Le tableau 9 peut être représenté sous forme graphique. A titre d'exemple, la figure 68 montre le résultat que l'on obtient en traitant la colonne des 10 semaines d'observation.

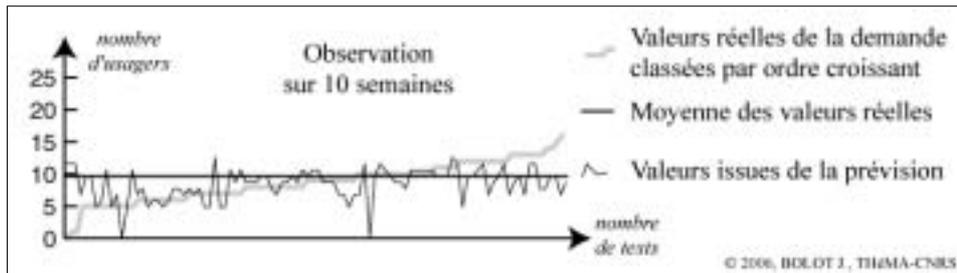


figure 68 : Les prévisions sont plus proches des valeurs réelles que de leur moyenne

Tout d'abord, deux courbes caractérisent la demande réelle. La première concerne les valeurs réelles de la demande de chacune des journées testées et la seconde la moyenne de ces valeurs. Dans le cas de l'exemple ci-dessus, le nombre de réservations pour le lundi oscille entre 0 et 15 avec une moyenne de 10 réservations.

La figure 69 présente les graphiques correspondant aux 10 calculs générés pour chacune des périodes d'observation. Les premières courbes de prévision ne se montrent guère satisfaisantes tandis que les dernières le sont davantage montrant bien l'intérêt d'un allongement de l'observation.

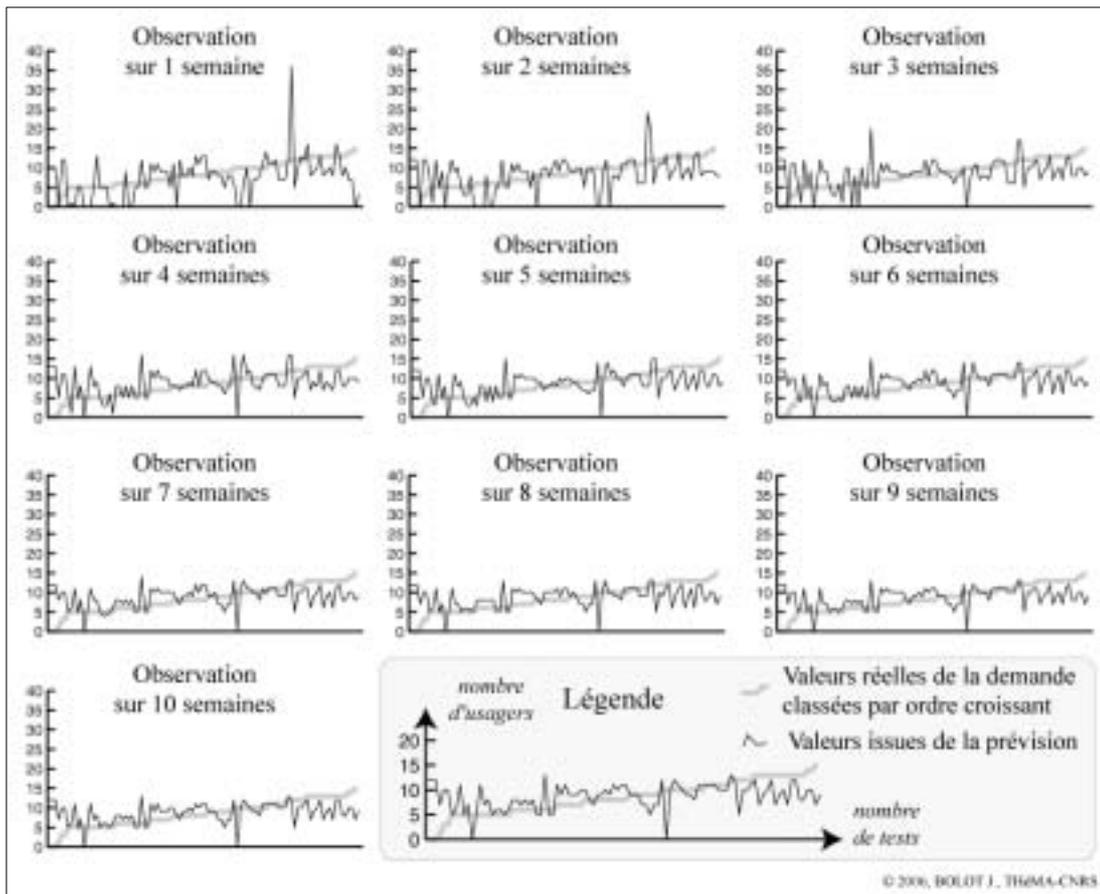


figure 69 : Comparaison entre demandes calculées et demandes réelles

Au vu de ce constat, nous avons poursuivi nos calculs en portant la période d'observation à vingt semaines et en produisant les 10 graphiques correspondants (figure 70) de manière à vérifier si les résultats continuent à s'améliorer.

Ainsi, voit-on que des aspérités des prévisions issues de très courtes périodes d'observation sont peu à peu lissées par atténuation des effets dus aux perturbations inopinées de fonctionnement. De la sorte, la prévision garde sa qualité en épousant au mieux l'observation même si quelques dysfonctions peuvent survenir lorsque la journée modélisée s'avère être un cas d'exception, impossible à intégrer par définition.

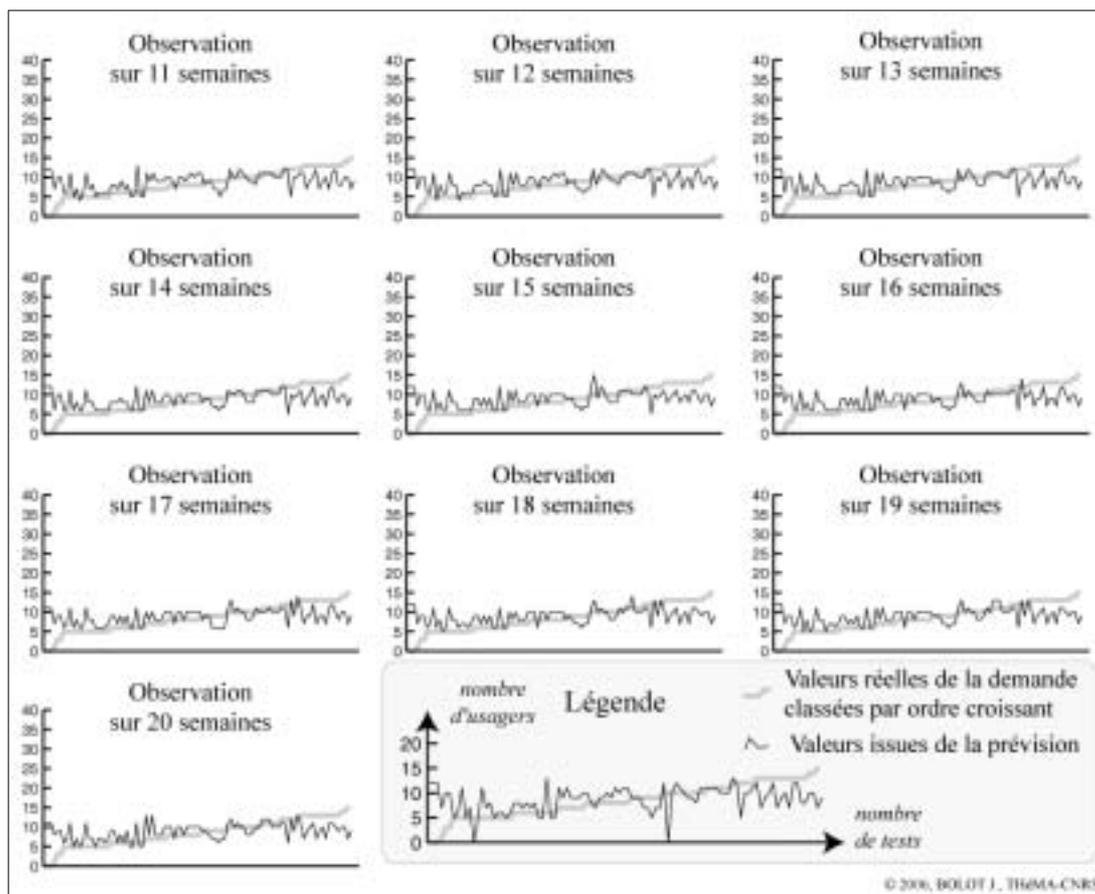


figure 70 : Le lissage de la prévision s'accroît avec la longueur de la période d'observation

Le tableau 11 présente l'application de la méthode sur chacun des jours de la semaine. Les valeurs présentées proviennent d'une série de 100 calculs portant sur chaque jour de la semaine hors des vacances et hors jours fériés.

Les valeurs observées et les valeurs calculées retrouvent la convergence déjà constatée avec la figure 58 de la page 135, montrant bien la cohérence de notre approche dans ses résultats.

| | lundi | mardi | mercredi | jeudi | vendredi | samedi | dimanche |
|------------------------------------|-------|-------|----------|-------|----------|--------|----------|
| Valeurs observées (moyenne) | 9,25 | 8,22 | 4,19 | 6,46 | 4,67 | 4,21 | 0,72 |
| Valeurs calculées (moyenne) | 8,87 | 7,94 | 4,62 | 6,47 | 4,6 | 4,38 | 0,65 |
| Min (moyenne) | 6,14 | 5,5 | 2,68 | 3,66 | 2,51 | 2,23 | 0,11 |
| Max (moyenne) | 10,89 | 10,17 | 5,99 | 8,73 | 7,52 | 5,93 | 0,98 |

tableau 11 : Valeurs observées et valeurs calculées pour chaque jour de la semaine

Voyons maintenant comment passer de la prévision globale à la prévision localisée nécessaire pour répondre au cahier des charges qui s'impose à notre système de TAD.

Spatialiser les résultats issus de la prévision

Pour réaliser cette opération, il convient de revenir à la distribution spatiale de la demande telle qu'elle a été précédemment détaillée par une collection de cartes de densités. Partons d'un exemple illustré par la figure 71. Chacune des trente huit cellules qu'elle comporte est marquée par un chiffre qui donne, en %, la part qu'elle prend dans la demande globale.

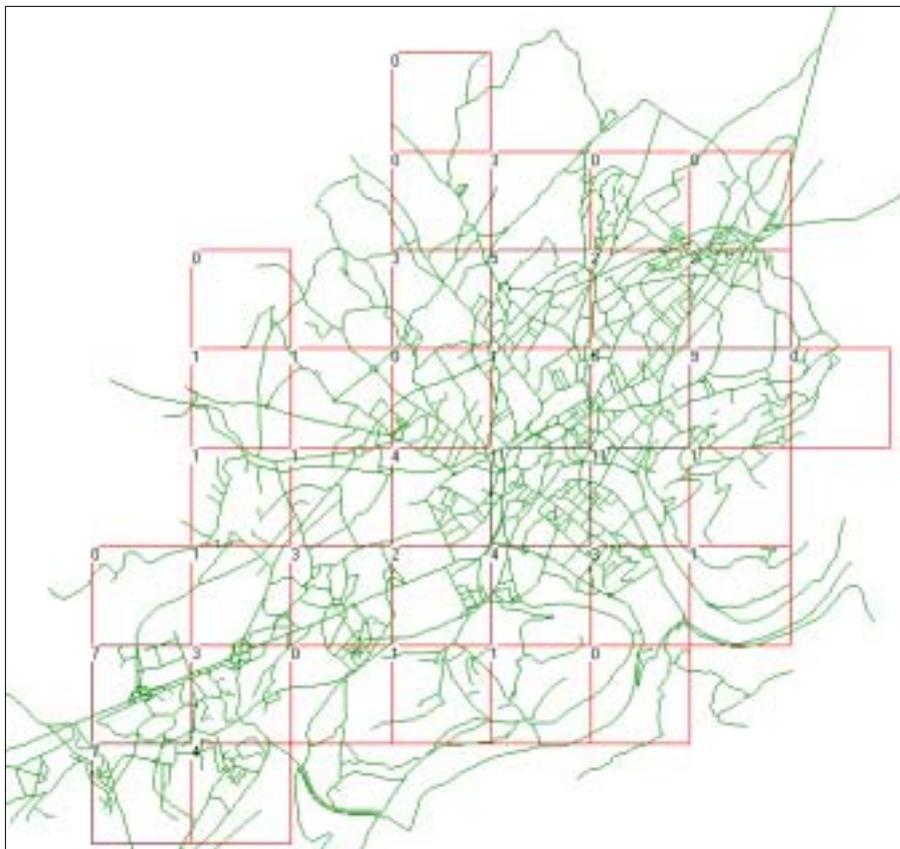


figure 71 : La part des usagers de chaque cellule pour un lundi normal

Lorsqu'il s'agit d'effectuer une répartition automatique, la méthode est simple. Elle met en oeuvre un modèle de probabilité empirique de répartition. Il suffit de répartir les demandes à satisfaire au prorata du pourcentage de chaque cellule.

Le tableau 12 permet de résumer la procédure. Chaque ligne se réfère à une cellule de carroyage grâce à un numéro d'identification. La première colonne donne la valeur de probabilité obtenue du modèle exprimée, en pourcentage. La seconde colonne simule le résultat que l'on obtiendrait avec 13 demandes à ventiler.

| N° de la cellule | Probabilité (en %) | Résultats de la répartition | N° de la cellule | Probabilité (en %) | Résultats de la répartition | N° de la cellule | Probabilité (en %) | Résultats de la répartition |
|------------------|--------------------|-----------------------------|------------------|--------------------|-----------------------------|------------------|--------------------|-----------------------------|
| 1 | 0,114 | 0,01482 | 14 | 0,686 | 0,08918 | 27 | 2,403 | 0,31239 |
| 2 | 0,114 | 0,01482 | 15 | 5,084 | 0,66092 | 28 | 4,462 | 0,58006 |
| 3 | 2,860 | 0,3718 | 16 | 8,696 | 1,13048 | 29 | 3,099 | 0,40287 |
| 4 | 0,458 | 0,05954 | 17 | 0,458 | 0,05954 | 30 | 1,259 | 0,16367 |
| 5 | 0,343 | 0,04459 | 18 | 1,259 | 0,16367 | 31 | 7,323 | 0,95199 |
| 6 | 0,114 | 0,01482 | 19 | 1,030 | 0,1339 | 32 | 2,632 | 0,34216 |
| 7 | 3,318 | 0,43134 | 20 | 4,348 | 0,56524 | 33 | 0,229 | 0,02977 |
| 8 | 5,149 | 0,66937 | 21 | 10,526 | 1,36838 | 34 | 0,686 | 0,08918 |
| 9 | 2,059 | 0,26767 | 22 | 10,870 | 1,4131 | 35 | 0,686 | 0,08918 |
| 10 | 2,288 | 0,29744 | 23 | 0,686 | 0,08918 | 36 | 0,343 | 0,04459 |
| 11 | 0,686 | 0,8918 | 24 | 0,114 | 0,01482 | 37 | 7,208 | 0,93704 |
| 12 | 1,144 | 0,14872 | 25 | 0,572 | 0,07436 | 38 | 3,776 | 0,49088 |
| 13 | 0,458 | 0,05954 | 26 | 2,517 | 0,32721 | | | |

tableau 12 : Répartition automatique de 13 usagers issus de la prévision dans les 38 cellules

Il reste ensuite à exprimer ces chiffres en valeurs entières approchées pour simuler la prévision. Plusieurs méthodes peuvent être proposées à cette fin.

La première consiste à affecter les demandes aux cellules classées par ordre décroissant jusqu'à ce que tous les usagers soient répartis (tableau 13).

| N° de la cellule | % d'usagers | Résultats de la répartition | | N° de la cellule | % d'usagers | Résultats de la répartition | | N° de la cellule | % d'usagers | Résultats de la répartition | |
|------------------|-------------|-----------------------------|----|------------------|-------------|-----------------------------|----|------------------|-------------|-----------------------------|----|
| | | R1 | R2 | | | R1 | R2 | | | R1 | R2 |
| 22 | 10,87 | 1 | 2 | 32 | 2,632 | 0 | 0 | 35 | 0,686 | 0 | 0 |
| 21 | 10,526 | 1 | 2 | 26 | 2,517 | 0 | 0 | 25 | 0,572 | 0 | 0 |
| 16 | 8,696 | 1 | 2 | 27 | 2,403 | 0 | 0 | 4 | 0,458 | 0 | 0 |
| 31 | 7,323 | 1 | 1 | 10 | 2,288 | 0 | 0 | 13 | 0,458 | 0 | 0 |
| 37 | 7,208 | 1 | 1 | 9 | 2,059 | 0 | 0 | 17 | 0,458 | 0 | 0 |
| 8 | 5,149 | 1 | 1 | 18 | 1,259 | 0 | 0 | 5 | 0,343 | 0 | 0 |
| 15 | 5,084 | 1 | 1 | 30 | 1,259 | 0 | 0 | 36 | 0,343 | 0 | 0 |
| 28 | 4,462 | 1 | 1 | 12 | 1,144 | 0 | 0 | 33 | 0,229 | 0 | 0 |
| 20 | 4,348 | 1 | 1 | 19 | 1,03 | 0 | 0 | 1 | 0,114 | 0 | 0 |
| 38 | 3,776 | 1 | 1 | 11 | 0,686 | 0 | 0 | 2 | 0,114 | 0 | 0 |
| 7 | 3,318 | 1 | 0 | 14 | 0,686 | 0 | 0 | 6 | 0,114 | 0 | 0 |
| 29 | 3,099 | 1 | 0 | 23 | 0,686 | 0 | 0 | 24 | 0,114 | 0 | 0 |
| 3 | 2,86 | 1 | 0 | 34 | 0,686 | 0 | 0 | | | | |

tableau 13 : Répartitions des stock en distribuant d'abord les cellules les plus importantes

Afin de moduler les résultats, une première règle (R1) peut être appliquée. Elle consiste à ce que ma demande affectée à une cellule ne dépasse jamais la valeur issue de la probabilité. Ainsi, en appliquant cette règle, pour une affectation d'une cellule autorisée de 2,46 demandes nous affectons 2 usagers à cette cellule. Une autre règle (R2) possible consiste à affecter la demande de manière à ce que le nombre d'usagers des cellules soit au moins égal à ce que la probabilité affecte à la cellule.

Ainsi, en appliquant cette règle, 3 usagers sont affectés à la cellule qui bénéficie d'une probabilité de 2,46 demandes. Ces méthodes de répartition sont conformes à la distribution de probabilité mais elle renforce encore le poids des cellules qui concentrent la demande et laisse de côté les cellules les moins demandées.

Une pondération aléatoire peut permettre de corriger cet inconvénient tout en respectant l'effet de taille qui différencie les probabilités affectées à chaque cellule.

A cette fin, on commence par construire une règle graduée de 1 à 100 le long de laquelle on numérote bout à bout 38 intervalles dont la longueur est proportionnelle à la valeur de probabilités définie par le modèle pour la cellule spatiale correspondante (figure 72). La règle ainsi construite va nous servir de base pour ventiler les 13 demandes sur les 38 unités de carroyage. Pour cela, on procède par tirage aléatoire d'un nombre réel entre 0 et 100 qui va donner une position précise le long de la règle. Cette position permettra d'affecter la demande à la cellule spatiale identifiant le segment de probabilité positionné à cet endroit sur la règle. Par exemple, si le nombre réel 45,759 est tiré, la cellule 21 sera de ce fait sélectionnée et un usager lui sera affecté.

Cette méthode, on le voit, présente l'avantage de respecter la distribution différenciée des probabilités entre les cellules tout en laissant une chance de tirage pour celle qui font l'objet d'une faible demande. Nous empruntons cette méthode de tirage au sort à la théorie de l'évolution [Holland, 1965 ; Goldberg, 1994] qui, pour simplifier, reconnaît une chance de survie meilleure aux individus les plus forts au détriment des plus faibles.

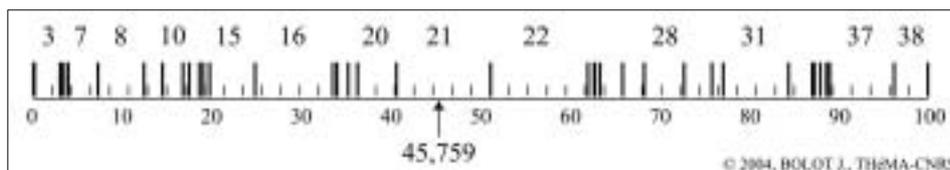


figure 72 : Un tirage au sort respectant les proportions affectées aux cellules

L'application de cette méthode aux données de prévision préalablement calculées permet la construction de la carte de la demande prévisionnelle. Cette opération, intégrée dans l'outil TAD-I, génère un fichier de points dont chacun d'eux est rattaché à une station de bus choisie au hasard parmi celles qui sont à l'intérieur de chaque cellule. La figure 73 montre plusieurs résultats issus de la simulation d'un

lundi hors vacances et hors fériés. La gare SNCF est identifiée par un carré tandis que les points correspondent aux demandes potentielles.

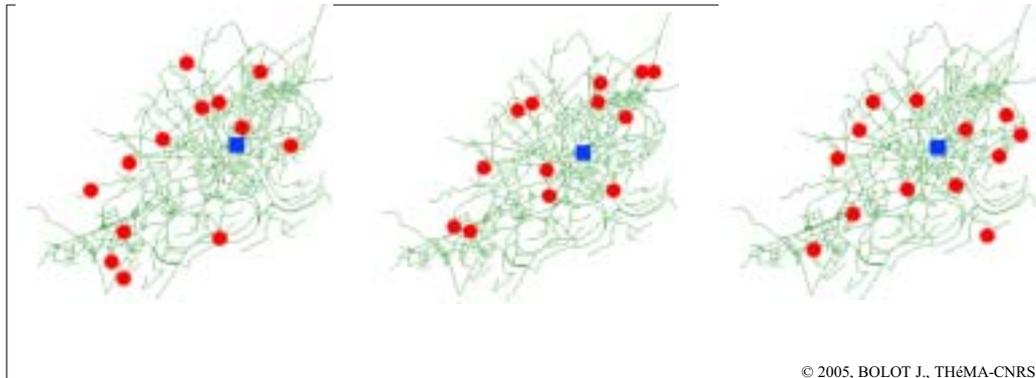


figure 73 : Des usagers prévisionnels à acheminer en gare TGV

La localisation de ces demandes respecte dans son ensemble la répartition calculée à partir de la fréquentation observée des lundis similaires à celui testé (mêmes caractéristiques au niveau du calendrier). La présence ou non d'usagers dans les zones périphériques a une incidence sur la capacité de regroupement du système. L'opérateur pourra à cette fin ne pas prendre en compte un résultat qui écarterait le positionnement de véhicules d'un endroit stratégique, ce qui est peu probable mais possible.

Même si le test effectué reste encore bien loin d'une simulation en vraie grandeur, il conduit à un premier calibrage des contraintes imposées pour prévoir la demande. Malgré le caractère très partiel des résultats obtenus, ils permettent tout de même d'entrevoir assez clairement comment des solutions opérationnelles pourraient se mettre en place.

2 L'élaboration de trajets provisoires par des algorithmes génétiques

Dans le déroulement de la procédure, la phase que nous abordons maintenant constitue encore une opération préparatoire au fonctionnement du service. Elle a pour but de proposer des tournées virtuelles bâties à partir du potentiel de demande précédemment établi. Ces tournées permettent au transporteur de dimensionner et positionner au mieux sa flotte de véhicule avant même que la demande réelle ne se manifeste. La construction de ces tournées repose sur l'utilisation d'algorithmes génétiques qui ont été mis au point comme issue expérimentale à la théorie de l'évolution naturelle des espèces.

2.1 Les tournées temporaires du transport à la demande

Les tournées virtuelles sont amenées à se réaliser dès lors que le premier usager est pris en charge. Les itinéraires évoluent selon les appels et les tournées se modifient par ajustement entre la demande prévue et la demande réelle. La construction d'une tournée se réalise en fonction de nombreux critères et pour une même demande, plusieurs itinéraires peuvent être envisagés. Il faut donc les trier et les évaluer tous avant de retenir celui qui est le plus adapté.

L'évaluation des tournées de transport à la demande

Dans le cas d'Evolis-Gare, les critères d'évaluation des tournées sont d'ordre strictement économique. Ils portent sur le coût du service négocié entre le gestionnaire et les chauffeurs de taxi, devenus prestataires de service public à cette occasion. Le coût, défini par l'équation ci-dessous, dépend d'un forfait initial par véhicule mobilisé (*coefficient2*) et d'une somme variable (*coefficient1*) elle-même dépendante de la distance (*d*) parcourue par chaque véhicule (*n*). La distance entre deux stations provient du calcul préalablement réalisé à cet effet. Nombre de véhicules et distances effectuées par chacun de ceux-ci sont les deux termes à considérer pour optimiser le fonctionnement économique du service.

$$\sum_i^n \text{coefficient1}(d_i - 4) + \text{coefficient2}$$

De la sorte, à partir de l'équation proposée, il est possible d'établir et de simuler le coût des diverses tournées possibles pour dégager la meilleure option de ce point de vue.

Les méthodes automatiques de construction de tournée

Les questions posées par la construction d'un cheminement optimisé ont été formalisées depuis longtemps. A l'époque du mathématicien Euler, au XVIII^e siècle, les sept ponts de la ville de Königsberg posaient un problème ardu aux érudits depuis que l'un d'eux s'est fixé le défi de visiter les sept ouvrages en traversant chacun d'eux, dans un ordre quelconque et sous la seule contrainte de ne jamais passer deux fois sur le même (figure 74-a). Le nombre limité de ponts en jeu permet de se rendre rapidement compte qu'il n'existe pas de solutions à cette situation. Aucune équation mathématique ne permet de résoudre ce problème sauf à utiliser la théorie des graphes.

Le problème du voyageur de commerce (figure 74-b) est un cas universel d'optimisation de tournées tel qu'on le retrouve avec le transport à la demande. Il s'agit d'un cas relativement simple impliquant un seul mobile passant par n villes. Chacune de celle-ci ne doit être visitée qu'une fois, le voyageur doit revenir à son point de départ en ayant accompli le plus court trajet possible.

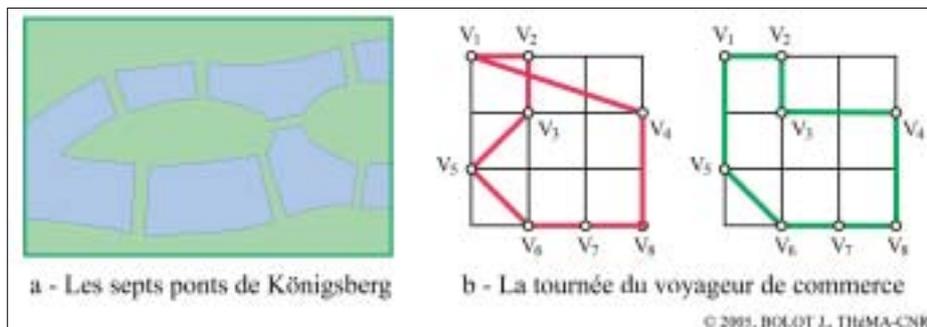


figure 74 : Deux problèmes de cheminement vieux comme les graphes

Malgré la simplicité apparente du problème, il n'y a pas de méthode absolue permettant de dégager à tout coup la meilleure option. Il est théoriquement possible de passer en revue tous les cas de figure puis de choisir ensuite le plus court trajet mais cette solution devient vite inopérante dès que les points de visite deviennent nombreux. Pour dix villes, il existe 3.628.800 solutions, pour vingt, environ $2,4 \cdot 10^{18}$ et pour cent, presque 10^{158} . C'est un exemple caractéristique des problèmes dits NP complets [Rennard, 2002]. De nombreux auteurs évoquent le terme de NP-difficile

[Finke, 2002] ce qui en langage courant signifie que la difficulté est extrême. Il est même stipulé « *qu'un algorithme rapide pour le problème du représentant de commerce a très peu de chances d'exister* » [Cormen et al., 2000]. Les auteurs proposent alors l'usage d'algorithmes d'approximation.

La construction de trajets pour un transport à la demande est évidemment beaucoup plus complexe qu'avec le voyageur de commerce. En effet, le nombre de combinaisons est encore démultiplié en raison du nombre de véhicules en circulation.

Dans ce contexte, un algorithme, reposant sur l'utilisation des plus courts chemins, fut élaboré par le LIFC, laboratoire partenaire du projet Evolis-Gare. D'autres méthodes peuvent être utilisées. L'une d'elle, basée sur « les arbres couvrants tentaculaires » est en cours de validation [Canalda et al., 2003, 2004]. De notre côté, nous proposons un recours aux algorithmes génétiques, une méthode capable d'explorer un nombre élevé de solutions à condition de pouvoir réduire le problème posé en quelques termes formels [Bolot et al, 1999]. De nombreux travaux³⁹ sont partis des algorithmes génétiques pour résoudre des problèmes liés au transport en général [Bielli et al, 2002, Baaj & Mahmassani, 1995], aux tournées de véhicules [Prins, 2001 ; Laporte, 1992] et au transport à la demande en particulier [Chevrier et al, 2006].

2.2 Les algorithmes génétiques pour construire les tournées du TAD

Les travaux de Ch. Darwin [1859 & 1992] et de ses prédécesseurs (Wallace, Lamarck, Buffon, Benoît de Maillet, Erasme Darwin) ont constitué une étape décisive non seulement dans les sciences de la nature, mais aussi dans la vie intellectuelle en général. L'idée que le vivant ne soit pas régi par des règles figées mais évolutives a révolutionné la pensée contemporaine. Tourmenté, par les remises en cause dues à sa découverte, Darwin évite même le terme d'évolution lui préférant systématiquement celui de descendance avec modification⁴⁰.

Le concept associé à ce même terme a inspiré John Holland [1975] de l'université du Michigan, le père des algorithmes génétiques. Reprenant les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique [Renders, 1995], ces algorithmes génèrent des populations fictives d'individus issus d'individus existants en tenant compte de facteurs contraignant mais aussi de facteurs d'adaptation comme l'échange

³⁹ <http://www.eeaax.polytechnique.fr/eeaax.html>

⁴⁰ « Descent with modification », « descent » est à entendre ici comme lignage, généalogie.

d'information (figure 75). Ainsi, « à chaque génération, un nouvel ensemble de créatures fictives est créé en utilisant des parties des meilleurs éléments de la génération précédente ; ainsi que des parties innovatrices, à l'occasion » [Goldberg, 1994].

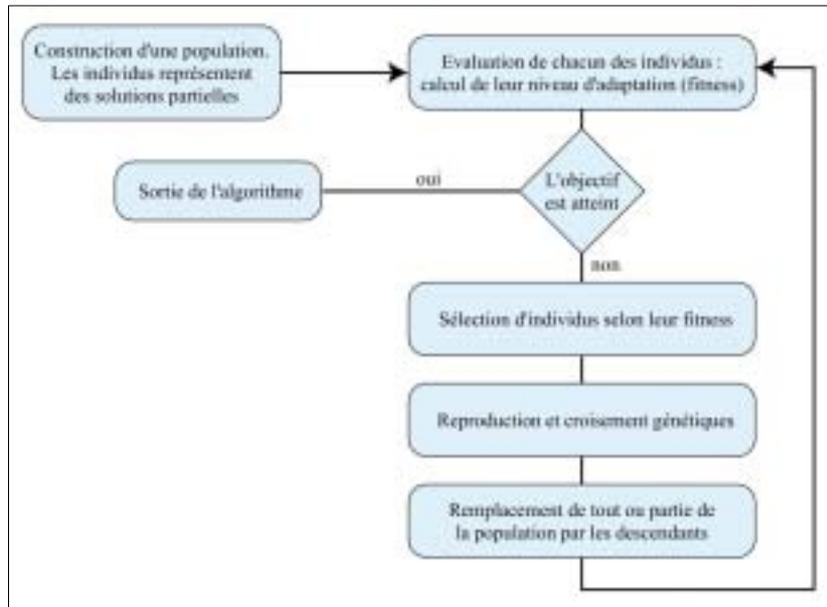


figure 75 : Fonctionnement d'un algorithme génétique

Pour réaliser ce projet, les trois principes de la théorie de l'évolution [sélection - reproduction - mutation] sont mis en oeuvre par les algorithmes génétiques qui s'appliquent à des populations initiales d'individus. Ensuite, le processus de sélection repère les individus les plus aptes à répondre aux contraintes fixées grâce à une évaluation qui attribue une note à chacun, note qui est d'autant plus élevée que les réponses sont positivement convergentes. Précisons aussi que le terme d'algorithme génétique n'est que métaphorique de manière à prévenir les malentendus.

L'individu est représenté et codé sous forme d'une chaîne ADN

Dans le domaine des algorithmes génétiques, l'individu représente l'élément ou la solution potentiellement recherchée. Les individus composant une population doivent nécessairement être codés par une structure génétique commune, « une chaîne de caractères d'alphabet et de longueur finis » [Goldberg, 1994].

Ce codage, appelé schème dans la terminologie spécifique constitue la principale difficulté du processus de mise en oeuvre. En reprenant l'exemple du voyageur de commerce (figure 74), il s'agit de coder les différents points de passage, ce qui peut

se faire par une simple liste dont l'ordre des points de la tournée respecte l'ordre des cellules du schème. La tournée du voyageur de commerce ainsi codée peut être représentée graphiquement et permet d'établir que la seconde solution est préférable à la première (figure 76).

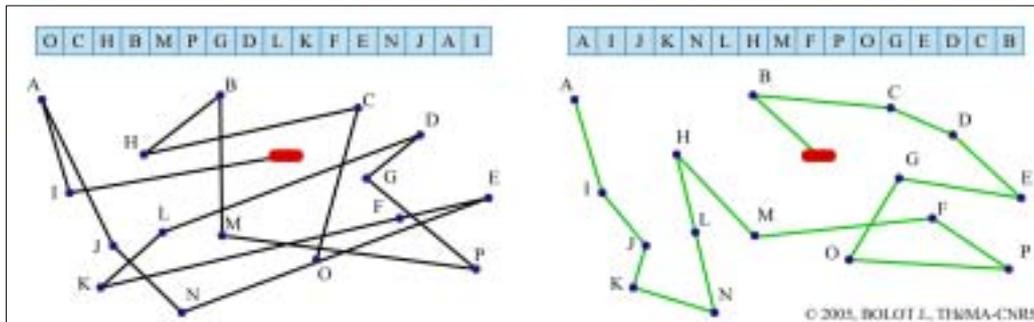


figure 76 : Deux exemples codés de tournées du voyageur de commerce

Cet exemple, formellement simple, permet d'illustrer le principe du codage génétique mais ne suffit pas pour appréhender la complexité du transport à la demande qui met en action plusieurs véhicules. Dans ce cas, le codage doit prendre en compte simultanément plusieurs véhicules tout en respectant leur ordre de passage aux différentes stations. Ces deux contraintes demandent de complexifier l'information introduite dans le schème et d'en revoir la structure. Le véhicule utilisé pour prendre en charge un usager est alors inscrit dans le code. L'exemple de la figure 77 est construit autour de quatre véhicules se répartissant les seize usagers et l'ordre de prise en charge correspond, ici encore, à l'ordre des cellules. L'utilisation de la fonction d'évaluation (page 151) permet d'attribuer une valeur à cette proposition de tournée, en l'occurrence le coût du service [Bolot, 2001a].

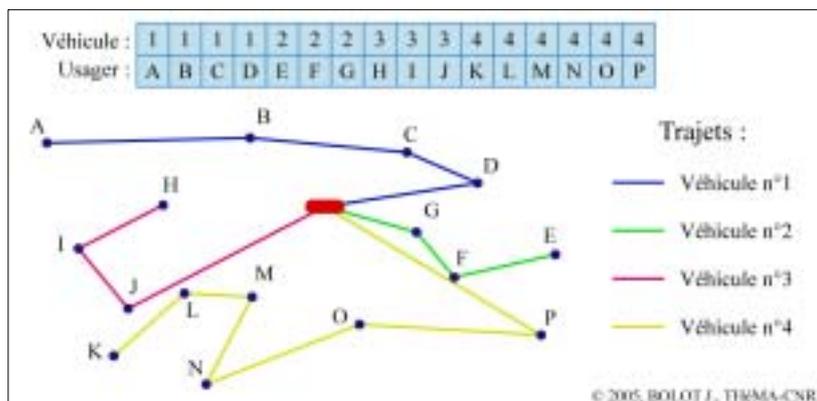


figure 77 : Représentation du codage d'une tournée de transport à la demande

Une fois les règles du codage établi, il devient nécessaire de créer la population initiale d'individus, faite ici d'une série de proposition de tournées. Cette étape peut s'appuyer sur des méthodes les plus diverses (aléatoires, statistiques, réfléchies...).

La sélection naturelle

La sélection naturelle tend à maintenir les êtres les mieux adaptés à leur environnement au détriment des autres. Dans le monde réel, cette adaptabilité se manifeste par d'innombrables caractéristiques telles que la force, la vitesse, la taille, l'intelligence...

Les règles de sélection concernent également le droit à donner la vie car dans le monde animal, la reproduction est souvent autorisée aux seuls mâles dominants, les plus à même d'engendrer une lignée robuste... Ces considérations nourrissent d'autres débats que l'on peut laisser ici facilement de côté. En effet, le monde du transport est heureusement moins féroce mais en vue d'améliorer l'offre, il importe tout de même de préférer les bonnes solutions aux mauvaises ! L'évaluation économique d'une tournée permet d'en chiffrer précisément le coût et dans le contexte qui nous intéresse notre position de principe veut que la solution la moins chère soit la meilleure à condition que les exigences opérationnelles du système soient satisfaites. Ce choix abrupt dépend strictement de la fonction d'évaluation qui fait converger les caractéristiques des « individus-tournées » les mieux adaptés...

Le principe de favoriser les meilleurs éléments pour la reproduction tend à générer des individus dont la qualité globale s'améliore au fil des générations en faisant l'hypothèse que le jeu des contraintes reste globalement stable. Dans le cas des algorithmes génétiques, la tendance à l'amélioration de la population considérée comporte une part de hasard puisque la chance d'un individu de faire partie des heureux reproducteurs est proportionnelle au score qui lui est attribué par l'évaluation. Dans notre cas, il convient d'attribuer par une fonction inverse un score élevé au service peu coûteux et un score faible au service cher. La fonction d'évaluation devient pour l'occasion :

$$\frac{1}{\sum_i^n C1(d_i - C2) + C3} \quad \begin{array}{l} \text{Avec } C1 = 0,72 \text{ euros} \\ C2 = 4 \text{ km} \\ C3 = 6,25 \text{ euros} \end{array}$$

En imaginant, une population de sept individus dont chacun des membres est évalué, on voit l'intérêt du tirage au sort aléatoire pondéré qui offre une meilleure chance de reproduction aux meilleurs éléments tout en minimisant les possibilités de reproduction pour les moins bons individus mais sans les éliminer complètement. L'utilisation d'une roue de la fortune permet statistiquement d'assurer une sélection strictement proportionnelle au score de chaque individu (figure 78). On notera ici la convergence de méthode avec celle qui a été présentée page 149.

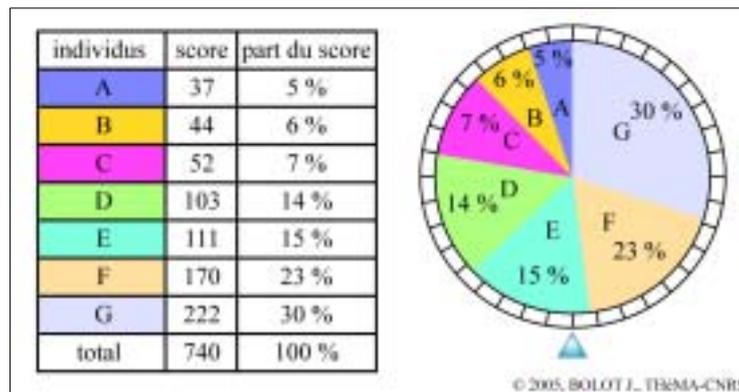


figure 78 : La sélection naturelle, les plus forts ont toujours plus de chances de gagner

Croisements et mutations

Les croisements permettent de recombinaison les différents gènes présents dans la population et de former ainsi de nouveaux chromosomes. Cette simple combinatoire est limitée par le matériel génétique originel, or rien ne dit que celui-ci contienne la solution recherchée. Un opérateur de mutation est alors utilisé dans le but de permettre le renouvellement avec l'apparition de structures génétiques absentes des stocks de départ [Rennard, 2002].

En règle générale, les algorithmes génétiques se conformant au schéma naturel ont besoin de deux parents pour engendrer au moins un enfant dont les caractéristiques sont déterminées par l'appariement des gènes parentaux. Dans notre cas, nous retiendrons le terme de croisement (figure 79) pour désigner cette opération ; ce qui nous évite d'aller trop loin dans la métaphore.

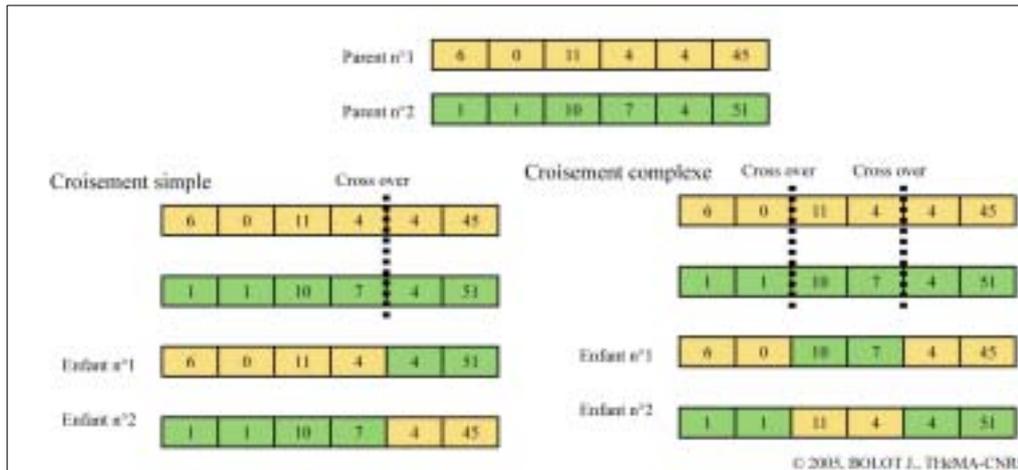


figure 79 : La production d'individus par croisement d'une partie des gènes

De nombreuses variantes enrichissent la procédure du croisement. Tout d'abord, la position du découpage des segments du code peut être décidée aléatoirement. Il est également possible de décider au dernier instant si un chromosome doit être échangé.

La mutation d'un individu s'opère simplement. Un parent sélectionné voit un ou plusieurs de ses chromosomes changer d'état (figure 80).

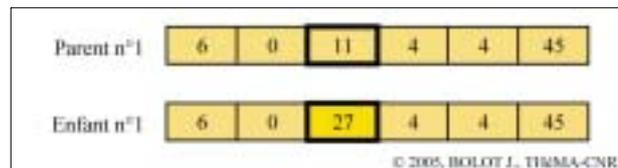


figure 80 : Mutation d'un individu

L'application de ces méthodes à la construction des tournées du transport présente un écueil majeur car l'ensemble des tournées doit obligatoirement prendre en charge tous les usagers, c'est à dire passer par toutes les stations, et chacun d'eux ne peut être pris en charge deux fois. Or les opérations de croisement et de mutation décrites précédemment peuvent générer des individus anormaux dont la représentation en tournée réaliste est impossible [Bolot, 2001a].

Cette particularité est également valable dans le cas du voyageur de commerce et n'est donc pas dépendante du codage à deux niveaux des individus du transport à la demande. L'exemple présenté par la figure 81 illustre ce propos. Les deux enfants générés ne constituent pas une solution viable car pour le premier, les stations [O, C, B, G, D] sont visitées deux fois au détriment des stations [A, F, I, J, N] qui sont exclues de la tournée tandis que le second passe deux fois en [A, F, I, J, N] et oublie de passer en [O, C, B, G, D].

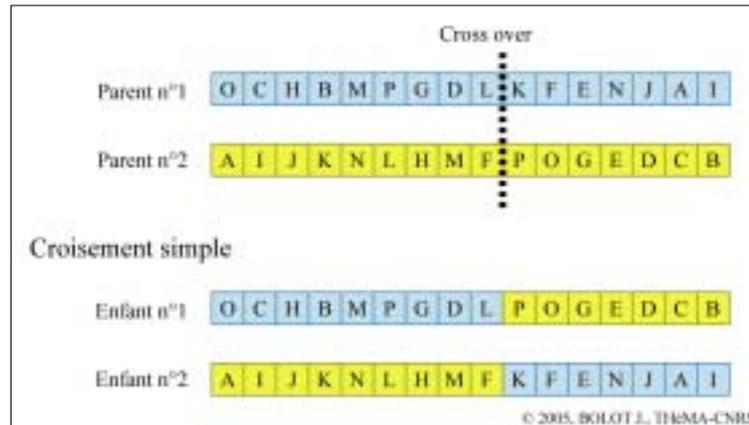


figure 81 : La méthode du croisement est-elle incompatible avec les tournées du TAD ?

Pour résoudre ce type de problème posé par la génération d'individus anormaux, de nombreuses solutions ont déjà été proposées par des développeurs d'algorithmes génétiques [Holland, 1975 ; Goldberg, 1994].

L'une d'elles consiste à n'utiliser qu'un seul parent et à opérer une inversion sur une partie du chromosome. Par exemple, ABC/DEF peut donner DEFABC ou encore AB/CD/EF peut donner CDEFAB. Les possibilités restent nombreuses mais cette méthode introduit un biais important dans la mesure où la reproduction est monoparentale [Rennard, 2002]. L'utilisation de l'opérateur de mutation permet de diversifier l'issue de la reproduction et donc de lever, en partie, cet inconvénient. Au final, ces opérations peuvent arriver à modifier l'ordre de prise en charge des stations pour un véhicule, ou encore à transférer une station d'un véhicule vers un autre. Ce transfert d'affectation peut conduire à enlever du circuit les véhicules qui se trouvent ainsi libérés.

D'autres solutions permettent de combiner deux parents [Goldberg & Lingle, 1985] mais nécessitent de recomposer virtuellement les parents avant le croisement et annulent, de fait, l'intérêt de la sélection naturelle puisque le code génétique modifié ne correspond plus au code génétique tiré au sort en fonction de son évaluation.

Le cas du transport à la demande et de son codage spécifique peut se compléter du mécanisme d'auto-reproduction présenté ci-après (figure 82). Celui-ci montre la modification apportée au trajet du véhicule n°1 après le croisement effectué sur un parent. Par chance, cette opération apporte un bénéfice à la tournée mais dans bien des cas une opération génétique peut diminuer l'intérêt d'une tournée. Il est donc nécessaire de procéder à un grand nombre d'itérations pour obtenir une nette amélioration des individus-tournées.

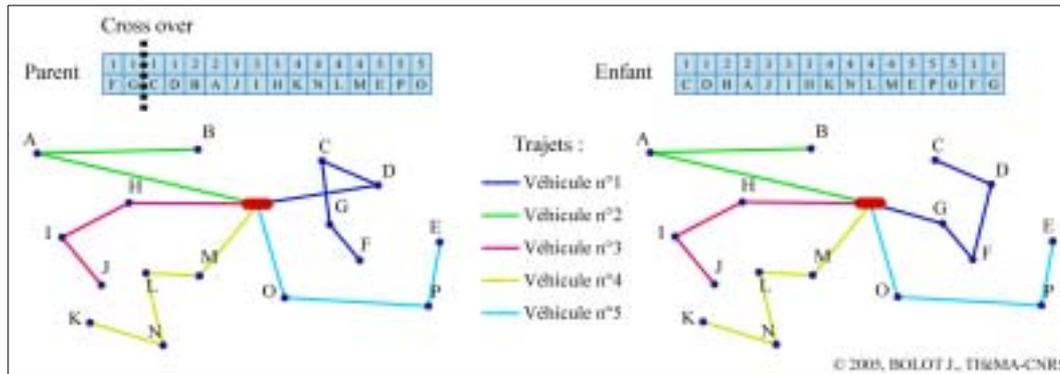


figure 82 : La reproduction par croisement d'une tournée de TAD

Le processus général des algorithmes génétiques étant maintenant décrit, nous pouvons l'implémenter au cœur de la plate forme de simulation.

2.3 Implémentation des algorithmes génétiques au sein de TAD-I

La construction des trajets permet au transporteur de mieux gérer son parc de véhicules en terme de volume et de positionnement. Le calcul de potentiel établi précédemment par la prévision conduit à définir des points de passage requis pour répondre à une demande virtuellement construite mais proche d'une réalité observée.

Construction de la première population

Après le chargement des informations obtenues par le calcul du potentiel, une première génération de 1000 individus constituant la population initiale est créée. Chaque tournée est élaborée selon les heuristiques « gloutonnes » [Sakarovitch, 1984 ; Cormen, 2000]. Ces heuristiques sont très simples à mettre en œuvre et vont permettre d'obtenir rapidement un nombre suffisant d'individus afin de constituer la première génération. Le point de départ d'un itinéraire peut être choisi aléatoirement parmi la liste des stations ou de manière plus réfléchie et correspondre à la station la plus éloignée de la gare, par exemple. Ensuite, les raccordements entre les stations sont construits soit de proche en proche, par un processus raisonné, soit de manière aléatoire. Une station affectée à un véhicule est retirée de la liste des attentes condamnant le dernier véhicule encore en liste à ne desservir que les stations restantes. Cette technique peut générer des itinéraires de qualité très variable ce qui répond à l'objectif de cette première étape qui consiste à obtenir la plus grande diversité de situations afin d'élargir au maximum les pistes d'exploration dans la recherche de bonnes solutions.

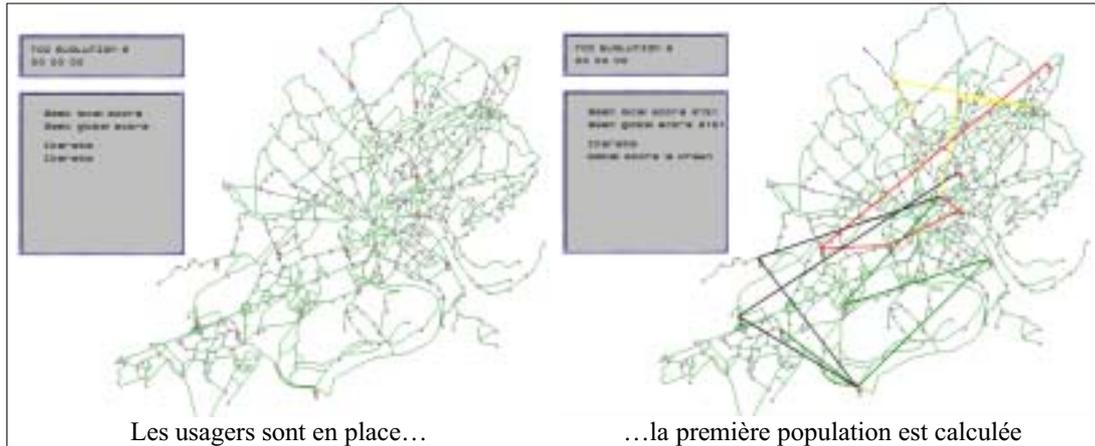


figure 83 : La population initiale offre des premières solutions qui doivent être améliorées

Dans la phase actuelle du service tel que nous le calibrons, nous continuons à utiliser des véhicules légers dont la capacité est de quatre ou cinq places. Cette capacité est toutefois paramétrable et nous pouvons envisager des simulations avec des véhicules de plus grand gabarit.

Les premiers résultats du processus naturel

Au terme du processus d'évaluation de chacun des individus-tournées nous pouvons maintenant entrer dans la phase opérationnelle spécifique des algorithmes génétiques impliquant sélection, croisement et mutation. Ces trois opérations vont au fil des itérations renouveler tout en les améliorant les individus de chaque population (figure 84).

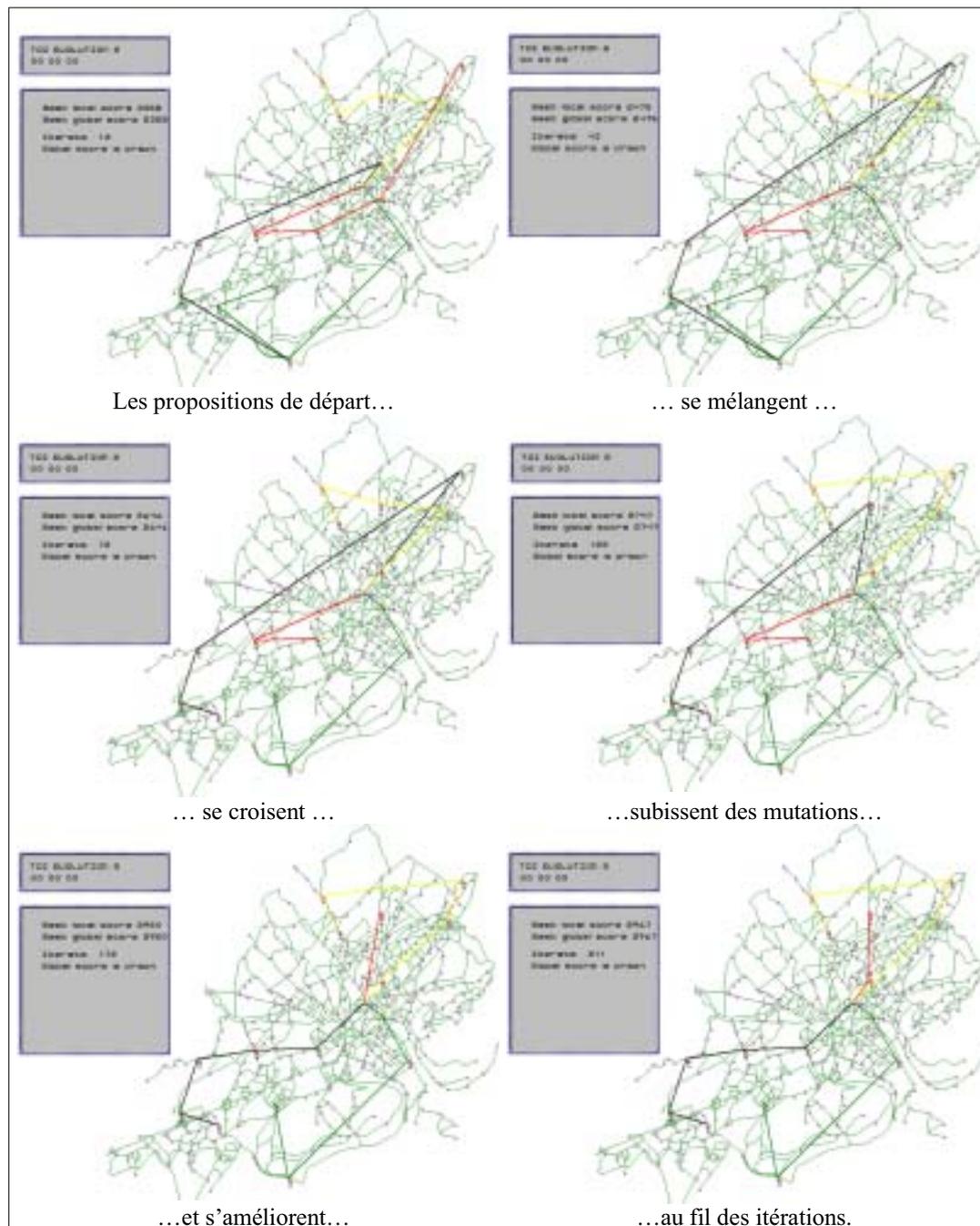


figure 84 : Les algorithmes génétiques améliorent les premières propositions

L'exemple de la figure précédente constitue un cas relativement simple puisqu'il concerne une quinzaine d'utilisateurs. La méthode de résolution fonctionne également avec un nombre d'utilisateurs plus important (figure 85).

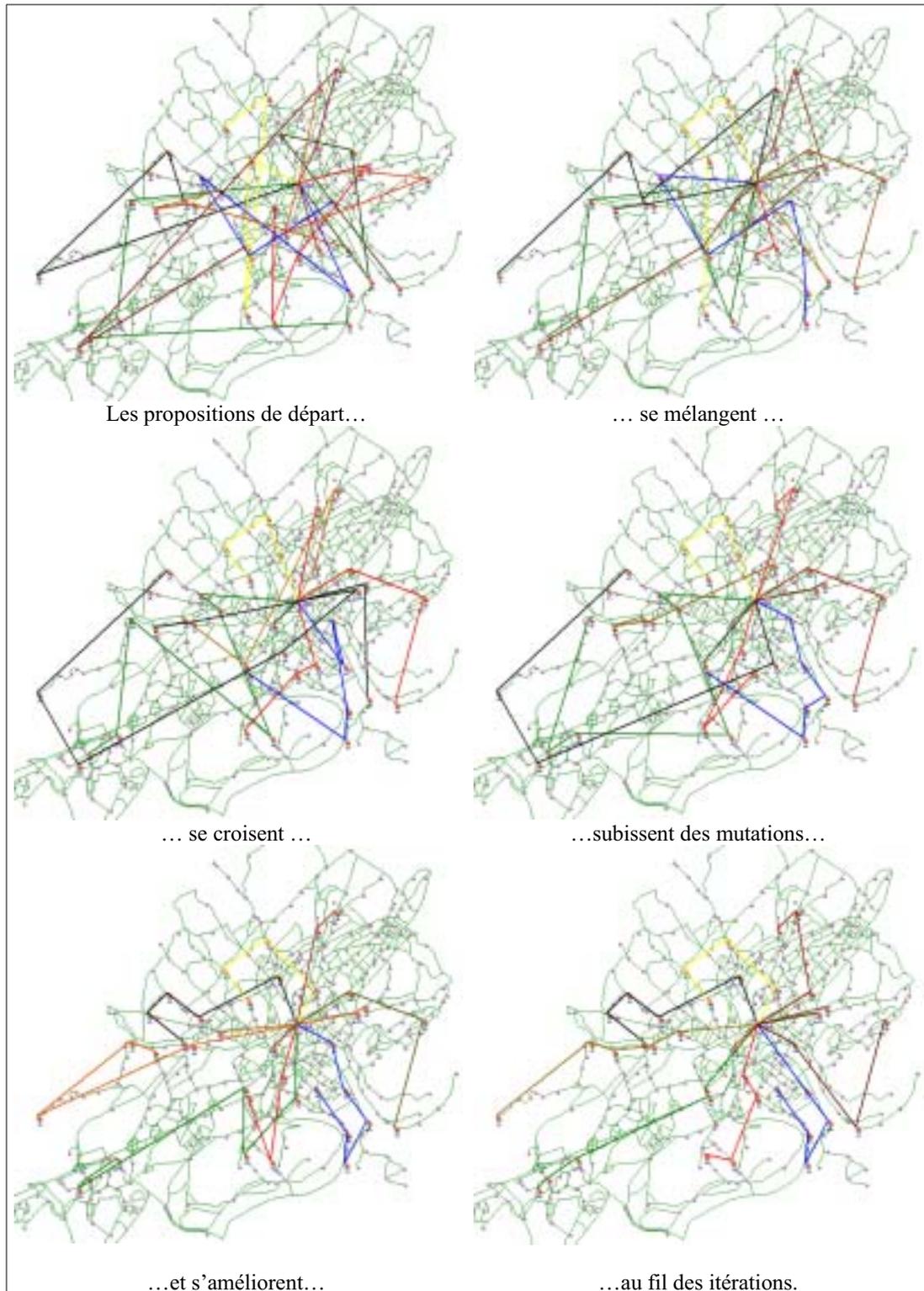


figure 85 : La méthode fonctionne également avec un grand nombre d'utilisateurs

Ainsi, au fur et à mesure de ces opérations, de nouvelles solutions vont émerger. Certaines d'entre elles vont perdre un ou plusieurs véhicules d'un seul coup grâce à un croisement ou à une mutation bénéfique tandis que d'autres verront leur niveau de

regroupement se dégrader puisqu'un ou plusieurs véhicules supplémentaires seront requis à la suite d'une opération. Dans le même temps, d'autres opérations modifieront les répartitions et l'ordre de prise en charge des usagers pour chacun des véhicules. A chaque nouvelle itération, le meilleur individu local émergent de la population en cours d'examen, ainsi que le meilleur individu global de toutes les populations générées sont affichés par le système ainsi que leur note d'évaluation.

L'utilisateur peut décider à tout moment d'arrêter le processus lorsqu'il juge que la tournée proposée est satisfaisante ou lorsque le système n'a toujours pas trouvé de meilleurs individus depuis un certain temps. En effet, les algorithmes génétiques produisent des solutions qui vont s'améliorer avec le nombre d'itérations mais à partir d'un certain seuil, la progression plafonne ; il est préférable d'arrêter le processus en se contentant d'une solution satisfaisante trouvée dans un laps de temps raisonnable. Le tableau 14 présente pour quelques simulations l'amélioration du score après 400 itérations.

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Nombre d'usagers | 6 | 8 | 9 | 10 | 12 | 13 | 14 | 15 | 18 | 22 | 25 | 32 | 38 | 38 | 43 |
| Score au départ | 6289 | 5618 | 4082 | 4255 | 2959 | 2342 | 2667 | 2584 | 2110 | 1818 | 1333 | 1300 | 984 | 1010 | 883 |
| Score à l'arrivée | 6289 | 5848 | 4630 | 4950 | 3610 | 2994 | 3279 | 3226 | 2632 | 2481 | 1815 | 1664 | 1348 | 1395 | 1227 |
| Gain % | 0 | 4 | 13 | 16 | 22 | 28 | 23 | 25 | 25 | 36 | 36 | 28 | 37 | 38 | 39 |

tableau 14 : Résultats après 400 itérations

Ce tableau précédent présente la progression des résultats d'une quinzaine de constructions de trajets issus des algorithmes génétiques. Nous observons que lorsque le nombre de stations à desservir est peu important, le gain apporté par les AG est très faible, voire inexistant. En effet, le nombre de solutions étant très réduit, la méthode de construction de la première population peut générer directement de très bons résultats. En l'occurrence, lorsque un ou deux véhicules sont concernés, la solution apparaît rapidement. En revanche dès que le nombre de cas de figure augmente, le gain apporté par les AG devient prépondérant puisqu'il améliore d'environ 40% les premiers résultats.

La figure 86 montre les courbes de progression des scores obtenues par l'exécution d'une petite trentaine de construction de trajets. Les courbes en gris très clair correspondent à des simulations dont le nombre de stations à desservir est important tandis que les courbes en noir correspondent à des situations comprenant un faible

nombre de stations. Le premier graphique présente la progression des scores en valeur absolue tandis que les scores du second graphique apparaissent de manière relative. Les courbes foncées montent plus rapidement que les courbes claires. C'est à dire que la rapidité du système à trouver une solution est liée au nombre de stations composant une situation.

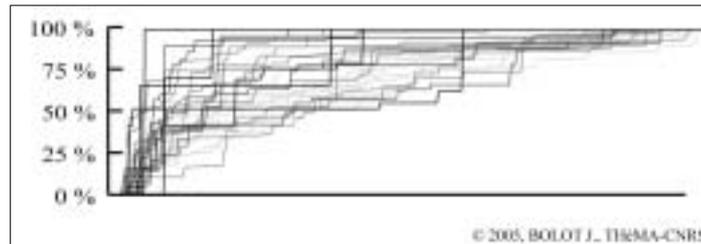


figure 86 : Progressions de la qualité des solutions trouvées au fil des générations

Globalement, la progression de la qualité des solutions trouvées n'est pas linéaire et correspond à celle qui est observée et démontrée (figure 87) dans le domaine des algorithmes génétiques [Golberd, 1994].

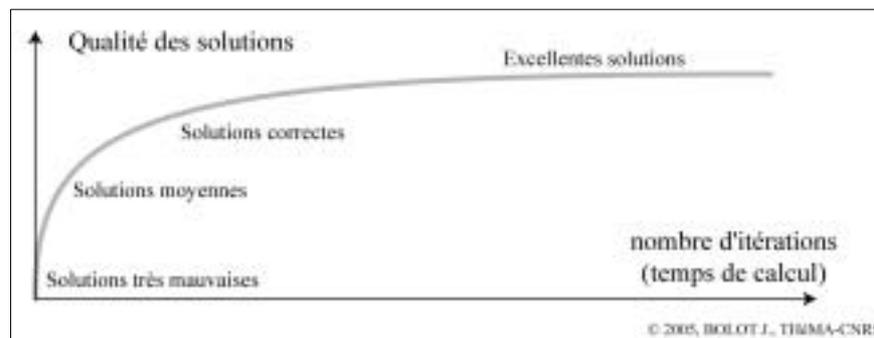


figure 87 : Courbe générale de la progression de la qualité des solutions trouvées par les AG

Les premiers résultats obtenus sont satisfaisants mais il s'agira, par la suite, de confronter cette méthode de construction de trajet à d'autres pour faire ressortir les meilleures solutions.

3 Une méthode d'optimisation basé sur la formalisation du comportement des insectes sociaux

La dernière étape de construction de notre outil de TAD consiste à produire le système de gestion de la flotte de véhicules opérant en temps-réel. La démarche opérationnelle doit se définir aussi dans un contexte théorique approprié et certains emprunts extérieurs doivent s'intégrer dans la plate-forme pour permettre une simulation réaliste par le système.

Cette étape représente l'aboutissement de toute une chaîne méthodologique initiée avec la mise au point de l'outil de gestion de TAD-I et poursuivie ici. L'élaboration des informations et des décisions en temps-réel s'appuie sur un modèle dynamique de représentation graphique souhaité efficace et commode d'emploi.

Cette ultime opération se déroule en trois temps. Le premier énonce les processus du système de transport à la demande qu'il est nécessaire de reproduire. Le second présente la méthodologie requise pour faire fonctionner le simulateur. Pour terminer, nous présentons les modalités d'implémentation de cette méthodologie dans notre plate-forme TAD-I.

3.1 Quels processus reproduire ?

Deux types de processus sont à distinguer au cœur de notre simulateur. Le premier type concerne les actions et les connaissances préalables générées en dehors du système mais utiles à celui-ci. Il s'agit notamment de la production d'appels par les usagers et de la connaissance de la ville par les chauffeurs. Ces processus sont qualifiés d'externes et s'opposent aux processus internes de gestion et de prise de décision.

Les processus externes du système de gestion du transport à la demande

La virtualité de notre système nous conduit à remplacer la demande des usagers traduite sous forme d'appels au central de réservation par une génération automatique et théorique de ces appels. Cette génération est réalisée en se référant à la demande prévisionnelle précédemment établie. Nous souhaitons intégrer la possibilité de générer une demande plus diversifiée que celle qui vient de la prévision de manière à tester la capacité de réaction du système aux situations imprévues.. Pour cela, nous

proposons que les appels se localisent dans un cercle de diamètre variable dont le centre défini par les coordonnées des demandes issues de la prévision localisées à la station de bus. La taille paramétrable de ces cercles établit l'écart spatial entre l'appel issu de la prévision et l'appel arrivant en temps-réel (figure 88). Lorsque le cercle est de petite dimension, les appels générés correspondent pratiquement à ceux de la prévision tandis que lorsque le cercle s'agrandit, la localisation des appels générés automatiquement vient perturber le schéma prévisionnel initial.

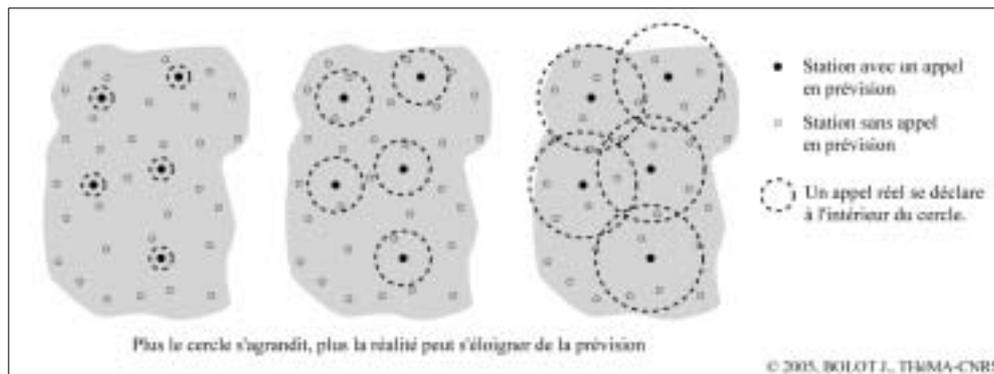


figure 88 : La demande de transport se déclare selon un tirage au sort aléatoirement dirigé

En effet, lorsque les points de demandes s'éloignent beaucoup de la prévision, le système doit néanmoins être capable de s'adapter à la nouvelle situation. En pareil cas, la pertinence des décisions prises par le système et les conducteurs dépend de leur connaissance de la ville qui joue sur leur aptitude à maîtriser les contraintes spatiales et temporelles. Cette connaissance les guidera dans le choix d'un trajet à redéfinir en fonction du moment de la journée et des perturbations du réseau routier.

Cette connaissance se traduit par le calcul des plus courts chemins reliant tous les points de la ville (stations et intersections routières). Cette opération présentée pages 122-124 permet de stocker en mémoire tous les itinéraires composés de tous les points de passages reliant tous les points de la ville.

Les processus externes au transport à la demande étant maintenant établis, voyons ce qu'il en est des processus internes.

Les processus internes du système de gestion du transport à la demande

Chaque véhicule voit son propre cheminement géré en fonction de l'objectif commun qui consiste à atteindre le point d'arrivée à l'heure annoncée tout en transportant un maximum de clients. Cette tâche individualisée s'inscrit au cœur d'une toile de contraintes collectives faisant que le système ne délaisse aucun client. La stratégie

consiste à s'assurer que les clients seront toujours pris en charge et qu'ils arriveront à l'heure à la gare tout en les tenant informés des changements qui les concernent directement. Le client ignore la face cachée du système qui ressemble à une bourse d'échange où en fonction des opportunités, il peut, sans le savoir changer de véhicules et d'itinéraire. L'équilibre du système repose sur des règles de conduite nécessairement adoptées et respectées par les chauffeurs des véhicules, règles présentées par le schéma décisionnel de la figure 89.

Tout d'abord, les positions des véhicules sont définies lors de la phase antérieure par les algorithmes génétiques. Le véhicule démarre sa tournée au moment lui permettant d'atteindre la gare selon l'itinéraire provisoire défini également par les algorithmes génétiques. Pour chacun des nœuds empruntés par un véhicule, on peut déterminer si un nouvel usager qui se manifeste est à sa portée. Cette portée détermine une aire de desserte virtuelle qui évolue en même temps que l'avancée du véhicule. En outre, plus le véhicule se rapproche de la gare, plus sa marge de manœuvre pour procéder à un détour doit diminuer. Sa portée s'en trouve donc réduite.

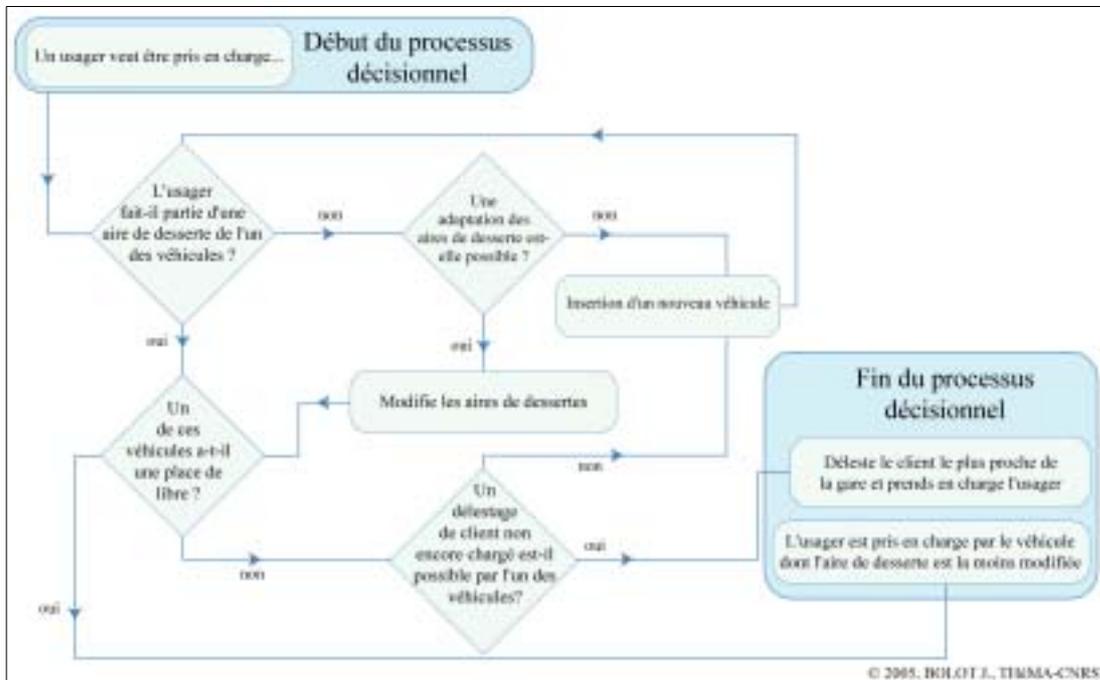


figure 89 : Les règles fonctionnelles du système de transport de TAD-I

Lorsque l'utilisateur est à portée d'un véhicule autorisé à le prendre en charge, le processus s'arrête là, puisque le véhicule concerné prendra en charge l'utilisateur. En revanche, si aucun véhicule ne peut prendre en charge l'utilisateur, il est alors possible

d'agrandir localement l'aire de desserte du (ou des) véhicules les plus proches en jouant au maximum sur la marge de manoeuvre global de l'itinéraire. Dans ce cas, la possibilité d'autres détours ultérieurs sera très limitée ou interdite. Si l'agrandissement d'une aire de desserte n'est pas réalisable ou ne solutionne pas la prise en charge de l'usager, il existe la réaffectation. Le véhicule peut avoir un comportement opportuniste puisqu'il a la possibilité de se désengager vis à vis d'un usager qui n'est pas encore monté dans le véhicule. La réaffectation consiste à désinscrire un usager de sa liste d'affectation pour le déclarer au système comme un nouveau demandeur. Nous imposons toutefois un nombre limité de réaffectations pour un même client sinon le système risque de rejeter indéfiniment les usagers périphériques qui viennent compliquer la mise en place d'itinéraires optimisés. Cela étant, si pour des raisons d'éloignement ou de disponibilités des véhicules en circulation, un usager ne peut être pris en charge le régulateur fait intervenir un nouveau véhicule, localisé à la gare SNCF, qui ira chercher le client en question.

Cette manoeuvre permet de redistribuer les usagers entre les véhicules afin d'optimiser le regroupement. Le terme de délestage est quelque peu inapproprié car un usager une fois informé de sa prise en charge est assuré de parvenir à la gare.

Ce schéma décisionnel montre que ce sont les véhicules qui, guidés par les règles de conduite, assurent le fonctionnement du système. Seul un centre coordinateur évalue la nécessité d'ajouter au besoin un nouveau véhicule. Il n'y a donc pas de stratégie globale d'optimisation de la desserte. C'est pourquoi nous assimilons ce mode de fonctionnement au comportement d'insectes sociaux. Voyons ce qu'il en est.

3.2 Des insectes sociaux pour gérer le système

Alain Franc et Lena Sanders dans l'ouvrage dirigé par Ferrand [1998] distinguent deux types d'organisation des interactions dans un système car « *une dynamique d'interactions entre objets peut être pilotée de façon centralisée, ou au contraire locale. Dans ce dernier cas, on parle d'auto-organisation : seules les règles locales sont édictées, et les comportements globaux en découlent* ». Cette organisation n'est pas sans rappeler le fonctionnement de certaines sociétés animales, en particulier les colonies d'insectes tels que termites, fourmis ou abeilles appelé plus communément les insectes sociaux. L'intelligence dite artificielle fait largement appel à cette

métaphore pour se définir lorsqu'elle entend aborder le champ de la complexité. Nous y faisons référence pour inscrire notre recherche sur le TAD dans ce cadre formel.

L'organisation sociale d'une colonie de fourmis

Le fonctionnement d'une colonie de fourmis repose pour l'essentiel sur la culture du champignon symbiotique, l'aliment de la colonie⁴¹. La culture de ce champignon est une affaire complexe. Tout commence par la recherche de feuilles adéquates à l'extérieur de la colonie qu'il faut découper sur place avant d'en ramener les fragments. Ce travail est un exercice difficile qui nécessite de la force que seuls les individus d'une taille suffisante sont capables de mobiliser. Ramenés à la fourmilière, les fragments de feuilles sont alors redécoupés en morceaux d'environ un millimètre par des fourmis de second ordre plus petites que les précédentes. Ensuite, des fourmis de troisième ordre plus petites encore pétrissent et malaxent les morceaux de feuilles pour en faire des boules qu'elles entassent. Ce sont ces agrégats poreux qui, traversés d'une multitude de minuscules galeries, vont former le substrat nourricier du champignon symbiotique. Des fourmis toujours plus petites de quatrième ordre sont chargées d'ensemencer le substrat en question. Enfin, le nettoyage et l'entretien de la culture sont assurés par des fourmis de cinquième ordre dont la taille minuscule leur permet de pénétrer au cœur des galeries du dispositif.

Le bon fonctionnement de ce système est assuré par une distribution hiérarchique des tâches et les individus chargés de les accomplir (figure 90).

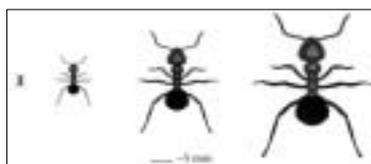


figure 90 : Castes chez les fourmis ATTA ; du jardinier au soldat

Source : Rennard, 2002

Une rupture de la chaîne de production entraîne à coup sûr la fin de la fourmilière. En effet, chaque individu doit immédiatement savoir selon ses aptitudes naturelles comment se comporter : aller chercher des feuilles ou éradiquer les moisissures ou amener la nourriture à ceux qui ne peuvent la prendre...

⁴¹ Cette description, concernant les fourmis défoliatrices de type ATTA, est tirée de l'ouvrage de Jean-Philippe Rennard [Rennard, 2002] qui fait lui-même référence à l'ouvrage de Holldobler B. & Wilson E.O., 1996, « Voyage chez les fourmis », Paris, Seuil.

Se pose alors la question de comprendre comment une telle complexité d'organisation est possible malgré les capacités cognitives des fourmis supposées limitées. Les fourmis disposent d'un éventail de comportements stéréotypés variant de dix à quarante [Holldobler & Wilson, 1990]. Pourtant, l'exploitation de la fourmilière est, selon Rennard [2002], un « *acte indéniablement intelligent, quelle que soit la définition raisonnable que l'on donne à ce terme* ». L'auteur constate « *que des structures extrêmement simples, si elles sont coordonnées, sont capables de réaliser des tâches complexes. Les difficultés rencontrées par les chercheurs en robotique et en intelligence artificielle pour obtenir des outils robustes, les ont amenés à considérer cette réalité. Ce constat est à l'origine de progrès importants, dont les premières applications commencent à se diffuser* » [Rennard, 2002].

L'intelligence artificielle distribuée et les systèmes multi agents

De manière générale, des algorithmes complexes, souples et robustes peuvent être construits à partir d'agents en interaction, c'est l'intelligence artificielle distribuée (IAD). Ferber [1995] donne une définition de l'agent dans son ouvrage de référence : « *On appelle agent une entité réelle ou abstraite qui est capable d'agir sur elle-même et sur son environnement, qui dispose d'une représentation partielle de cet environnement, qui, dans un univers multi agent, peut communiquer avec d'autres agents et dont le comportement est la conséquence de ses observations, de sa connaissance et des interactions avec les autres agents* ».

Un agent est une entité autonome, ayant des aptitudes sociales, réactive et proactive. Il peut redéfinir ses buts, prendre des initiatives et agir sans stimulation externe [Cardon, 2001]. Un agent contient un module de connaissances, un module de communication, un module de comportement et un module d'action.

« *L'objectif de l'IAD est d'analyser, de concevoir et d'étudier des systèmes multiagents, c'est à dire des sociétés d'agents artificiels autonomes qui travaillent selon des modes parfois complexes de coopération, conflits et concurrence, pour aboutir à la réalisation de leur propre buts, et par là même atteindre (souvent implicitement) un objectif global désiré, mais pas obligatoirement déterminé a priori par le concepteur du système* » [Bonabeau & Theraulaz, 1994].

Les premiers objectifs de l'IAD et des systèmes multi-agents consistent essentiellement à faire collaborer des systèmes experts pour obtenir des capacités d'expertise de groupe. Cette première approche mettant en jeu un petit nombre

d'agents complexes appartient à l'école dite « cognitive ». Une seconde approche s'est peu à peu développée. Elle met en jeu un très grand nombre d'agents ayant chacun des tâches plus simples. Cette approche dite « réactive » s'inspire des colonies d'insectes sociaux. Elle est très utilisée dans le domaine de la robotique collective mais également dans le domaine du transport [Fougeres, 2000 ; Gruer et al., 2003 ; Ghérida, 2004].

Nous proposons d'utiliser cette approche pour gérer le système de transport à la demande en temps réel. Nous proposons une définition synthétique des termes agents et systèmes multi agents.

Un **agent** est une entité physique ou virtuelle :

- qui est capable d'agir dans un environnement,
- qui communique avec son environnement,
- qui est mû par un ensemble de tendances (sous la forme d'objectifs individuels ou d'une fonction de satisfaction, voire de survie, qu'elle cherche à optimiser)
- qui possède des ressources propres,
- qui est capable de percevoir (mais de manière limitée) son environnement,
- qui ne dispose que d'une représentation partielle de son environnement (et éventuellement aucune),
- qui possède des compétences et offre des services,
- dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, et en fonction de sa perception, de ses représentations et des communications qu'elle reçoit.

Un **Système Multi-Agents (SMA)** est un système composé des termes suivants :

- un environnement E , disposant d'une métrique,
- un ensemble d'objets O , auxquels ont pu donner une position dans E à un moment donné. Ces objets (hormis les agents) sont passifs : les agents peuvent les percevoir, les créer, les détruire et les modifier.
- un ensemble A d'agents, lesquels représentent les entités actives du système,
- un ensemble de relations R qui unissent les objets (et agents) entre eux,
- un premier ensemble d'opérateurs permettant aux agents de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets O . Un second ensemble d'opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction de E à ces opérations.

Gestion en temps-réel de TAD-I par une intelligence distribuée

En reprenant la définition d'un agent telle qu'elle vient d'être donnée, nous définissons trois types d'agent et quatre types d'objet (tableau 15).

Le premier type d'agent concerne les usagers. Ses paramètres et modules de connaissances, de communications et d'actions sont relativement simples. Il est automatiquement créé par le générateur d'usagers ; il intervient en communiquant le souhait de se rendre à la gare. Tous les agents se rendent à la gare et doivent arriver 10 minutes avant le départ de leur train. Le second type d'agent concerne les véhicules qui ont la charge d'acheminer les usagers. Un troisième type d'agent, le régulateur, décide de l'opportunité d'introduire ou non un nouveau véhicule dans le circuit.

Quant aux objets, ils prennent corps avec le réseau routier, les stations et matrices de distances. Ils composent l'environnement du système multi agents. L'objet trajet est normalement créé préalablement mais peut être modifié, ou créé par les nouveaux agents véhicules ajoutés par le régulateur pendant la simulation.

| Type | Nom | Nombre | Fonctions |
|-------|----------------------|----------|---|
| Agent | Usager | ≥ 0 | Joue le rôle d'un usager |
| Agent | Véhicule | ≥ 0 | Joue le rôle d'un véhicule |
| Agent | Régulateur | 1 | Ajoute un véhicule dans le circuit |
| Objet | Réseau routier | 1 | Reproduit les caractéristiques du réseau |
| Objet | Stations | 1 à n | Caractérise les stations utilisées par le transport à la demande. Chaque station est connectée à un noeud du réseau |
| Objet | Matrices de distance | 2 | Contient les informations de temps de parcours et de distances entre chaque noeud du réseau |
| Objet | Trajets | 1 à n | Contient les informations relatives aux points de passage permettant au véhicule de construire son itinéraire. |

tableau 15 : Les composants du système multi-agents

Pour des raisons pratiques nous proposons de simplifier le texte en ne rappelant plus systématiquement les termes d'agent ou d'objet. Lorsqu'il est fait référence à un véhicule, un usager ou au régulateur, nous sous-entendons qu'il s'agit d'un agent. En

reprenant les règles de bonnes conduites présentées par la figure 89 et en les adaptant aux seuls véhicules, nous obtenons la figure 91.

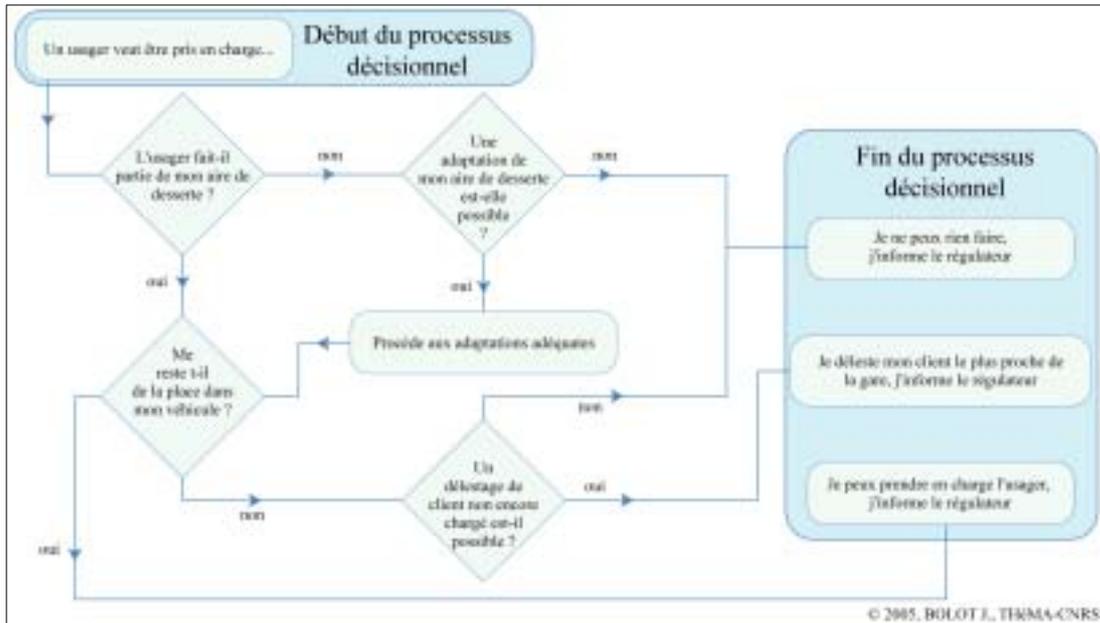


figure 91 : Les fonctions comportementales d'un véhicule

Le véhicule possède deux modules agissant de façon complémentaire. Son module de connaissance est composé des informations relatives au réseau routier (plus court chemin, distance kilométrique, distance temporelle), des points de connexion (stations de prise en charge, lieu de dépose) et des informations qui le concernent directement (capacité, nombre d'usagers déjà pris en charge, nombre d'usagers restant à prendre en charge...). Le module de communication permet au véhicule de communiquer avec le système multi agent.

La figure 92 présente les règles comportementales de l'usager telles qu'elles sont conçues dans le cadre fonctionnel du système de transport en temps-réel. Les fonctions comportementales de l'usager sont peu nombreuses puisque la prise en charge n'est pas gérée à ce niveau. De même, le processus conduisant l'usager à préférer le transport à la demande ne fait pas partie des fonctions comportementales considérées par TAD-I.

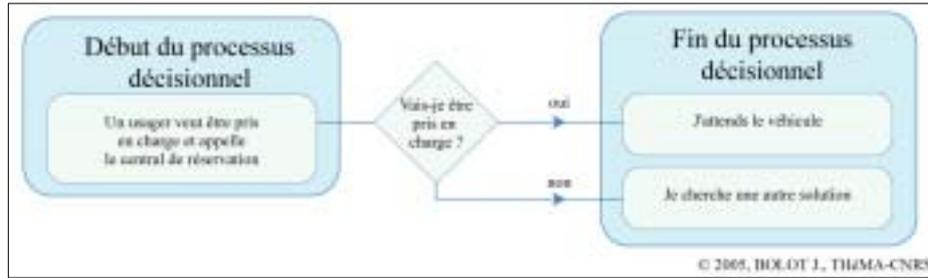


figure 92 : Les fonctions comportementales d'un usager

Le régulateur (figure 93), enfin, est un agent particulier puisqu'il existe, quelle que soit la configuration, et qu'il est unique. Il ne peut y avoir deux agents régulateurs opérant en même temps. Le régulateur se met en activité au premier appel d'usager et se désactive lorsque tous les véhicules sont arrivés à destination. La fonction du régulateur, on l'a vu, se limite à décider de l'opportunité d'introduire ou non un nouveau véhicule dans le circuit.

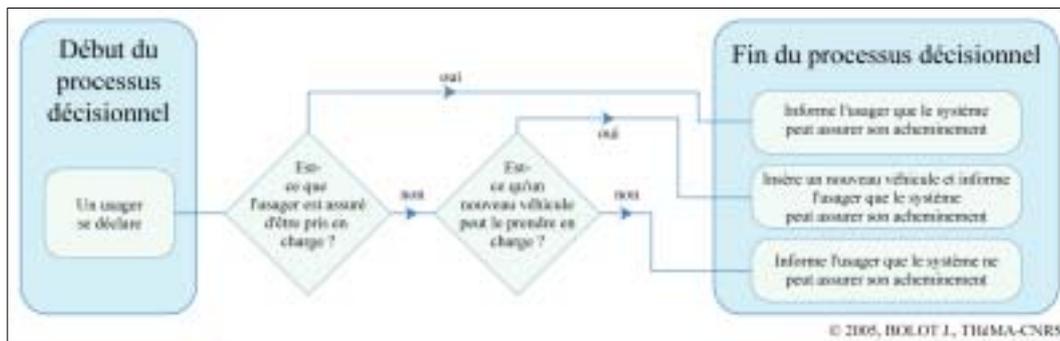


figure 93 : Les fonctions comportementales du régulateur

Le nouveau véhicule inséré se dirige directement vers l'usager à prendre en charge mais peut modifier son trajet car chaque nouveau véhicule devient un véhicule comme les autres susceptible de faire face à un nouvel appel ou à une réaffectation.

3.3 Simulation de la gestion du TAD en temps-réel...

L'implémentation des processus précédemment décrits constitue la dernière étape de construction de la plate-forme TAD-I. Cette étape consiste à transcrire le diagramme fonctionnel sous forme d'algorithme informatique. Cet algorithme, dans le cadre du simulateur, doit permettre un paramétrage des conditions de fonctionnement du système. Il s'agit donc, dans un premier temps, de définir les variables ou paramètres permettant d'agir sur le système dans le cadre d'une simulation. Ensuite, nous présenterons le fonctionnement de la simulation ainsi que les moyens requis pour en

permettre le suivi. Pour finir, des exemples permettront de tester concrètement la gestion en temps-réel du transport à la demande.

Les paramètres du simulateur

De nombreux paramètres caractérisent les conditions de la simulation de la gestion en temps-réels du transport à la demande.

- Le **nombre d'utilisateurs** est préalablement établi lors de la prévision de la demande issue de la première étape. Ensuite, il doit être possible de modifier le nombre d'utilisateurs à prendre en charge ; ce qui peut mettre le système face à une charge d'utilisateurs tout à coup très différente de la prévision.
- **L'aire des stations** détermine l'espace dans lequel les utilisateurs vont se déclarer. Ces aires présentées par la figure 88 à la page 167 permettent de modifier de manière plus ou moins importante la localisation des utilisateurs déterminée par la prévision. Plus l'aire des stations est grande, plus la localisation des utilisateurs pourra s'éloigner de la prévision.
- Le **délai de réservation** correspond à « un espace temporel » dans lequel l'utilisateur se déclare. Plus la réservation intervient tôt, plus sera simple la tâche du système car pratiquement tous les utilisateurs se seront manifestés avant le départ du premier véhicule et dans ce cas, il n'y aura aucune modification des trajets en temps-réel. En revanche, lorsque des utilisateurs se déclarent tardivement, les trajets à recalculer en conséquence, obligent à des remises en cause du schéma de desserte initial.
- Les véhicules se localisent aux stations par lesquelles débutent les itinéraires. Le départ de chaque véhicule est établi par addition à rebours, de l'heure où le véhicule doit être rendu à la gare et du temps nécessaire pour parcourir son itinéraire temporaire. Cette **durée de trajet** peut être allongée pour donner plus de souplesse au véhicule et lui permet ainsi d'effectuer des détours éventuels si besoin mais, en avançant l'heure de départ du véhicule on peut se priver d'une prise en charge de dernière minute si celle-ci est demandée après le passage du véhicule.
- Le **temps de prise en charge** définit la durée de l'arrêt du véhicule à chacune des stations à desservir. Il est établi par le temps que va mettre l'utilisateur pour monter dans le véhicule.

- Le **nombre de réaffectation** permet de limiter les reports possibles d'un usager depuis un véhicule vers un autre.

Fonctionnement d'une simulation

La simulation, de notre point de vue, présente deux aspects qui sont des constituants indissociables dans sa mise en oeuvre. Le premier concerne l'interface avec l'utilisateur et porte sur les données chiffrées et la visualisation. Il s'agit surtout de résoudre les problèmes d'ordre ergonomique. Le second aspect concerne le coeur du système lui-même ; il s'agit de transcrire un schéma en solutions algorithmiques écrites sous forme de codes dans le système. Les principes qui ont servi à leur élaboration ont été explicités précédemment.

Les véhicules se sont localisés aux points de départ des trajets temporaires. Dans la fenêtre de visualisation de la simulation (figure 94), les itinéraires temporaires sont représentés par des arcs verts qui joignent chacun des points de passage. Ces arcs ne suivent pas directement le réseau routier puisqu'ils relient les stations en ligne droite. Il est toutefois possible de visualiser l'itinéraire, dans sa globalité, par l'affichage des numéros de tous les nœuds composant le trajet, depuis le point de départ jusqu'à la gare SNCF. La relation de prise en charge, entre un usager et un véhicule, se matérialise par une ligne continue de couleur rouge.

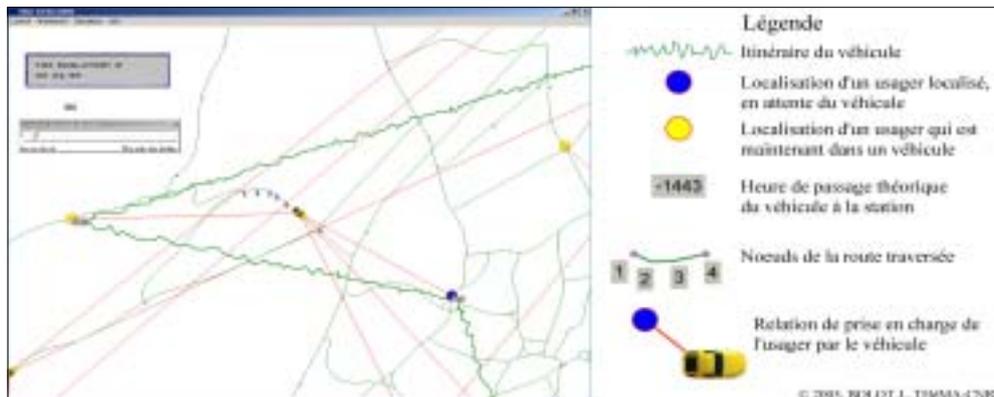


figure 94 : Visualisation dynamique de la gestion en temps-réel du système de TAD

Les usagers localisés par des points à l'écran manifestent leur demande de transport au fil du temps sachant qu'un usager n'est plus assuré d'être pris en charge si son appel intervient trop tardivement. Ainsi, un nouvel usager est représenté sous la forme d'un symbole graphique gris clair lorsque aucun des véhicules n'est en situation de le prendre en charge. Dans notre simulateur, cette phase ne dure que quelques dixièmes de secondes car une solution est en principe rapidement trouvée.

Soit parce que l'un des véhicules peut se détourner, soit parce que le régulateur met un véhicule supplémentaire en circulation. Dès qu'un véhicule confirme la prise en charge, le symbole représentant l'usager devient bleu, puis passe au jaune lorsque l'usager prend place dans le véhicule. Nous laissons les symboles jaunes visibles en point fixe à la station de départ afin de pouvoir observer l'évolution des prises en charges.

Une série de simulations pour tester le système

Pour montrer le fonctionnement du système, nous procédons à une série de simulations dont les situations de départ sont données par la prévision et les itinéraires associés sont les mêmes pour chaque simulation. Ensuite, la variation des valeurs affectées aux paramètres dynamiques génère des situations distinctes ; ce qui induit des contraintes différentes qui éprouvent la capacité de réaction du système.

Tout d'abord, les deux paramètres permettant de faire varier la simulation sont le nombre des usagers réels et leur localisation. Ensuite, les paramètres concernant la capacité réactive du système, peuvent faciliter ou contraindre, l'optimisation des dessertes. Une durée de prise en charge variable peut entraîner des modifications conséquentes des solutions offertes. En effet, un véhicule cumulant des temps de prise en charge important pourrait ne pas être en situation d'arriver à l'heure en gare.

Ensuite, une faible marge accordée aux véhicules pour effectuer des détours rend difficile une optimisation des dessertes mais facilite la prise en charge des usagers par l'ajout de véhicules supplémentaires autant que nécessaire. A l'inverse, une grande marge permet d'optimiser la prise en charge des usagers avec un faible nombre de véhicules mais cette option contraint le système à réagir rapidement et à coup sûr.

Le moment auquel s'effectuent les réservations est également important. En effet, si toutes les réservations arrivent avant le départ du premier véhicule, le système modifie les itinéraires temporaires une fois pour toutes. En revanche, si les demandes se multiplient quand les véhicules sont déjà partis, certains appels ne pourront plus être satisfaits faute de détours possibles à partir des trajets engagés. Affréter un véhicule supplémentaire est toujours envisageable, mais il est nécessaire d'établir des règles spécifiques pour ne pas faire dériver le TAD vers un service personnalisé, les taxis étant là pour cela. Il est donc nécessaire d'établir si l'affrètement du véhicule

supplémentaire est rendu obligatoire pour des raisons fonctionnelles inhérentes au système ou par la faute de l'utilisateur qui s'est manifesté dans un délai trop court.

Simulation 1 : la demande réelle correspond aux résultats de la prévision

Le premier test se réalise en ne modifiant aucune des informations délivrées par la prévision. Les trajets effectifs correspondent aux trajets provisoires. Dans ce cas, le temps de prise en charge des usagers dont la valeur peut osciller entre 15 et 60 secondes est le seul facteur qui puisse modifier les itinéraires générés par les algorithmes génétiques lors de l'étape précédente. Mais, quoi qu'il en soit, la flotte de véhicules est correctement proportionnée et les véhicules sont localisés aux points optimaux.

La figure 95 présente le déroulement de cette première mise en situation.

La première image (A) montre la localisation des usagers telle qu'elle est donnée par la première étape de prévision de la demande. Dans la seconde phase, les algorithmes génétiques établissent des trajets provisoires par rapport à cette répartition des usagers sur le territoire.

Les usagers sont représentés par des points gris dès lors qu'ils se déclarent. Rapidement, la couleur du point passe en bleu lorsque le simulateur lui a affecté un véhicule. Ils sont alors en attente d'être pris en charge. La réaffectation d'un usager redirigé vers un autre véhicule ne fait pas changer la couleur du point car le statut de cet usager reste inchangé ; il est assuré d'être pris en charge. La couleur passe au jaune avec la prise en charge.

Au commencement de la simulation, les usagers se manifestent peu à peu tandis que démarre le premier véhicule. Par la suite, les autres véhicules démarrent et de plus en plus d'usagers sont pris en charge. Nous observons une certaine logique dans les prises en charge puisque ce sont globalement les usagers les plus éloignés qui sont embarqués les premiers. Il est possible que certains usagers restent encore en attente tandis que d'autres sont déjà rendus. Cela tient au caractère temporel plus que kilométrique de l'accessibilité puisque le plus proche dans le temps n'est pas forcément le plus proche dans l'espace. D'autre part, les itinéraires ne sont pas toujours au plus court pour atteindre la gare, et peuvent décrire des boucles avant d'y parvenir.

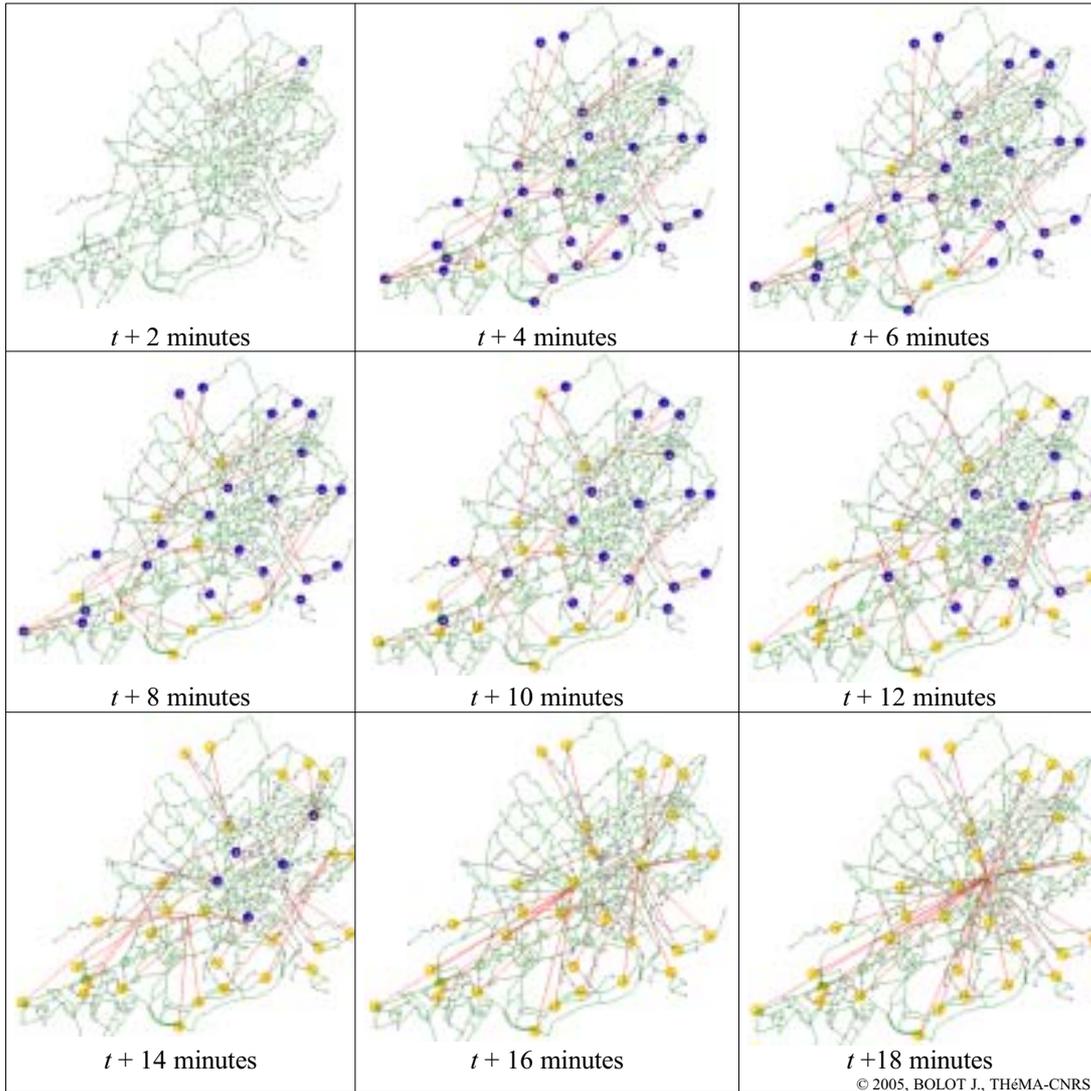


figure 95 : Screen-shot de la première simulation

Simulation 2 : les usagers se déclarent tardivement avec le risque de ne pas être pris
 Par rapport à la précédente, cette situation se caractérise par un délai accordé plus important. Dans ce cas, le système commence ses prises en charge alors que beaucoup d'appels ne se sont pas encore déclarés. Le système ajuste les trajets dès que les nouvelles demandes interviennent. Il est toutefois possible que le système ne soit pas en mesure de satisfaire une demande trop tardive. C'est précisément ce qui est arrivé à l'utilisateur dont le symbole est resté en gris sur les deux dernières images de la figure 96. Le moment de la déclaration et la position géographique de l'utilisateur ont exclu sa prise en charge par un véhicule en circulation. En outre, il n'était même plus possible d'affréter un autre véhicule faute de temps pour accomplir le trajet nécessaire.

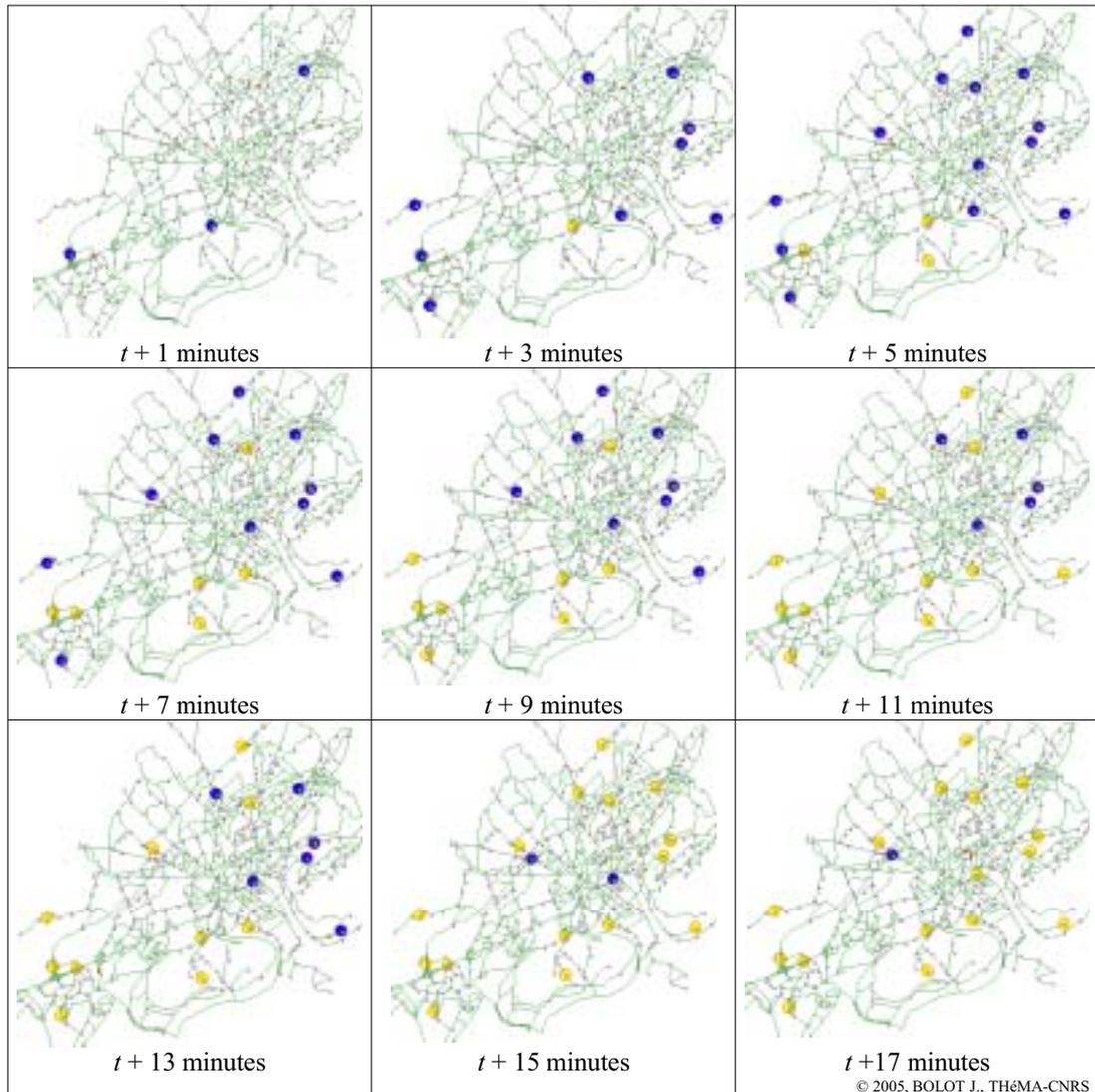


figure 96 : Un usager se déclare tardivement et n'est pas pris en charge

Simulation 3 : le nombre et la localisation des usagers est aléatoire

Lorsque la demande des usagers s'éloigne de la prévision, tant en nombre d'usagers que de localisation, l'étape précédente de construction de trajets n'a plus d'intérêt car la flotte de véhicules n'est plus adaptée à la situation. Cependant, le nombre et la localisation des véhicules sont établis rendant nécessaire une modification du schéma de prise en charge des usagers. Dans ce cas, l'optimisation fonctionnelle de la desserte ne devient plus la priorité du système au bénéfice des usagers qu'il faut acheminer. Ce type de situation peut amener le régulateur à mettre en circuit de nouveaux véhicules alors même que des véhicules en course ont encore une capacité d'accueil.

Pour aller au bout de notre expérimentation, nous paramétrons maintenant 45 simulations se rapportant à 3 situations avec 15 simulations à chaque fois. Chacune

des situations présentées au tableau 16 est définie par un écart entre prévision et réalité en terme d'effectif et de localisation des prises en charge.

| Situation réelle par rapport à la prévision | |
|---|---|
| Cas 1 | Plus grand nombre d'usagers et localisation équivalente |
| Cas 2 | Nombre égal d'usagers et localisation différente |
| Cas 3 | Plus grand nombre d'usagers et localisation différente |

tableau 16 : Trois groupes de situation pour tester le système

Une représentation particulière de ces écarts n'a pas ici grand intérêt ; on suppose toutefois qu'un plus grand nombre d'usagers appelle l'augmentation de la flotte de véhicules tandis qu'un nombre moindre facilitera la gestion du temps-réel mais pourra affecter la rentabilité du système. Par ailleurs, une différence entre localisation réelle des usagers et localisation prévue peut soit compromettre le regroupement des prises en charge soit au contraire le favoriser. La figure 97 présente une situation théorique où à coté de la localisation issue de la prévision sont représentées deux localisations différentes auxquelles le système doit s'adapter. Le premier cas comporte des localisations d'usagers réels qui, sans réellement compromettre la gestion du transport à la demande, n'en améliore pas la performance. Un des véhicules ne transporte plus qu'un usager tandis que la longueur des trajets est plus importante. Le second cas est plus favorable même si à priori les localisations réelles ne semblent pas mieux réparties que celles du cas précédent. Le système a pu se passer d'un des trois véhicules grâce à un meilleur remplissage de ceux-ci.

Ainsi, cet exemple permet de comprendre qu'un nouveau schéma de localisation peut tout autant améliorer que détériorer l'efficacité du transport. En définitive, tout va dépendre des positions initiales des véhicules et de leurs itinéraires préalablement construits.

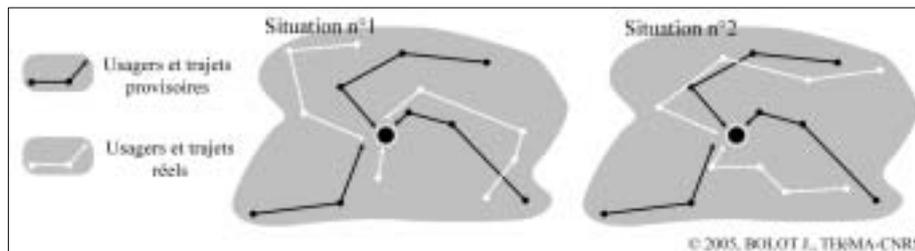


figure 97 : Les conséquences possibles d'une localisation différentes des usagers simulés et réels

Le temps est maintenant venu de tirer quelques conclusions des expériences présentées.

Pour mémoire, les simulations du premier groupe se distinguent par un plus grand nombre d'utilisateurs en situation réelle qu'avec la prévision mais leur localisation reste conforme. Cela revient à dire que, là où la prévision positionne un utilisateur, il peut y en avoir plusieurs. Dans ce cas, les véhicules font la tournée prévue mais atteignent plus rapidement leur capacité limitée. Ils doivent se rendre en gare en laissant les utilisateurs de fin de parcours. Il reviendra au régulateur d'envoyer le nombre de véhicules strictement nécessaire car à ce stade, le regroupement reste possible puisque les utilisateurs en attente sont concentrés autour de la gare. Cette configuration est donc gérable par le système si la réserve de véhicules est suffisante ce qui dans nos simulations est toujours le cas.

Les simulations du second groupe se caractérisent par un nombre d'utilisateur réel égal à celui de la prévision mais avec une localisation différente. Même si le nombre de véhicules de la flotte semble en adéquation avec le besoin, cette situation est plus délicate que la précédente car la position des utilisateurs joue un grand rôle dans la construction des trajets et donc dans le calibrage du nombre de véhicules nécessaires. Dans ce cas-là, le système peut réussir à assurer les prises en charges à condition toutefois que les réservations ne soient pas trop tardives.

Enfin, les simulations liées à la troisième situation permettent de valider notre démarche dans son ensemble selon les trois temps à savoir : prévision, construction de trajets temporaires et gestion en temps réel. En effet, la gestion en temps réel devient problématique lorsque le nombre et les positions des utilisateurs ne correspondent plus du tout à la prévision. Pour faire face, il y a toujours la perspective d'améliorer les performances du système en recherchant d'autres méthodes. On peut aussi contraindre fortement les délais de réservation. Dans ce dernier cas, l'objectif de réservation en temps réel perd une portée de son sens.

Le nombre d'utilisateurs, leur localisation ainsi que le moment de leur réservation sont les facteurs qui règlent la gestion théorique du système en temps réel. Il est nécessaire d'ajouter à ces paramètres la disponibilité en véhicules pour permettre au régulateur de fonctionner. Ces préconisations s'appliquent à un cas de rabattement sur un pôle unique dont la contrainte horaire est prépondérante. En conséquence, la solution est de ne plus autoriser les réservations dès lors que les premiers véhicules

sont en route, c'est à dire environ 30 minutes avant l'heure limite d'arrivée en gare. De ce fait, l'impératif du temps-réel n'est plus tout à fait respecté mais est-il nécessaire d'aller plus loin dans ce sens puisqu'avec le délai d'une demi-heure, le TAD entre en concurrence directe avec le Taxi. Aussi, en restant dans cet ordre de contrainte horaire, le TAD pourrait assurer des réservations effectives en temps-réel en milieu dense, là où les possibilités de modification de trajet sont nombreuses.

Conclusion

Les processus théoriques et instrumentaux permettant la gestion en temps-réel du TAD sont en place à l'issue de notre exercice. Prévision de la demande, construction d'itinéraires, gestion en temps-réel des appels et des parcours sont autant de points qui ont été passés en revue et intégrés dans le système.

La prévision de la demande constitue un travail fastidieux mais très intéressant. Il aborde des questions de calcul de densités d'informations où l'espace et le temps sont très liés. A défaut de proposer une méthode totalement nouvelle, nous avons pris appui sur des éléments déjà éprouvés en adaptant leur performance aux besoins de la prévision. De ce côté là, les améliorations sont encore en devenir pour mieux tenir compte des évènements exceptionnels ou intégrer d'autres échelles temporelles que celles des jours de la semaine. Le moment dans l'année, par exemple, est certainement un terme de prévision à intégrer. Quoiqu'il en soit, tant que le nombre d'utilisateurs quotidiens restera faible, il sera difficile de réaliser une prévision qui puisse s'ajuster aux évènements particuliers.

La construction de trajets optimisés constitue un travail de recherche à part entière. L'utilisation des algorithmes génétiques permet de répondre efficacement à la problématique posée par cette seconde étape. Il nous faudra, par la suite, confronter cette approche avec d'autres pour voir si elle est optimale.

Avec la troisième étape et opération de l'outil TAD-I vient l'apport majeur de notre recherche, du moins l'espérons-nous. En effet, les modélisations mises en œuvre contribuent à la qualité du suivi visuel et dynamique de l'évolution de la simulation. Les techniques élaborées pour permettre des affichages complexes tout en bénéficiant de modèles topologiques complets pourront être utilisées dans d'autres travaux. Ensuite, les méthodes dites « géocomputationnelles » mises en œuvre ouvrent des pistes intéressantes pour l'élaboration d'outils d'aide à la décision liés ou non au transport.

Conclusion de la seconde partie

Cette seconde partie présente la mise en œuvre complète d'un outil de simulation dédié à la gestion d'un transport à la demande en temps-réel. Selon le protocole testé, ce service garde les mêmes fonctions qu'Evolis-Gare : transporter les Bisontins, usagers des TGV matinaux, à la gare SNCF de la ville. L'objectif principal du service est de proposer aux usagers aux prix de contraintes allégées de réservation et de temps de parcours, un moyen d'acheminement alternatif à la voiture personnelle. L'innovation apportée vient du mode de réservation qui peut se faire en temps-réel jusqu'à une demi-heure du départ contrairement à Evolis-Gare qui implique une réservation la veille, à 18h au plus tard.

Pour mener à bien la mise en œuvre de notre transport à la demande en temps-réel, la réflexion fut de plusieurs ordres.

En premier lieu, elle a porté sur les fonctionnalités de l'outil devant s'ajuster aux besoins et permettre la mise à jour des informations requises.

A cette fin, nous avons mis en place une démarche en trois temps avec une phase de prévision de la demande, une phase de construction de trajets temporaires et une phase d'adaptation de ces trajets préétablis aux demandes effectives. Dans le même temps, les informations sont segmentées en trois types correspondant à trois groupes d'intervenants dans le système. L'information relative aux **usagers** intègre toutes les données liées aux réservations. L'information relative à l'**infrastructure** fournit les bases utiles aux calculs d'accessibilité ainsi qu'à la localisation et à la connexion des stations de bus au réseau. Enfin, l'information relative au **service** lui-même pour permettre la desserte ; il s'agit des véhicules et des itinéraires.

Le second niveau de la réflexion présente la mise en œuvre de la plate-forme de simulation spécialement élaborée dans le cadre de cette recherche. Cela concerne essentiellement les modèles de données, les modèles de représentation ainsi que les

modèles de requête de l'information. Chacun de ces composants est ensuite implanté dans la plate-forme qui prend corps ainsi.

Le troisième niveau tire parti du travail antérieur pour mettre la simulation en action à travers l'ensemble des processus. La prévision de la demande, la construction de trajets temporaires et leur adaptation en temps-réel pour répondre au mieux à la demande des usagers peuvent être mis en avant comme résultat de notre thèse. En outre, les fonctionnalités développées autour de ces trois opérations confèrent à l'outil un caractère particulier. En effet, la visualisation des informations et des processus constitue à nos yeux une innovation que les outils existants dédiés à la gestion d'un transport à la demande n'intègrent pas encore, du moins à notre connaissance.

Conclusion générale

Les résultats que nous apportons et leurs retombées opérationnelles sont le fruit d'un travail d'équipe interdisciplinaire. Les collègues informaticiens ont conforté notre approche dans le domaine de l'intelligence artificielle tandis que les partenaires, exploitants de transport collectif, nous ont mis au contact de la réalité du terrain et des contraintes de l'action que la recherche a parfois tendance à mettre au second plan.

En ce sens, le service Evolis-Gare peut être considéré comme une réussite. Les acteurs des transports bisontin, élu ou technicien portent toujours une appréciation positive sur cette opération quand elle est évoquée lors de discussions. Nous sommes évidemment satisfait d'avoir été au coeur de ce projet qui en outre, ouvre des perspectives dans le domaine des économies d'énergie. C'est un enjeu de société qui s'est encore accentué tout récemment.

Partant de ce contexte favorable, c'est évidemment le travail de recherche sur la modélisation du transport à la demande qui a retenu tous nos efforts et a été une source incomparable d'enrichissement personnel.

Lorsque les sciences humaines et technologiques se rencontrent sur des questions de mobilité

Nous avons montré que l'individualisme, en conduisant à l'utilisation massive de la voiture particulière contribue à l'étalement des villes sans égard pour le développement durable. Les autorités publiques disposent de certains leviers pour permettre de contrer ce phénomène, ce qui met en cause leur volonté politique. D'un autre côté, il revient au chercheur de proposer des pistes pour améliorer la prise de décision. Nos travaux se placent dans cette perspective d'amélioration du transport collectif et plus particulièrement du transport à la demande.

La géomatique et les technologies de l'information définies ici comme les *Intelligent Transport System* (ITS) ont été requises pour améliorer l'offre de transport public existante. En effet, au sein de l'équipe de recherche pluridisciplinaire Tadvance, et en partenariat avec un exploitant de transport urbain et une autorité organisatrice de transports, nous avons participé à la définition et à la mise en oeuvre d'Evolis-Gare à Besançon. Ce projet s'est aussi inscrit dans un programme de recherche national, PREDIT.

Cette recherche appliquée au service de la collectivité a été récompensée par un prix national (Mercure d'or de Kéolis) et local (prix du développement local de Franche-Comté en 2001). Le code source du logiciel Resad² assurant la gestion d'Evolis-Gare conjointement déposé par l'université, le CNRS et Kéolis, a été transféré à une société française qui en assure la commercialisation. Cette expérience est une preuve de plus que la recherche en sciences humaines est capable de déboucher d'une manière concrète.

Rappelons qu'au départ, Evolis-Gare avait un caractère expérimental limité à la semaine de la mobilité en septembre 2000. Or, ce service fonctionne depuis 6 ans. Maintenant que je suis en poste au sein de l'Autorité Organisatrice de Transport régionale et en contact avec les AOT locales et notamment celle du grand Besançon, je peux mieux mesurer l'intérêt suscité par ce service auprès des acteurs du transport collectif et des élus locaux qui en sont bien souvent eux-même utilisateurs.

Transport à la demande en temps-réel pour aller plus loin

Le transport à la demande peut s'imposer comme un maillon essentiel dans la chaîne des transports collectifs. Nous l'avons montré pour le transport urbain et cela est sans doute encore plus vrai dans les zones rurales. Le développement des transports à la demande, « transports collectifs individualisée » [Thevenin, 2002] est une des réponses à l'enclavement des territoires ruraux ou urbain quand ils sont privés d'un accès au transport collectif classique. De la sorte, les instances de décision peuvent offrir une solution de transport efficace et économiquement viable à leurs administrés, elles saisiront par ce biais une chance de favoriser le développement de ces territoires périurbains et ruraux. Si le transport à la demande constitue une solution directe aux problèmes de déplacements des personnes, on doit en même temps se préoccuper de l'extension des territoires urbains. En effet, ce phénomène est

énergivore (habitat, transport) et va structurellement à l'encontre du développement durable.

Les personnes habitant ces territoires manifestent leur attente de transport collectif adapté à leurs besoins. A ce titre, Evolis-Gare est très apprécié et beaucoup regrettent que celui-ci ne soit pas encore disponible sur le territoire de la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon. Les travaux menés par Didier Josselin et Sophie Houzet pour étudier cette extension territoriale en ont donné les clés. La réalisation de ce défi donnera une portée nouvelle à l'expérience bisontine.

La réservation en temps-réel du service de transport à la demande constitue un autre volet de la recherche qui complète sa dimension territoriale.

Ainsi, pour permettre à un exploitant de gérer un tel système, nous avons proposé une démarche en trois temps. Une première étape permet de prévoir le niveau de demande probable. Une seconde étape élabore des trajets provisoires afin de calibrer la flotte de véhicules à mobiliser et de positionner ces derniers sur le territoire. Enfin, la troisième phase gère en temps-réel les appels des usagers. Elle recalcule les trajets au fur et à mesure et les adapte à chaque nouvelle situation.

Géomatique et « intelligence artificielle » pour simuler les processus liés à la mobilité

Nous nous sommes fortement appuyé sur la géomatique pour conduire notre recherche. Les méthodes que nous avons initiées pour la simulation restent à améliorer par des collaborations avec des chercheurs en informatique. Cela est d'autant plus vrai que nos mises au point datent déjà de 2002. Néanmoins, la démarche reste valide et l'utilisation combinée de la géomatique et de l'intelligence artificielle reste encore riche de promesses.

En ce sens, nous rejoignons les propos de Langlois et Phipps qui en 1997 expliquaient déjà que *« l'utilisation des SIG devra s'échapper du domaine étroit de la description et de la manipulation de données où elle s'est confinée jusqu'à maintenant. Elle devra désormais, sous peine d'essoufflement, se tourner davantage vers les analyses multidimensionnelle et dynamique des phénomènes inscrits dans les SIG. Elle devra en particulier s'ouvrir à la simulation, car on ne contentera plus d'observer et d'analyser les faits après coup. On cherchera, autant que possible, à*

recréer sous forme d'algorithmes les systèmes complexes réels pour en comprendre le comportement et, surtout, pour en prévoir l'évolution » [Langlois & Phipps, 1997].

Les outils de géomatique dédiés au domaine des transports et de la mobilité des personnes constituent un domaine de travail passionnant. Les outils SIG existants proposent des modules permettant de répondre à de nombreux besoins mais il manque encore un outil « grand public » réellement dédié. Cet outil devrait offrir toutes les options pour intégrer les fonctionnalités spatiales et temporelles de la mobilité. L'outil dynamique doit relayer l'outil statique. Les algorithmes implémentés doivent pouvoir reproduire les processus sous forme de simulation. Enfin, la visualisation des résultats constitue l'élément terminal de la chaîne pour promouvoir et faire utiliser un tel outil.

Le parcours d'ensemble que nous avons proposé à travers cette thèse a été positivement validé par l'expérience en vraie grandeur. La qualité de ce retour venu du terrain constitue un encouragement fort mais il nous laisse entrevoir toute l'étendue du champ qui reste à explorer au terme de l'exercice.

Bibliographie

Tous les ouvrages indexés dans cette bibliographie ne sont pas appelés dans le texte, mais ont contribué à la construction de ce travail

Aron M., Boillot F., Lebacque J-P., 2001, « Modélisation du trafic – Actes du groupe de travail 1998 », Les collections de l'Inrets, 171 pages

Abdi H., 1994, « Les réseaux de neurones », Presses Universitaires de Grenoble, Flammarion, 270 pages

Académie des sciences, CADAS, 1996, « Pollution atmosphérique due au transport », rapport d'étape au 30 juin 1996, Académie des sciences, Paris, 17 pages

ANSI, 1995, Ansi. SQL, Part I to V. X3HD - 95 - 083 to 087, DBL :YOW - 003 to 007

Asher F., 1998, « La République contre la ville », éditions de l'aube, 200 pages

Asher F., 2001, « Les nouveaux principes de l'urbanisme - La fin des villes n'est pas à l'ordre du jour », éditions de l'aube, 97 pages

ATEC, 2001, « Mise en œuvre des plans de déplacements et systèmes de transports intelligents », Congrès international francophone, Paris, 24 et 25 janvier 2001, 361 pages

Baaj M.H., Mahmassani H.S., 1995, « Hybrid route generation heuristic algorithm for the design of transit networks », Transportation Research Part C 3, pages 31 à 50

Bailey T, Gatrell A., 1995, « Interactive Spatial Data Analysis », Longman Scientific and Technical, London, 413 pages

Bailly J-P, Heurigon E., 2001, « Nouveaux rythmes urbains : quels transports ? », éditions de l'aube, 221 pages

Bailly J-P., Stathopoulos N., 2000, « Les enjeux du transport public dans les villes européennes », Actes du colloque publiés avec le soutien de la Commission européenne, Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, 397 pages

Bailey T, Gatrell A., 1995, « Interactive Spatial Data Analysis », Longman Scientific and Technical, London, 413 pages

Balbo F., Pinson S., 2001, « Toward a Multi-Agent Modelling Approach for Urban Public Transportation Systems », In Workshop Engineering Societies in the Agents'World (ESAW 01), Prague, Czech Republic, 7 juillet 2001

Balbo F., 2002, « Un système d'aide à la décision appliqué au transport », Journal of Decision System, vol 11 n°1/2002, Hermès Edition, pages 7 à 31

Banos A., Izembard A., Josselin D., 2002, « Les services de transport à la demande dans leur marché et leur cadre institutionnel – étude de faisabilité d'un repositionnement socio-économique de ces marchés », Cadre juridique et institutionnel, préférences suscitées, modélisation statistique et exploratoire de la demande, Dernier rapport PREDIT, THEMA et Kéolis, 67 pages

Banos A., Bolot J., Thevenin T. (2001), « Pour un transport public personnalisé : le projet Evolis-gare », Concours du prix du développement local de la Caisse des dépôts et consignations, Besançon, 23 pages

Banos A., Josselin D., 1999, « Les services de transport à la demande dans leur marché et leur cadre institutionnel – étude de faisabilité d'un repositionnement socio-économique de ces marchés », Rapport d'étape PREDIT, Théma & VIA-GTI, 58 pages

Banos A., Josselin D., 2000, « Les services de transport à la demande dans leur marché et leur cadre institutionnel – étude de faisabilité d'un repositionnement socio-économique de ces marchés », Rapport d'étape PREDIT, Théma & VIA-GTI, 70 pages

Banos A., 2001, « Le lieu, le moment, le mouvement – Pour une exploration spatio-temporelle désagrégée de la demande en transport en commun en milieu urbain », Thèse de géographie, Université de Franche-Comte, 351 pages

Banos A., Bolot J., 2001, « Représentation surfacique d'évènements ponctuels discrets : comparaison méthodologique à partir de la distribution des accidents de la route dans la communauté urbaine de Lille », Quatrièmes Rencontres de Théo Quant, Besançon, pages 235 à 244

Beaucire F., 1996, « Les transports publics et la ville », Les essentiels Milan, 62 pages

- Beauvais J-M. & Espinasse C., 2001, « Avec ou sans voiture ? Les familles sans voiture – Les femmes pro-voitures », PREDIT 1996-2000, La documentation Française, 97 pages
- Beguïn M. Pumain D., 1996, « La représentation des données géographiques – Statistiques et cartographie », Armand Colin, 192 pages
- Bielli M., Caramia M., Carotenuto P., 2002, « Genetic algorithms in bus network optimisation », *Transportation Research Part C* 10, pages 19 à 34
- Bizet F., 1997, « Carroyage et SIG urbain : les chômeurs à Rouen », *Mappemonde*, n°2, pages 32 à 34
- Blayo F., Verleysen M., 1996, « Les réseaux de neurones artificiels », PUF, 126 pages
- Böhlen M., Bukauskas L., Eriksen P. S., Lauritzen S. L., Mazeika A., Musaeus P., Mylov P., 2003, « 3D Visual data mining – goals and experiences », *Computational Statistics & Data Analysis* 43 (2003), pages 445 à 469
- Bolot J., 1998, « Le commerce de détail à Besançon, Constitution d'une base de données spatialisées », *Maîtrise de géographie*, Besançon
- Bolot J., 1999, « Les algorithmes génétiques en géographie – Application à la construction de partitions territoriales », *DEA Structures et dynamiques spatiales*, Besançon
- Bolot J., Chatonnay P., Josselin D., 1999, « Construction and evaluation of spatial partitions to describe geographical flows », in *International Symposium on Spatial Data Quality 99*, Hong-Kong
- Bolot J., 2001a, « Calibrating models based on anticipation by genetic algorithms », *Actes du Colloque, Geocomputation, 6th International, Conference on Geocomputation*, Brisbane, 5 pages
- Bolot J., 2001b, Poster : « Transport à la demande intelligent », 12^{ème} Festival International de Géographie à St-Die-des-Vosges : « Géographie de l'innovation, de l'économique au technologique, du social au culturel », 4-7 octobre 2001
- Bolot J., Josselin D., Thevenin T., 2002, « Responsive Demand Transport in the Mobilities and Technologies Evolution. Context, concrete Experience and Perspectives », *AGILE*, Mayorque

Bondarenco N., 2001, « Architecture cadre pour les transports intelligents en France -Etude sur la localisation dynamique », Steria, METL, Commission Européenne, 166 pages

Bonnafeous A. & all, 1993, « Circuler demain », Datar & éditions de l'aube, 188 pages

Bonnafeous A. (Président), Brun G. & Nicolas J-P. (Rapporteurs), 1999, « Les transports et l'environnement », Conseil National des Transports, La documentation française, 171 pages

Boots B., Getis A., 1988, « Point pattern Analysis », Sage Publications, Newbury Park, 93 pages

Boutin Desvignes Y., Gironde M., 1996, « L'information routière », Que sais-je, Presses Universitaires de France, 125 pages

Brundson C., 1991, « Estimating probability surfaces in GIS : an adaptive technique », EGIS'91, Proceeding, Second European Conference in GIS, Brussels, Belgium, April 2-5, vol.1, EGIS Foundation, pages 155 à 164

Burdea G., Coiffet P., 1993, « La réalité virtuelle », Hermès, 402 pages

Burwell D. G., 1993, « Is anybody listening to the customers », IVHS Review

Cancalon F., Gargaillo L., 1991, « Les transports collectifs urbains – Quelles méthodes pour quelle stratégie », Celse Éditions, 337 pages

Canalda P., Chatonnay P., Josselin D., 2004, « Énumération d'arbres couvrants tentaculaires, une solution au problème de transport à la demande en convergence », IEEE International Conference Sciences of Electronic, Technologies of Information and Telecommunications, SETIT'2004, p. 146-147, 8 p., Sousse, Tunisia, march 20-25 2004.

Canalda P., Chatonnay P., Josselin D., 2003, « Optimizing the convergent and on-demand transportation. An enumerating algorithm of tentaculous spanning trees », Abstracts book of the the ECCO XVI International Conference, The European Chapter on Combinatorial Optimisation, p. 13, session Graphs, Molde University College, Norway, 5 - 7 June 2003.

Caniaux M., 1996, « Une autre culture des déplacements : pour un transport intelligent et humain », L'Harmattan, 221 pages

- Castex E., 2005, « Modélisation et formalisation des transports à la demande », Actes des 7e rencontres de Théo Quant du 26 au 28 janvier 2005 à Besançon, 7 pages
- Cellier J. & Cocard M., 2001, « Traiter des données historiques, Méthodes statistiques - Techniques informatiques », Presses Universitaires de Rennes, 245 pages
- CEMT, 2000, « Transports urbains durables : la mise en œuvre des politiques », Rapport final, Conférence européenne des ministres des transports, OCDE, 58 pages
- CEMT, 1995, « Transports urbains et développement durable », Conférence européenne des ministres des transports, OCDE, 266 pages
- CERTU, 2002, « Systèmes de transports à la demande – Enquêtes sur les caractéristiques et les modes d'exploitation », 112 pages
- CERTU, 2000, « Simulation dynamique du trafic routier », Aménagement et exploitation de la voirie, 147 pages
- Chadule (Groupe), 1994, « Initiation aux pratiques statistiques en géographie », Masson, 170 pages
- Chapelon L., 1997, « Offre de transport et aménagement du territoire : évaluation spatio-temporelle des projets de modification de l'offre par modélisation multi-échelle des systèmes de transport », Thèse de géographie, CESA, Tours, 562 pages
- Chardonnel S., du Mouza C., Fauvet M.-C., Josselin D., Rigaux P., « Patrons de mobilités : proposition de définition, de méthode de représentation et d'interrogation », 7ème Journées CASSINI, GDR SIGMA, Géomatique et Analyse Spatiale, 2-4 juin 2004, MSH de Grenoble, pp. 19-25
- Cocquerez P. Philipp S., 1995, « Enseignement de la physique, traitement du signal. Analyse d'images : filtrage et segmentation », Masson, 457 pages
- Coindet J-P. , 1996, « Gestion des transports urbains – Le marché des déplacements urbains », INRETS, 19 pages
- Cohen S., 2001, « Exploitation et télématique routière – éléments d'évaluation socio-économique », Les collections de l'INRETS, 153 pages
- Cormen T., Leiserson C., Rivest R., 2000, « Introduction à l'algorithmique », Dunod, 982 pages
- Coutherut C., 1999, « Les transports à la demande », Maîtrise de géographie, Besançon, 112 pages

Coutras J., 1990, « Vie familiale et organisation des transports : des inconciliables », Villes et transports, pages 407 à 414

Coutrot B. & Drosbeke J.-M., 1990, « Les méthodes de prévision », PUF, Que sais-je, n° 2157, 126 pages

Créput J.-C., Koukam A., Gwiazdzinski L., 2002, « Grilles auto-organisatrices pour le dimensionnement de parcours de véhicules adaptés à la demande », 3^{ème} conférence internationale en recherche opérationnelle, Marrakech, 4-6 juin 2002

Darwin C., 1859, « L'origine des espèces », réédité par Flammarion en 1992, 592 pages

Datar, DTT, Ademe, 2004, « Services à la demande et transports innovants en milieu rural, de l'inventaire à la valorisation des expériences », Rapport final Adetec, novembre 2004, 268 pages

De Sède M.-H., Moine A., 2001, « L'approche systémique comme outil de structuration de bases de données spatio-temporelles », Théo Quant 1999, Besançon, pages 65 à 77

Didier S., 1999, « Disney urbaniste : la ville de Celebration en Floride », Cybergeog

Direction Régionale de l'Équipement – Franche-Comté, 1999, « Modèle régional de déplacements de personnes », Rapport d'avancement, 30 pages

Dobias G., Baret F., Péan S., 2005, « Propositions pour fédérer les stratégies de déploiement des ITS en France – une nouvelle étape pour répondre aux enjeux sociétaux », ITS France, 66 pages

Doucet A., Jomier G., 2001, « Bases de données et Internet : Modèles, langages et système », Hermès, 420 pages

Dumas M., Fauvet M.-C., Scholl P.-C., 2001, « Modèles et langages pour données temporelles », in Bases de données et Internet sous la direction de Doucet A. & Jomier G., Hermes Sciences

Dumas M., 2000, « Tempos : une plate-forme pour le développement d'applications temporelles au-dessus de SGBD à objets », Thèse de doctorant, Université Joseph Fourier, Grenoble

Dumolard P., 1981, « L'espace différencié », *Économica*, 201 pages

Dupuy G., Bost F., 2000, « L'automobile et son monde », éditions de l'aube, 216 pages

- Dupuy G., 1985, « Systèmes, réseaux et territoires », Presses de l'ENPC, 166 pages
- Dupuy G. et alii, 1988, « L'urbanisme des réseaux », Paradigme, 280 pages
- Dupuy G., 1991, « L'urbanisme des réseaux », Armand Colin, 190 pages
- Dupuy G., 1995, « Les territoires de l'automobile », Anthropos, 216 pages
- Dupuy G., 1995, « L'auto et la ville », Flammarion, Collection Dominos, 125 pages
- Dupuy G., 1999, « La dépendance automobile – Symptômes, analyses, diagnostic, traitements », Anthropos, collection villes, 157 pages
- Ertico, 2002, « Les ITS dans notre vie quotidienne », Ertico-ITS Europe, 96 pages
- Fauvet M-C, Chardonnel S., Dumas M., Scholl P-C., Dumolard P., 1998, « Analyse de données géographiques : applications des Bases de Données Temporelles », Revue internationale de Géomatique, Volume 8, n°1-2
- Fauvet M.-C., Daassi C., Rigaux P., Josselin D., du Mouzac., Duams Menjivar M., Bolot J., Scholl P.-C., Dumolard P., Scholl M., Chardonnel S., 2001, « Système d'Information Géographique spatio-temporelle : application aux problèmes de mobilité », Rapport Final, PSIG 2001, 100 pages
- Ferber J., 1995, « Les systèmes multi-agents », Paris, Inter-Edition
- Ferrand N. (Coordinateur Scientifique), 1998, « Modèles et systèmes multi-agents pour la gestion de l'environnement et des territoires », Cemagref éditions, Seuil, 464 pages
- Fernandez Ostolozza J., Moreno Bergareche A., 1997, « La vie artificielle », Seuil, 147 pages
- Finke G. et all, 2002, « Recherche opérationnelle et réseau : Méthodes d'analyse spatiale », Hermès, 265 pages
- Fougères A.J. 2000, « Un système tutoriel intelligent pour la formation des régulateurs de trafic d'une compagnie de transport en commun », Colloque sur la multimodalité, Mai 2000, IMAG, Grenoble, 3 pages
- Gallez C., Orfeuill J.-P., Polacchini R., 1997, « L'évolution de la mobilité quotidienne : croissance ou réduction des disparités ? », *Recherche Transports Sécurité*, n° 56, pages 27 à 42.
- Garaix T., Josselin D., Feillet D., Artigues C., Castex E., 2005, « Transport à la demande points à points en zone peu dense. Proposition de méthode d'optimisation

de tournées », proceedings of the International Conference on Spatial Analysis and GEOmatics, SAGEO 2005, ISBN 2-910545-06-7, Avignon, 20-23 juin 2005, France, 12 pages

Gargaillo L., Planche O., 1994, « Les transports collectifs interurbains – des transports pour demain ? », Celse Editions, 124 pages

GART, 1997, « Le transport à la demande, état de l'art et perspectives », Rapport public de recherche, 97 pages

Gattrel A., 1994, « Density estimation and the visualization of point patterns », in Visualization in geographical information systems, John Wiley and Sons, Chichester, pages 65 à 75

Gattrel A., Bailet T., Diggle P., Rowlingson B., 1996, « Spatial point pattern analysis and its application in geographical epidemiology », Transactions of the Institute of British Geographers, n°21, pages 256 à 274

Gell-Mann M., 1995, « Le quark et le jaguar – Voyage au cœur du simple et du complexe », Albin Michel Sciences, 418 pages

Genre-Grandpierre C., 2000, « Forme et fonctionnement des réseaux de transport : approche fractale et réflexions sur l'aménagement des villes », Thèse de doctorat, Université de Franche-Comte, 360 pages

Ghédira K., 2004, « Approche multi-agent pour la tournée de véhicules », Ecole de printemps sur Logistique et Transport (LT 2004), 22-24 mars 2004, Tunisie

Godart F., 2001, « La ville en mouvement », Galimard, Altran, 124 pages

Goldberg D. E., 1994, « Algorithmes génétiques, exploration, optimisation et apprentissage automatique », Addison-Wesley, 410 pages

Gruer P., Hilaire V., Kozlak j., Koukam A., 2003, « A multi-agent to modeling and simulation of transport on demand problem », In Artificial intelligence and security in computing systems, Kluwer Academic Publishers, pages 119 à 126

Guermond Y., 1995, « Information, informatique et système d'information géographique », in *Encyclopédie de Géographie*, Economica, Paris, pages 295 à 310

Guermond Y., 1984, « Analyse de Système en Géographie », Presses universitaires de Lyon, 321 pages

Guigo M., 1995, « Gestion de l'environnement et systèmes experts », Masson, 177 pages

- Hägerstrand T., 1970, « What about people in regional science ? », In Proc. Of the Ninth European Congress of the Regional Science Association, Regional Science Association Papers
- Haggett P., 1973, « L'analyse spatiale en géographie humaine », Armand Colin, 390 pages
- Héran F., 2000, « Transports en milieu urbain : les effets externes négligés », PREDIT 1996-2000, La documentation Française, 113 pages
- Héran F., 1999, « Évaluation de l'effet des coupures urbaines sur les déplacements des piétons et des cyclistes, Drast, PREDIT
- Holland J., 1975, « Adaptation in Natural and Artificial Systems », Ann Arbor, University of Michigan Press, 390 pages
- Holldobler W., Wilson E.O., 1990, « The Ants », Harvard University Press
- Houot H., 1999, « Approche géographique des nuisances sonores urbaines – méthodologie d'aide à la prise en compte des nuisances sonores en aménagement urbain : application à la ville de Besançon », thèse de doctorat en géographie, Besançon, 326 pages
- Hourcade J., 1996, « Quelle mobilité pour demain ? », Les presses de l'institut du transport aérien, 160 pages
- Houzet S., Josselin D., 2004, « Rapport d'étude de la faisabilité de l'extension du service Evolis-gare sur le périmètre de la Communauté d'Agglomération du Grand Besançon », CAGB-ADEME, mai 2004, 57 pages
- Huguenin-Richard F., 2000, « Approche géographique des accidents de la circulation : proposition des modes opératoires de diagnostic. Application au territoire de la métropole lilloise », thèse de doctorat de géographie, Besançon, 322 pages
- Iaurif, 2000, « Les transports dans les grandes métropoles – Réflexions actuelles », Les cahiers de l'IAURIF, N° 127, 2^e trimestre 2000, 119 pages
- INSEE Franche-Comté, 1995, « Bassins de vie, bassins d'emploi : des pôles aux bassins », Le magazine
- INSEE, 1996,, « Enquête Transports et Communications », 1993-94, Paris, 133 pages
- INSEE Franche-Comté, 1998, « Zonages en Franche-Comté », Conseil économique et social de Franche-Comté

Isaaks E., Srivastar R., 1989, « An introduction to applied geostatistics », Oxford University Press, 561 pages

ISO, 1992, Database Language SQL ISO/IEC 9075

Janin J-F., 2001, « Nouvelles Technologies et Systèmes de Transport Intelligents », Conseil Général des Ponts et Chaussées, Ministère de l'Équipement, des Transports et du Logement, 22 pages

Juan S., 1997, « Formes et genres de vie du point de vue de la mobilité : la relation parcours-vitaux / usages de la vie quotidienne », in *Les sentiers du quotidien : rigidité, fluidité des espaces sociaux et trajets routiniers en ville*, pages 151 à 175

Josselin D., 1999, « A la recherche d'objets géographiques composites avec le prototype ARPEGE », *Revue internationale de géomatique*, Volume 9, n°4, pages 489 à 505

Josselin D., Bolot J., Thevenin T., Banos A., Chatonnay P., Lang C., Canalda P., Dupont B., Senecat L., Marguier A., Bourgeay E., 2002, Transport à la demande en milieu urbain : l'expérience bisontine, *Images de Franche-Comté*, n°26, décembre 2002, pp.10-13.

Josselin D., Bolot J., Chatonnay P., 2000, « Optimisation de découpages territoriaux. Proposition de méthodes d'agrégation spatiale dirigée », *Revue internationale de Géomatique*, Volume 10 - N°3-4/2000, SIG, aménagement du territoire et environnement, Cassini'2000

Josselin D., Genre-Grandpierre C., 2005, Des transports à la demande pour répondre aux nouvelles formes de mobilité. Le concept de Modulobus, *Mobilités et temporalités*, (Eds : Montulet B. et al.), Facultés Universitaires Saint-Louis, Bruxelles, pp. 151-164.

Josselin D., Houzet S., Genre-Grandpierre C., 2006, « Transport à la demande, TICs et pratiques des territoires », in *Quatre ans de recherche urbaine 2001-2004*, ACI-Ville Ministère de la Recherche, Collection Perspectives Villes et Territoires, n° 13, volume 2, pp. 375-380, PU François Rabelais, MSH Villes et Territoires

Josselin D., Bolot J., Thevenin T., Banos A., Chatonnay P., Lang C., Canalda P., Dupont B., Senecat L., Marguier A., Bourgeay E., 2002, « Transport à la demande en milieu urbain : l'expérience bisontine », *Images de Franche-Comté*, n°26, pages 10 à 13

- Kaufmann V., Jemelin C., Guidez J-M., 2001, « Automobiles et modes de vie urbains : quel degré de liberté », PREDIT 1996-2000, La documentation Française, 166 pages
- Kaufmann V., Jemelin C., Joyce D., 2000, « Intermodalité et interfaces : sociologie des usages », Rapport final, IREC, EPFL, 59 pages
- Kaufmann V., 2000, « Mobilités quotidienne et dynamiques urbaines : La question du report modal », Presses polytechniques et universitaires romandes, 233 pages
- Karamali A., 2002, « Galileo, le programme européen de navigation par satellite », Division des publications de l'ESA, 32 pages
- Kohonen T., 1982, « Clustering, Taxonomy, and Topological Maps of Patterns », 6th International Conference on Pattern Recognition
- Kohonen T., 2001, « Self-organization maps and associative memory », Springer Verlag, Berlin
- Lajoie G., 1992, « Le carroyage des informations urbaines », Rouen, Presses Universitaires de Rouen, 238 pages
- Lang C., Thevenin T., Chatonnay P., 2002, « A pathfinding algorithm for a geo-statistical analysis of a public transportation network », GIS-T conference, Atlanta (USA), 12 pages
- Langlois A., Philipps M., 1997, « Les automates cellulaires : application à la simulation urbaine », Hermès, 197 pages
- Laurini R., Thompson D., 1992, « Fundamentals of spatial information systems », Academic Press, London
- Laurini R., Milleret-Raffort F., 1993, « Les bases de données en géomatique », Hermès, 340 pages
- Le Breton E., 2000, « Le transport à la demande comme innovation institutionnelle : trois cas français, Le transport à la demande, un nouveau mode de gestion des mobilités urbaines », pages 97 à 139.
- Lebreton E., Ascher F., Bourdin A., Charrel N., Ducroux L., Prins M., Pycha A., 2000, « Le Transport à la Demande, un nouveau mode de gestion des mobilités urbaines », ARDU, rapport PREDIT.
- Le Breton E., 2002, « Les transports urbains et l'utilisateur : Voyageur, client ou citoyen ? », L'Harmattan, 255 pages

Lebreton J., Beaucire F., 2000, « Transports publics et gouvernance urbaine », Les essentiels Milan, 127 pages

Lefevre C., Offner J-M., 1990, « Les transports urbains en question : usages, décisions, territoires », Éditions Celse, Paris, 221 pages

Le Pape C., 2004, « Méthodes et outils d'optimisation pour l'ordonnancement et le routage de véhicules », Ecole de printemps sur Logistique et Transport (LT 2004), 22-24 mars 2004, Tunisie

Longley P., Goodchild M., Maguire D., Rhind D., 2001, « Geographic information Systems and Science », Wiley, Esri press, 450 pages

McQueen B. & McQueen J., 1999, « Intelligent Transportation System Architectures », Artech House Publishers, 467 pages

Madre J. L. & Maffre J., 1997, « La mobilité des résidents français : panorama général et évolution », Recherche Transports Sécurité, n° 56, pages 9 à 26

Mainguenaud M. et all., 2002, « Langages pour les SIG – Conception, développement et IHM », Hermès, 263 pages

Massot M.-H., 1995, « Espaces de vie, espaces de travail : 15 ans d'évolution », Document INRETS, 114 pages

Massot M.-H., 1998, « Espace de vie, espace de travail », in *Données Urbaines 2*, pages 147 à 156.

Mattei M-F., Pumain D., 2000, « Données urbaines 3 », Anthropos, 433 pages

Mérenne E., 1995, « Géographie des transports », Nathan Université, 192 pages

Merlin P., 1984, « La planification des transports urbains », Masson, 220 pages

Merlin P., 1991, « Géographie, économie et planification des transports », Presses Universitaires de France, Paris, 472 pages

Merlin P., 1992, « Les transports urbains », PUF, Que sais-je ?, 126 pages

Merlin P., 1995, « La ville », Encyclopaedia Universalis

Mignot C., 2001, « Mobilité urbaine et déplacements non motorisés », PREDIT 1996-2000, La documentation Française, 78 pages

Moncan De P., 1998, « Villes rêvées », Les éditions du Mécène, 190 pages

- Moustacchi A. & Payan J-J., 1999, « L'automobile : avenir d'une centenaire », Dominos, Flammarion , 126 pages
- Newman P., Kenworthy J., 1996, « Formes de la ville et transports : vers un nouvel urbanisme », Cahiers de l'IAURIF, n° 114, pages 99 à 109
- Nicolas J-P., Pochet P., Poimboeuf H., 2002, « Mobilité urbaine et développement durable : quels outils de mesure pour quels enjeux ? », Les Cahiers scientifiques de Transport, N° 41/2002, pages 53 à 76
- Nouvier J., 2001, « Sécurité routière et télématique : où en sommes-nous ? », ITS-France, Groupe de travail « Télématique et sécurité routière », 15 pages
- ONU, 2001, « Énergie et transports », Rapport du secrétariat général, Sommet mondial du développement durable du 30 avril au 2 mai 2001
- Orfeuil J.P., 2000, « L'évolution de la mobilité quotidienne, Comprendre les dynamiques, éclairer les controverses », Les collections de l'INRETS, Synthèse n°37, 146 pages
- Orfeuil J.P., 1996, « L'évolution de la mobilité dans les années 80 », Avant-projet, INRETS, 17 pages
- Orfeuil J.P., 1994, « Je suis l'automobile », éditions de l'aube, 85 pages
- Orselli J, Chanaron J-J., 2001, « Vers l'automatisation de la conduite », Paradigme, 306 pages
- Pantazis D. M., Donnay J-P., 1996, « La conception de SIG – méthode et formalisme », Hermès, 341 pages
- Parent C. et all, 2001, « Mads ou l'information spatio-temporelle à portée de ses utilisateurs », Quatrièmes Rencontres de Théo Quant, Besançon, pages 79 à 87
- Passégué S. , 1996, « L'accessibilité aux équipements en milieu rural. Analyse spatiale à travers un S.I.G. raster. Application aux pays et arrière-pays du Rhône moyen. », Thèse de Géographie, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse
- Pawlowski A., 1998, « Séries temporelles en linguistique », Honoré Champion, 310 pages
- Péan S., 2004, « Le déploiement des ITS en France – Réalisations et Stratégies », Thèse professionnelle – Mastère spécialisé SIT
- Pény A., Wachter S., 1999, « Les vitesses de la ville », éditions de l'aube, 195 pages

Philippe G. et all, 2001, « Les transports intelligents », Hermès Sciences Publications, 253 pages

Pinchemel P. & G., 1995, « La face de la terre – Éléments de géographie », Armand Colin, 253 pages

Plassard F., 1995, « Les réseaux de transport et de communication », Encyclopédie de géographie, *Économica*, pages 515 à 538

Predit, 2000, « Formes urbaines du futur et mobilité non-motorisée », Actes du séminaire du 17 décembre 1999, 72 pages

Predit-Afiv, 2000, « Actions fédératives Intermodalité Voyageurs / Information Communication », Rapport public de recherche, 67 pages

Price W.L., 1974, « Introduction aux graphes et aux réseaux », Masson, 115 pages

Prud'homme R., Darbera R., Newbery D., Dieckman A., Elbeck B., 1999, « Notre système de transport actuel est-il durable ? », Presses de l'école nationale des ponts et chaussées, 91 pages

Pumain D., Mattei M-F., 2003, « Données urbaines 4 », *Anthropos*, 433 pages

Pumain D., Saint-Julien T., 1997, « L'analyse spatiale – localisations dans l'espace », A. Colin, 167 pages

Pumain D., Saint-Julien T., 2001, « Les interactions spatiales », A. Colin, 186 pages

Rennard J-P., 2002, « Vie artificielle – Où la biologie rencontre l'informatique », Vuibert, 397 pages

Renders J-M., 1995, « Algorithmes génétiques et réseaux de neurones », Hermès, Collection Systèmes complexes, 330 pages

Richaudeau F., 1999, « Des neurones des mots et des pixels », Atelier Perrousseau Editeur, 155 pages

Ries R. (Président), 2002, « Transports urbains », Commissariat général du plan, note d'étape du groupe Transports urbains, 45 pages

Robert M., 2005, « Pour en finir avec la société de l'automobile », CarFree France, 50 pages

Rosenbloom S. et all, 2000, « Transport et vieillissement de la population », Conférence européenne des ministres des transports, Centre de recherche économiques, 270 pages

- Rouet P., 1991, « Les données dans les systèmes d'information géographique », Hermès, 341 pages
- Sain S., 1994, « Adaptive Kernel density estimation », Thesis, Rice University, Houston, Texas, 128 pages
- Sakarovitch M., 1984a, « Optimisation combinatoire – Méthodes mathématiques et algorithmiques – Graphes et programmation linéaire », Hermann, Enseignement des sciences, 240 pages
- Sakarovitch M., 1984, « Optimisation combinatoire – Méthodes mathématiques et algorithmiques – Programmation discrète », Hermann, Enseignement des sciences, 266 pages
- Salomon I., Bovy P., Orfeuil J.-P., 1993, « A billion trips a day », Dordrecht, Boston, Londres, Kuwer Academic Publishers
- Sanders L. et all., 2001, « Modèles en analyse spatiale », Hermès, 329 pages
- Scholl P-C., Fauvet M-C., Canavaggio J-F., 1999, « Un modèle d'historique pour un SGBD temporel », Technique et science informatique
- Scholl M., Voisard A., Peloux J-P., Raynal L., Rigaux P. , 1996, « Systèmes de Gestion de Bases de Données Géographiques », International Thomson Publishing, 185 pages
- SERC, 1993, « Cities and Sustainability », Science and Engineering Research Council : AFRC-SERC, Clean Technology Unit, Swindon, Royaume-Uni
- SmallWorld, 1994-1997. GIS 2 Case Tool Tutorial
- Soulhi A., 2000, « Contribution de l'intelligence artificielle à l'aide à la décision dans la gestion des systèmes de transport urbain collectif », Thèse d'informatique, Lille
- Stewart D, 2000, « L'Ouest américain menacé par le béton », Le Monde Diplomatique, juillet 2000
- TempsXEspace, 1999, « Représentation de l'espace et du temps dans les SIG », Hermès, 121 pages
- Thevenin T., Fauvet M.C., Josselin, 2002., « Modélisation spatio-temporelle d'un réseau de transport public – articulation intermodale d'un réseau de bus, d'un transport à la demande et d'un espace piétonnier », actes des 6^e journées Cassini, Crozon, pages 163 à 186.

Thevenin T., Fauvet M.C., Josselin D., 2003, « Modélisation spatio-temporelle d'un réseau de transport public, Articulation intermodale d'un réseau de bus, d'un Transport à la Demande et d'un espace piétonnier », N° spécial « transport », vol. 13, n°2, Revue Internationale de Géomatique, Hermès, Lavoisier, Paris, pp. 157-180.

Thevenin T., 2002, « Quand l'information géographique se met au service des transports publics urbains - Une approche spatio-temporelle appliquée à l'agglomération bisontine », Thèse de géographie, Université de Franche-Comte, 242 pages

Thierry D. et al., 1998, « Nouvelles technologie de communication : impact sur les métiers », Lannion, Novembre 1997-Avril 1998, L'harmattan Communication, 252 pages

Thierry D. et al., 2000, « Nouvelles technologie de communication : nouveaux usages ? nouveaux métiers », Lannion, décembre 1999-mai 2000, L'harmattan Communication, 262 pages

Thiria S., Lechevalier Y., Gascuel O., Canu S., 1997, « Statistique et méthodes neuronales », Dunod, 310 pages

Tierney L., 1990, « Lisp-Stat, an object-oriented environment for statistical computing and dynamic graphics », John Wiley and Sons, New York, 397 pages

Tisseau G., 1996, « Intelligence artificielle – Problèmes et méthodes », Presses Universitaires de France, Psychologie et sciences de la pensée, 255 pages

Trépanier M. et Chapleau R., 1996, « Un modèle d'analyse désagrégée des générateurs de déplacements : vers une connaissance détaillée de l'utilisation des lieux urbains », 31^e congrès de l'association québécoise du transport et des routes

Tukey J., 1977, « Exploratory data analysis », Addison-Weley, Reading, Massachusetts, 688 pages

Turton I., Openshaw S. et Diplock G., 1996, « Some geographical applications of genetic programming on the Cray T3D in C », Jesshope and A. Shafarenko (eds). UK Parallel'96, Springer, Berlin, pages 135 à 150

Voiron-Canicio C., 1995, « Analyse spatiale et analyse d'image par la morphologie mathématique », Reclus, 190 pages

Wachowicz M., 1999, « Object-oriented design for temporal GIS », Taylor & Francis, London, 118 pages

- Waters N., 1999, « Transportation GIS: GIS-T », in Geographical information systems : principles and applications (dir : Longley P., Maguire D., Goodchild M., Rhind D.), Vol 2, Wiley, New-York, pages 827 à 844
- Weill M., 1997, « L'urbanisme », Les essentiels Milan, 55 pages
- Wiel M., 1992, « La pérégrination, mobilité et organisation de l'espace à Brest », Rapport PREDIT, 77 pages
- Wiel M., Rollier Y., 1993, « La pérégrination au sein de l'agglomération : constats à propos du site de Brest », Les Annales de la Recherche urbaine, n° 59-60, pp. 151-161
- Wiel M., 1997, « Comportements de mobilité et évolution de l'organisation urbaine », Rapport du FIER, n° 23, 55 pages
- Wiel M., 1998, « Comment gérer la transition urbaine », Recherche Transports Sécurité, n° 58, pages 3 à 18
- Wiel M., 1999a, « Mobilité, système d'interactions sociales et dynamiques territoriales », Espace, Populations, Sociétés, n° 2, pages 187 à 194
- Wiel M., 1999b, « La transition urbaine ou le passage de la ville pédestre à la ville motorisée », Editions Mardaga, Paris, 225 pages
- Woessner R., 2002, « La reconquête de la ville par les transports en commun », Entre Rhône et Rhin, n°39, été 2002
- Ygnace J-L., De Banville E., 1999, « Les systèmes de transport intelligent – Un enjeu stratégique mondial », La documentation française, 126 pages
- Zahavi Y., 1980, « Travel Characteristics in Cities of Developing and Developed Countries », World Bank Staff Working Paper, n°230

Annexes

Evolis-Gare : couverture médiatique, marketing et publicité

Tout l'U, avril 2002, Dossier « Evolis Gare, ils parlent de leur métier »

En direct, juin 2002, « Evolis Gare : un concept innovant de transport à la demande »

L'est Républicain, février 2002, Evolis-Gare, Remise du prix du développement local

Plaquette nationale de Kéolis, centrale d'information

Dépliant et marque-page édités par la Ctb

Pages Web Ginko, information & réservation

Guide horaire SNCF & TER édité par le **Conseil Régional de Franche-Comté**

Page Web de la SNCF

Tout l'U, avril 2002, Dossier « Evolis Gare, ils parlent de leur métier » - recto

tout l'U

DOSSIER

Evolis gare, le transport à la demande



Mettre sur pied un service de transport différent, à la fois complément des bus de ville et alternative à la voiture individuelle, tel est le challenge accepté et remporté par trois étudiants de géographie. Arnaud Banos, Jérôme Bolot et Thomas Thévenin, doctorants au laboratoire THÉMA, ont créé l'innovation à Besançon. Evolis gare, ça vous dit quelque chose ? Fruit d'un partenariat entre la société Keolis et l'Université, Evolis gare est un service de transport à la carte, tout spécialement étudié pour prendre en charge, de leur domicile à la gare SNCF, les courageux et matinaux voyageurs sur TGV. Un projet récompensé par le prix du développement local de la ville de Besançon et salué par les professionnels. Une expérience et un pari réussis pour les trois compères !

5 h 40, départ du TGV de la gare Victor pour Lille.

5 h 05, premier TGV pour Paris... Réveiller son conjoint pour qu'il vous emmène à la gare ou prendre sa voiture pour la laisser toute la journée sur le parking, de toute façon il s'y a pas de lieu à cette heure-ci, et puis, un taxi, c'est trop cher... Les départs de patron-mécanicien étaient souvent compliqués. Étaient, parce que depuis plus d'un an maintenant, Evolis gare apporte une solution simple, rapide et peu coûteuse aux usagers bésançons du TGV.

Jugés plutôt. Le voyageur téléphone la veille de son départ, jusqu'à 18 h 05, à un numéro correspondant à un service particulier au sein de la CTB. Il réserve son service Evolis pour l'un des trois premiers TGV du matin. Il donne l'heure de son TGV et ses adresses. L'opérateur lui propose alors le lieu de prise en charge le plus proche de son domicile et l'heure de passage du taxi qui le conduira à la gare. Le prix maximum de la course est de 18 F.

"Pour les trains du soir, le service est identique et pousse aux usagers des transports en commun après 18 h" conclut Arnaud Banos. Evolis s'appuie sur cinq engagements, tous relatifs au temps, permettant de garantir au voyageur un laps de temps de 30 minutes entre le départ de son domicile et le départ du TGV.

Un logiciel sur mesure

Simple, sûr et efficace, le service s'appuie sur un logiciel innovant et performant, intégré à des étapes et des calculs complexes pour permettre à l'opérateur CTB de s'engager en quelques secondes auprès du client sur l'heure et le lieu de sa prise en charge. RESAD2, c'est son nom, a été entièrement mis au point par les trois sortiers de l'équipe THÉMA, en collaboration avec le laboratoire d'informatique de l'Université. Tout est consigné dans le logiciel : les adresses CTB et les autres, ceux qui ont virtuellement été créés pour compléter le réseau CTB et assurer ainsi une prise en charge à moins de 5 mn à pied des habitations, les 14 000 adresses postales bésançonnaises à mettre en relation avec les différents arrêts, les parcours étudiés en fonction de la distance, de la sensibilité et de la vitesse autorisée, pour ne pas excéder 15 mn. "Le logiciel a demandé plusieurs mois de travail pour être parfaitement opérationnel" raconte Jérôme Bolot.

Au final et sur l'écran de l'opérateur, voilà le traitement de la demande (toujours ci-contre).

Toujours par l'intermédiaire du logiciel RESAD2, l'opérateur CTB établit une feuille de route pour les taxis, indique aux chauffeurs le lieu des clients, les lieux et les horaires de passage pour le lendemain. La boucle est bouclée, les passagers sont dans le train, le service fonctionne bien.

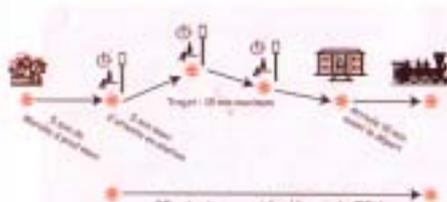
Des résultats prometteurs

Pour preuve, les chiffres annoncés au terme d'une première année d'exploitation. 10 000 km parcourus, 1 100 courses réalisées, 600 clients... satisfait à 95 % du service ! (enquête mai 2001) A noter que 30 % des clients utilisent, avant d'adopter le système Evolis, leur véhicule personnel. "Evolis contribue ainsi à soulager les encombrements du parking de la gare" se félicitent les trois compères.

Cette première année a permis de marquer l'intérêt du projet et de renforcer l'implication des partenaires concernés comme la SNCF et les compagnies de taxis. Et l'avenir ? "Le Contrat de Développement du Grand Besançon souhaite étendre le service Evolis aux 57 communes de la communauté. De nouveaux problèmes en perspective pour RESAD2 puisqu'il lui faudra gérer des temps de parcours sur de plus longues distances et des regroupements de clients situés à plusieurs kilomètres les uns des autres".

Evolis n'a pas fini de faire parler de lui. Sa conception peut être adaptée à d'autres villes comme à d'autres destinations : aéroports, centres commerciaux, centres de loisirs, zones industrielles... Ainsi la zone de Techeland-Montbéliard a déjà fait l'objet d'une étude, toujours par la fameuse équipe THÉMA. "Il s'agit d'offrir un accès en transport collectif aux salariés sur les 28 communes du Pays de Montbéliard, 24 h/24".

A une époque où les distances s'allongent, où les individus sont de plus en plus mobiles et autonomes, où la demande prend des formes multiples et variées, le transport à la carte semble incontournable pour compléter le transport public traditionnel. Loin de concurrencer la vocation de service public équitaire des bus et autres cars, il va dans la même direction en offrant un accès pour tous aux infrastructures, aux services et aux emplois.



Des engagements correspondant aux attentes des clients :

- 1 - La prise en charge du client s'effectue à une station située à moins de 5 minutes à pied de son domicile
- 2 - Le temps d'attente à la station est de 5 mn : c'est mieux que l'attente des usagers, 60 % acceptaient 10 mn.
- 3 - Le temps de trajet est de 15 mn maximum.
- 4 - L'arrivée en gare est faite à 15 mn avant le départ du TGV pour éviter les attes.
- 5 - 18 F pour le service, c'est le prix adopté pour assurer son bon fonctionnement. Une réduction est accordée aux abonnés CTB et SNCF, ainsi qu'aux clients voyageant accompagnés. "Contrairement aux réductions de ce type, aucun lien familial ou civique n'est demandé pour bénéficier de cette réduction. Le regroupement n'est pris en considération" explique Thomas Thévenin.



tout l'U Dossier avril 2002

Tout l'U, avril 2002, Dossier « Evolis Gare, ils parlent de leur métier » - verso



Thomas, Arnaud et Jérôme au pays des kangourous... au cours de recherches de géographie qui mènent loin.

Thomas Thévenin : intermodaliser les territoires de la mobilité quotidienne
L'intermodalité suscite un grand intérêt de la part des pouvoirs publics, puisque la commission européenne (Task Force Intermodality), le ministère des Transports, le ministère de l'environnement entre autres, ont placé cette thématique parmi leurs priorités. Ces organismes considèrent l'articulation entre les différents modes de transport selon trois orientations clés : la tarification, la qualité des pôles d'échanges et d'information multimodale. Afin de dépasser ces trois mots d'ordre, j'ai choisi d'orienter ma réflexion sur l'évaluation de la qualité des connexions entre les stations de transport public.

Thomas Thévenin prépare une thèse de géographie intitulée : *Méta analyse spatio-temporelle d'un projet de transport public métropolitain.*

Arnaud Banos : une géographie orientée vers l'action
Appliqué et impliqué, ce travail universitaire l'est à plus d'un titre. Partageant, pendant ces trois années de thèse, mon temps entre l'équipe THAMA et le service marketing du groupe Kéolis, j'ai dû faire l'apprentissage d'un métier nouveau, opérationnel par tradition mais aussi par nécessité. Universitaire de formation, mon souci permanent fut de m'adapter aux exigences de ce concret opérationnel, sans y perdre pour autant ma culture. Géographe par choix et par goût, je devais également préserver la spécificité de mon regard, tout en trouvant ma place parmi les ingénieurs transport et les spécialistes du marketing avec qui j'étais amené à collaborer.

Arnaud Banos a soutenu avec succès sa thèse en décembre 2001 à Besançon sur le thème : *Le taxi, le camion, le mouvement : pour une exploration spatio-temporelle désagrégée de la demande de transport en commun en milieu urbain.*

Jérôme Bolot : transport à la demande en temps réel
Des solutions innovantes, directement issues de nos travaux, permettent de mener à bien le projet qui fonctionne depuis octobre 2000. Néanmoins, je suis loin de me reposer : Evolis n'est qu'un premier "pas" pas dans mes recherches. Ma thèse doit aboutir à un système fonctionnant en temps réel. C'est-à-dire sans que les usagers réservent préalablement, comme c'est le cas actuellement. Cette recherche géographique déborde légèrement sur les domaines de l'informatique et de l'intelligence artificielle. L'ensemble des travaux sont régulièrement communiqués dans des colloques français et étrangers (Hong Kong, Angleterre, Australie, Etats Unis, Espagne). Cet apprentissage au métier de chercheur prendra fin à l'automne, date à laquelle je pourrai passer de l'autre côté avec un joli titre de docteur, si la soutenance de thèse se déroule bien.

Jérôme Bolot prépare une thèse de géographie sur : *Le transport à la demande en temps réel. Anticipation, optimisation et modification d'informations spatio-temporelles.*

Evolis gare ?

Léonard Orléan Josselin, chargé de recherche au CNRS et responsable du projet au laboratoire THAMA, en parle...

- **Dis, raconte-moi Evolis...**
- Evolis est le fruit d'une recherche pluridisciplinaire qui a réuni la laboratoire de Géographie THAMA, unité mixte de recherche Université-CNRS, le Laboratoire d'Informatique de Franche-Comté, Besançon et Belfort et le CTB, qui est une filiale du groupe Kéolis de la SNCV.
- **Je croyais que la pluridisciplinarité, cela n'existait que dans les grands discours !?**
- C'est vrai que c'est délicat à mettre en oeuvre, mais avec une bonne équipe méthode et soubise, ça marche !
- **Mais pourquoi avoir réuni ces organismes ?**
- C'est bien simple : pour réaliser un travail efficace, il nous fallait des compétences en analyse spatiale, en informatique, mais aussi des connaissances "terrain" et marketing. THAMA a apporté la vision géographique de ce que pouvait être un transport à la demande et comment le "modéliser", le LPC a développé des algorithmes pour optimiser les dessertes et le CTB s'est occupé de la définition commerciale du produit et de la communication.
- **Ça a dû coûter beaucoup d'argent ?**
- La recherche a nécessité environ 100 000 €. Les financements sont venus essentiellement du programme PREDIT et de l'Institut des Sciences et des Technologies de l'Information de Franche Comté.
- **Où la la ! Il a dû y avoir beaucoup de monde pour travailler là dessous ?**
- Environ une dizaine de personnes pendant 4 ans. Une partie du travail a été réalisé par trois thésards qui ont travaillé avec moi à THAMA.
- **Non, là tu me mènes en bateau ! J'y crois pas.**
- Bien sûr que si ! Arnaud Banos, Jérôme Bolot et Thomas Thévenin ont travaillé sur des thèmes complémentaires et ont tous amené leur pierre à l'édifice. Le premier a réfléchi à des méthodes d'évaluation de la demande dans le temps et dans l'espace. Le second a effectué des recherches sur les méthodes d'optimisation et de gestion d'une flotte de véhicules. C'est lui qui a développé la partie "réservation" du logiciel RESAGE. Thomas, quant à lui, a passé beaucoup de temps sur la définition de la base de données décrivant les réseaux, en utilisant un Système d'Information Géographique. Comme tu peux le voir, chacun a apporté sa compétence.
- **Moi qui croyais que les thèses, cela ne servait qu'à faire de la théorie !**
- Aussi, mais cela n'empêche pas de voir directement l'application de nos travaux de recherche dans la société. C'est bien sûr cela l'intérêt : réfléchir à des concepts sur le long terme, et identifier quelle part est directement applicable. Cela permet de vivre sa thèse en prise avec le réel, en s'autorisant régulièrement des bifurcations intellectuelles nécessaires à la progression de la recherche...
- **Ah bon alors ça, tu n'es pas du tout un cois... Je vais tout de suite m'inscrire en géographie, ça bouge !**

Contact : laboratoire THAMA
33 21 40 54 17

L'est Républicain, février 2002, Remise du prix du développement local

TRANSPORTS

Halte aux voitures particulières avec Evolis

Depuis octobre 2000, et les premiers pas d'Evolis, le système plaît aux usagers. De bon augure pour l'industrialiser définitivement.



Le gros avantage pour le gérant du système : ne mettre en place des navettes que s'il y a suffisamment d'usagers. Rentabilité assurée.

- Il est nécessaire de bien évaluer des projets... et de les faire valoir aux administrations des habitants.

Alan Fattouh, directeur régional de la Casse des députés et des conseillers ne croyait pas si bien dire. Les jours lauriers de « Prix du développement local », organisés par la CDC, le conseil ré-

gional et l'université de Franche-Comté.

La tâche au projet Evolis pose, gratuite de son côté, est, dans le principe est le transport à la demande, le transport public personnalisé. C'est plutôt inhabituel que des travaux scientifiques soient appliqués aussi rapidement. Encore plus quand les aspects concrets arrivent avant le fin



Sur le toit des taxis orange au-dessus de certains arrêts de bus, Evolis est une réalité.

de la fièvre », explique un des trois auteurs du projet, Jérôme Batot, de l'laboratoire de recherche Théma (Théorie et modélisation de l'aménagement) à Besançon. Il n'en aurait rien

été et les trois théoriciens Jérôme Batot, Arnaud Basso et Thomas Thévenaz n'auraient trouvé en la personne de Bertrand Dupont, directeur de la CIB, un sérieux allié. « On a fait un travail très original dans un cadre de coopération entre les milieux de l'aménagement et de l'entreprise ».

Savoir économiser sa voiture particulière

Mais qu'est-ce qu'Evolis concrètement ? le principe est le suivant. Les particuliers, désirant se rendre à la gare ou sentir de même à leur domicile, appellent la CIB, déclenchent leurs coordonnées et se voient proposer un trajet, son heure et le lieu de prise en charge. L'intérêt est donc, quand pour l'usager, puisque le taxi arrive est « d'être presque sans regard que la voiture sans pour des déplacements collectifs ». Pour l'usager, la CIB se sert de ses taxis pour arriver à son but, et les résultats ne paraissent pas de qualité de l'ordre d'Evolis. « Nous avons une conviction permanente de notre façon d'être. Et il est à noter que ce service est beaucoup pour des usagers d'affaires malgré le moindre prix des courses, 2,75 euros en

plein tarif et 1,85 euros en tarif réduit. De plus, le taux de satisfaction des usagers est de l'ordre de 85 % », souligne Bertrand Dupont.

Les 2.300 usagers qui l'ont utilisé depuis son lancement sont là pour le prouver.

Un système à optimiser

Mais le système, tel que vu, n'est pas parfait, comme l'explique Jérôme Batot : « Il ne faut pas optimiser notre système informatique de réservation pour pouvoir fonctionner en temps réel. Alors qu'aujourd'hui, il faut appeler au plus tard la veille du jour de son voyage pour être pris en compte. De plus, on ne fonctionne que sur Besançon intra-muros. Mais l'objectif est d'étendre Evolis à l'agglomération. La CIB y voit le moyen de restructurer ses TGB, les véhicules particuliers ». Les problèmes viennent de concert : adaptation du système informatique, recherche de chauffeurs... C'est en ce sens que Jérôme et ses deux collègues souhaitent « industrialiser le produit en cherchant à donner la parole à un partenaire qui sera peut-être l'opérateur ». Qui sera, sera...



Jérôme Batot : « Pour le moment, les taxis travaillent surtout avant 7 h et après 19 h. Dans les périodes où il y peu de bus ».

Plaquette nationale de Kéolis, centrales de mobilités - itinéraires personnalisés



Mobilignes
Piloté par le réseau urbain de Besançon CFB

Centre d'information sur la Communauté d'agglomération du Grand Besançon et sur les territoires desservis par les lignes départementales et régionales.
Accès Métropole de 8h00 à 19h00, du lundi au samedi.

Services à la demande :

- Evénis 400** pour les personnes à mobilité réduite, service de porte à porte de 7h00 à 21h00 du lundi au jeudi et le dimanche, de 7h00 à 23h00 les vendredis et samedis.
- Evénis 500**, dessert de la gare de Besançon avant 7h00 et après 21h00, 500 points de dessert en correspondance vers la gare TGV.
- Taxi Vert** en zone rurale, dessert avant 7h00 et après 21h00 sur une zone de 500 km.

Extension envisagée sur toute la Communauté d'agglomération.
Concept à l'étude sur d'autres territoires : hôpital, musée, ...

mobilignes.com

Le laissez-vous aller... et retour!

Partez pour aller au stade et revenir à 23h00 le soir, avec un véhicule équipé en fauteuil pour le client à mobilité réduite et sans avoir à faire appel à un taxi. Le service est gratuit pour le client et le conducteur.

The image shows a collection of promotional materials for Mobilignes. On the left, there are two brochures: one pink with a person icon and the text 'MOBILIGNES', and one white with a fruit basket icon and the text 'Bienvenue à nos services'. In the center, there is a screenshot of a website interface with a search bar and various buttons. On the right, there is a small circular inset photo of a smiling woman wearing a headset, representing a customer service agent.

Plaquette et marque-pages Evolis-Gare

Du service,
de la complémentarité

EVOLIS Gare

Parce que rejoindre
la gare sans voitures
pour prendre un TGV
et retourner chez soi
en nocturne peut parfois
devenir un casse-tête...

Mieux c'est aller
EVOLIS "Gare"

**Evolis,
des services à la carte.**

La Ville de Besançon et la Ctb
s'inscrivent dans une démarche
de réponse personnalisée à des demandes
spécifiques qui ne peuvent être
satisfaites par le réseau classique.
Progressivement, des services "à la carte"
verront le jour sous
l'appellation générique Evolis.

Evolis TGV

est le premier service
de la gamme Evolis.
Lancé à titre expérimental
pour une période de quatre mois
(du 18 octobre 2000 au 27 janvier 2001),
il concerne dans un premier temps
la desserte de la Gare Viotte
depuis tous les quartiers besançons,
pour les départs TGV avant 7 heures
et leurs retours après 19 heures.

Ce service expérimental se déroule dans le cadre
du Programme national de recherche et d'innovation
dans les transports terrestres (PRÉDIT).
Ce programme a permis à la Ctb (Groupe Via Capitale)
associée à l'INRA, laboratoire de recherche liégeois
de l'Université de Franche-Comté, de réaliser
une étude approfondie sur les services "à la demande"
et de proposer Evolis TGV aux besançons.

Innovation

Laissez-vous aller... et retour !

SERVICE À LA CARTE

Trajets domicile-gare Viotte
Départs et arrivées TGV

Evolis vous propose votre voiture, de rendre votre voyage ou de vous offrir une nuitée aux vacances !

EVOLIS TGV vous DÉPOSE à la gare pour prendre votre TGV du matin
et vous RECONDUIT chez vous à votre retour en soirée.

■ Disponible 7 jours sur 7, partout dans Besançon

■ Pour des déplacements "domicile-gare Viotte" pour les départs TGV d'avant 7h et les retours après 19h

■ Réservation par téléphone de 9h-20h à j-1 avant 18h

■ Annonce immédiate de l'horaire et du lieu de rendez-vous, le plus souvent à la station la plus proche du domicile, et au plus vite 30 min avant le départ du TGV

■ Garantie d'arriver en gare au moins 10 minutes avant le départ du TGV !

■ Le soir à l'arrivée en gare, même service pour le retour à domicile

■ Tout petit prix
- 18 F le trajet
- Tarif réduit : 13 F (pour les abonnés Ctb, les élèves SNCF "Jeunes", pour les groupes à partir de 2 personnes)

■ Tickets en vente
- à bord des véhicules
- à la gare Viotte
- à l'Espace Bus
- dans certaines entreprises ou administrations

Reservations / Réservations
0 825 00 22 44
(24h/24h)

Du lundi au samedi de 8h à 19h

Evolis TGV, c'est quoi ?

Evolis TGV est un nouveau service "à la carte" de la Ctb. Il dessert la Gare Viotte aux départs des TGV du matin et à leurs retours en fin de journée.
Evolis est à votre disposition 7 jours sur 7, partout dans Besançon.

082500-146-1468 - Fax : 0827-1468
082500-146-12473 - Fax : 0800-12473, 12477

Le matin

Evolis TGV vient vous chercher près de chez vous (le plus souvent à la station Ctb la plus proche.)

Les "plus" Ctb :

- Evolis passe au plus vite 30 minutes avant le départ de votre TGV
- Vous êtes assuré d'arriver en gare 10 minutes avant votre départ.

Le soir

Evolis TGV vous attend en gare et vous reconduit chez vous.

Le "plus" Ctb :

- Le jour (à partir de 18h00), vous pouvez changer l'horaire de votre retour sur un simple coup de fil.
- En cas de retard de votre TGV à l'arrivée à Besançon, Evolis vous attend dans une limite de 30 min.

* Les véhicules utilisés (voiture personnelle ou louée) portent le marque Evolis.

Evolis TGV, combien ça coûte ?

Tickets vendus à bord des véhicules Evolis, à l'Espace Bus Ctb, à la Gare Viotte et dans certaines entreprises ou administrations.

- 18 F le trajet.
- 13 F le trajet (ticket à acheter directement auprès du conducteur Evolis) :

pour les abonnés Ctb sur présentation de leur carte en cours de validité et des élèves SNCF étudiants de l'Université Franche-Comté.
pour toute information à partir de deux personnes (même TGV, même station de prise en charge).

Evolis TGV, comment en profiter ?

Appelez simplement le
0 825 00 22 44*
de j - 20 à j - 1 avant 18h00.

Un télé-conseiller vous précisera l'horaire et le lieu du rendez-vous.

* du lundi au samedi de 8 H à 19 H. Prix appel local.

Page Web Ginko, information Evolis-Gare

The image shows a screenshot of the Ginko website. At the top, there is a green header with the Ginko logo on the left and the text 'Voyager en transport public dans le Grand Besançon' on the right. Below the header is a blue navigation bar with the following links: 'Voyage', 'Tickets & abonnements', 'Actualités', 'Services personnalisés', 'Vivre le Grand Besançon', and 'Ginko'. The main content area has a purple header with the title 'Evolis "Gare"'. Below this, there is a section titled 'Laissez-vous aller... et retour' followed by a paragraph explaining the service: 'Pour les départs TGV d'avant 7h et les retours après 19h : un véhicule vient vous chercher à une station Ginko de votre choix dans Besançon et vous dépose en gare au moins 10 minutes avant le départ du TGV. Le soir, à l'arrivée en gare, même service pour le retour.' This is followed by a bulleted list of details: '• Pour les départs en TGV d'avant 7h et les retours après 19h', '• Disponible 7 jours sur 7', '• Sur réservation de J-30 jusqu'à la veille avant 18h par téléphone (sauf le dimanche)', and '• Un tout petit prix : 2,9 € le trajet. Tarif réduit : 1,9 € pour les abonnés Ginko, Fréquence SNCF et les groupes à partir de 2 personnes à la boutique Mobilignes. Tickets en vente à bord des véhicules, au Railey (Gare Viotte) et à la boutique Ginko.' Below this is another section 'Pour réserver votre trajet :' with two bullet points: '• Cliquez ici (réservation jusqu'à la veille avant 17h sauf le dimanche)' and '• Appelez le 0 825 00 22 44 (0,15€/min) (réservation jusqu'à la veille avant 18h sauf le dimanche)'. At the bottom, there is a blue footer bar with links: 'Accueil', 'Contactez-nous', 'Recevez toute l'actu', 'Questions / Réponses', 'Plan de site', and 'English'.

Page Web Ginko, réservation Evolis-Gare

ginko *Voyager en transport public dans le Grand Besançon*

Voyage Tickets & abonnements Actualités Services personnalisés Vivre le Grand Besançon Ginko

Evolis "Gare"

Réservez votre déplacement de J-30 à J-1 **avant 17h sauf le dimanche**

Avant le jour de votre départ, nous vous confirmons par téléphone :
> votre station Ginko et l'heure de rendez-vous
> votre tarif

Merci de nous indiquer

| | | | |
|---------------|----------------------|-------------|----------------------|
| Votre lieu* | <input type="text"/> | Prénoms* | <input type="text"/> |
| Adresse : N°* | <input type="text"/> | Rue* | <input type="text"/> |
| CP* | <input type="text"/> | Commune* | <input type="text"/> |
| Tel domicile* | <input type="text"/> | Tel travail | <input type="text"/> |
| Tel portable | <input type="text"/> | E-mail | <input type="text"/> |

Acceptez-vous une confirmation par message sur votre téléphone si vous en possédez un ? OUI NON

Au moins un numéro de téléphone est obligatoire

Date de votre déplacement : 14 Novembre 2003

Pour quel départ TGV : 5040 5059 6053 6055 (samedi et dimanche) 7012 (le dimanche) OU Quelle arrivée Gare SNCF Virets : 19049 20655 21449 22410

Votre adresse de départ ou d'arrivée :

N°* Rue* à Besançon

Station la plus proche : (si vous la connaissez)

Nombre de personnes*

Dont enfant de - de 4 ans

Nombre de valises*

Vous êtes* Abonné Ginko
 Abonné SNCF Fréquence
 Non abonné

Vous souhaitez effectuer une autre réservation :

Vous avez terminé vos réservations :

* Champs obligatoires

Accueil Contactez nous Recevez toute l'actu Questions / Réponses Plan de site English

Page Web de la SNCF

ter+sncf.com
Bouger en région **Franche Comté**

RECHERCHER UN VOYAGE | VOYAGES EN TER | TER+SNCF | INFO TRAFIC TER | CALENDRIER | TARIFS | LES PARTENAIRES

ter+sncf

EVOLIS Gare, trajets domicile <-> gare Besançon-Viotte

but de prendre votre voiture, de réveiller votre conjoint ou de vous offrir une marche aux courses

EVOLIS Gare
Renseignements / Réservations
0 825 00 22 44
prix d'un appel local
de lundi au samedi de 8 h à 18 h
www.ubibikes.com

EVOLIS Gare, c'est quoi ?

Evolis Gare est un nouveau service à la carte de la SNCF. Il dessert la gare de Besançon-Viotte aux départs des TGV du matin et à leurs retours en fin de journée.

- Disponible 7 jours sur 7, partout dans Besançon.
- Pour des déplacements "domicile - gare de Besançon-Viotte pour les départs TGV d'avant 7h et les retours après 18h
- Réservez par téléphone de 7-30 à 7-1 avant 18 h.
- Reservez immédiatement de l'heure et du lieu de rendez-vous, le plus souvent à la station (arrêt) la plus proche du domicile et au plus tôt 30 minutes avant le départ du TGV.
- Garantie d'arriver en gare de Besançon-Viotte au moins 10 minutes avant le départ du TGV.
- Le soir à l'arrivée en gare de Besançon-Viotte, même service pour le retour à domicile.
- Tarif petit groupe : 10 F (2 T4 4) le trajet - tarif réduit : 12 F (1 80 4) pour les abonnés SNCF "fréquent" et pour les groupes à partir de 2 personnes.
- Tickets en vente : à bord des régionales, à la gare de Besançon-Viotte, à l'espace DUT, dans certaines entreprises ou administrations.

[tout de suite](#)

Le Train

Table des tableaux

| Numéro de tableau et intitulé | page |
|---|------|
| tableau 1 : Modes de déplacement dans quelques villes de densités différentes en 1980 | 23 |
| tableau 2 : Les évolutions des pratiques de déplacements liés aux loisirs et au travail | 26 |
| tableau 3 : Répartition des déplacements locaux par type de liaison (jour de semaine) | 26 |
| tableau 4 : Évolution de la mobilité par personne et par jour selon le lieu d'habitat | 29 |
| tableau 5 : Évolution du partage modal pour les modes mécanisés | 40 |
| tableau 6 : La fréquentation du service Evolis-Gare | 95 |
| tableau 7 : Bilan économique du service Evolis-Gare | 97 |
| tableau 8 : Codification du calendrier | 130 |
| tableau 9 : Extrait d'un calcul de la moyenne des réservations des journées du passé | 145 |
| tableau 10 : Niveau de prévision | 146 |
| tableau 11 : Valeurs observées et valeurs calculées pour chaque jour de la semaine | 148 |
| tableau 12 : Répartition automatique de 13 usagers issus de la prévision dans les 38 cellules | 150 |
| tableau 13 : Répartitions des stock en distribuant d'abord les cellules les plus importantes | 150 |
| tableau 14 : Résultats après 400 itérations | 166 |
| tableau 15 : Les composants du système multi-agents | 175 |
| tableau 16 : Trois groupes de situation pour tester le système | 184 |

Table des figures

| Numéro de figure et intitulé | page |
|---|------|
| figure 1 : Les grandes étapes de l'étalement urbain | 21 |
| figure 2 : Le retournement de l'évolution des densités : le cas de Toulouse | 22 |
| figure 3 : Spatialité agrégée des pratiques d'achats alimentaires et de cinéma | 25 |
| figure 4 : Les échanges internes aux ZPIU en 1990 | 27 |
| figure 5 : Vitesse moyenne (en km/heure) des trajets motorisés, agglomération de Paris | 28 |
| figure 6 : Trafic quotidien des gares parisiennes au début des années 80 | 29 |
| figure 7 : Ecart entre les heures de pointes et les heures creuses | 30 |
| figure 8 : Le déplacement courant d'une famille péri-urbaine | 31 |
| figure 9 : Rendez-vous hebdomadaires et destinations quotidiennes | 31 |
| figure 10 : Estimation du parc automobile en France | 37 |
| figure 11 : Antagonisme entre riverains et automobilistes | 39 |
| figure 12 : Une mesure excessivement simpliste de la consommation d'espace, et pourtant... | 40 |
| figure 13 : Les 4 piliers de l'intermodalité | 49 |
| figure 14 : Les formes de desserte spatiale de transport à la demande | 56 |
| figure 15 : Les transports et la télématique | 62 |
| figure 16 : Les nouveaux mobiles tracent la route | 65 |
| figure 17 : Architecture générale d'un système de gestion de bus | 69 |
| figure 18 : La fenêtre de réservation du logiciel Mobiter | 74 |
| figure 19 : Les deux modes de transport à la demande sous Optitod | 75 |
| figure 20 : Le réseau ferré ne passe pas par le centre-ville de Besançon | 78 |
| figure 21 : L'évolution du bâti à Besançon | 79 |
| figure 22 : La répartition de la population et la densité à Besançon | 80 |
| figure 23 : Les partenaires de l'équipe SAD2 sur le projet Evolis-Gare | 82 |
| figure 24 : Evolis-Gare, un TAD convergent-divergent pour la desserte de la gare SNCF | 83 |
| figure 25 : Les attentes des clients potentiels | 84 |
| figure 26 : Les engagements client pour un trajet Evolis-Gare | 85 |
| figure 27 : Resad2, fenêtre de saisie vue par l'opérateur de la centrale de réservation | 87 |
| figure 28 : Affectation automatique d'une adresse postale à la station la plus proche | 88 |
| figure 29 : Informations propres à la réservation | 90 |
| figure 30 : Simulation de lignes virtuelles à J-1 et proposition de services par le logiciel RESAD2 | 91 |
| figure 31 : Un service moins tendu mais plus coûteux | 92 |
| figure 32 : Une feuille de route Evolis à destination d'un taxi pour un TGV au départ de Besançon | 93 |
| figure 33 : La chaîne de fonctionnement d'Evolis-Gare | 94 |
| figure 34 : Fréquentation et courses associées du service Evolis-Gare en 2001 et 2002 | 96 |

| | |
|---|-----|
| figure 35 : Le taux de remplissage des véhicules | 97 |
| figure 36 : Le potentiel de clients localisés sur la CAGB est plutôt proche de Besançon | 100 |
| figure 37 : Ébauche d'un simulateur de gestion de flottes d'un transport à la demande | 110 |
| figure 38 : TAD-Innovant, des décisions à prendre très rapidement | 112 |
| figure 39 : Distance entre un véhicule et un usager | 116 |
| figure 40 : Fonctionnement et entrées-sorties de TAD-I | 117 |
| figure 41 : Les représentations graphiques de la time-geography | 118 |
| figure 42 : Les pérégrinations vues par la time-geography | 119 |
| figure 43 : Représentation des dimensions spatio-temporelle des réservations | 119 |
| figure 44 : Les stations du réseau urbain ne couvrent pas la totalité de Besançon | 120 |
| figure 45 : L'accessibilité au transport à la demande pour les bisontins | 120 |
| figure 46 : Les vitesses de circulation du réseau routier de Besançon | 121 |
| figure 47 : Modification des itinéraires | 122 |
| figure 48 : Deux façons d'intégrer le réseau routier | 123 |
| figure 49 : Lister les cheminement des plus courts chemins d'un réseau | 125 |
| figure 50 : Le réseau, d'un modèle spaghetti vers un modèle topologique | 128 |
| figure 51 : Représentation des arcs par le modèle topologique de réseau | 129 |
| figure 52 : Sélection temporelle des informations via une interface presse-bouton | 130 |
| figure 53 : Fenêtre de visualisation du simulateur de Dynasim | 132 |
| figure 54 : Calcul du vecteur vitesse des véhicules | 132 |
| figure 55 : Visualisation d'un véhicule et de son trajet sous TAD-I | 133 |
| figure 56 : Des outils dédiés à chaque opération | 134 |
| figure 57 : Fréquentation journalière du service le matin de janvier à mai 2003 | 136 |
| figure 58 : La répartition de la fréquentation du TAD pour les trains de 7 heures | 137 |
| figure 59 : Fréquentation entre 2000 et 2003 selon le jour de la semaine | 138 |
| figure 60 : La répartition spatiale des points de départ des demandes de transport | 139 |
| figure 61 : La répartition des appels sur le territoire bisontin | 140 |
| figure 62 : Symbolisation du découpage tri-dimensionnel | 141 |
| figure 63 : Sélection des critères temporels via le calendrier | 141 |
| figure 64 : La répartition relative des points d'appels selon les jours de la semaine | 142 |
| figure 65 : Prolonger une série temporelle, l'embaras des choix | 143 |
| figure 66 : Regarder le passé pour construire une prévision | 144 |
| figure 67 : Fenêtre du calcul temporel en vue d'évaluer la pertinence de l'analyse du passé | 144 |
| figure 68 : Les prévisions sont plus proches des valeurs réelles que de leur moyenne | 146 |
| figure 69 : Comparaison entre demandes calculées et demandes réelles | 147 |
| figure 70 : Le lissage de la prévision s'accroît avec la longueur de la période d'observation | 148 |
| figure 71 : La part des usagers de chaque cellule pour un lundi normal | 149 |
| figure 72 : Un tirage au sort respectant les proportions affectées aux cellules | 151 |
| figure 73 : Des usagers prévisionnels à acheminer en gare TGV | 152 |

| | |
|---|-----|
| figure 74 : Deux problèmes de cheminement vieux comme les graphes | 154 |
| figure 75 : Fonctionnement d'un algorithme génétique | 156 |
| figure 76 : Deux exemples codés de tournées du voyageur de commerce | 157 |
| figure 77 : Représentation du codage d'une tournée de transport à la demande | 157 |
| figure 78 : La sélection naturelle, les plus forts ont toujours plus de chances de gagner | 159 |
| figure 79 : La production d'individus par croisement d'une partie des gènes | 160 |
| figure 80 : Mutation d'un individu | 160 |
| figure 81 : La méthode du croisement est-elle incompatible avec les tournées du TAD ? | 161 |
| figure 82 : La reproduction par croisement d'une tournée de TAD | 162 |
| figure 83 : La population initiale offre des premières solutions qui doivent être améliorées | 163 |
| figure 84 : Les algorithmes génétiques améliorent les premières propositions | 164 |
| figure 85 : La méthode fonctionne également avec un grand nombre d'utilisateurs | 165 |
| figure 86 : Progressions de la qualité des solutions trouvées au fil des générations | 167 |
| figure 87 : Courbe générale de la progression de la qualité des solutions trouvées par les AG | 167 |
| figure 88 : La demande de transport se déclare selon un tirage au sort aléatoirement dirigé | 169 |
| figure 89 : Les règles fonctionnelles du système de transport de TAD-I | 170 |
| figure 90 : Castes chez les fourmis ATTA ; du jardinier au soldat | 172 |
| figure 91 : Les fonctions comportementales d'un véhicule | 176 |
| figure 92 : Les fonctions comportementales d'un utilisateur | 177 |
| figure 93 : Les fonctions comportementales du régulateur | 177 |
| figure 94 : Visualisation dynamique de la gestion en temps-réel du système de TAD | 179 |
| figure 95 : Screen-shot de la première simulation | 182 |
| figure 96 : Un utilisateur se déclare tardivement et n'est pas pris en charge | 183 |
| figure 97 : Les conséquences possibles d'une localisation différentes des utilisateurs simulés et réels | 184 |

Table des matières

| | |
|---|-----|
| Introduction générale | 9 |
| Partie 1 : Le transport à la demande, un enjeu décisif pour le transport public face à l'automobile | 15 |
| Introduction de la première partie | 17 |
| Chapitre 1 : Transport à la demande et développement durable, le contexte d'une démarche | 19 |
| 1 Les déplacements se complexifient dans une ville qui s'étale | 20 |
| 2. Le système de transport urbain actuel ne répond pas aux principes du développement durable | 34 |
| 3 De nouvelles pistes pour tendre vers une mobilité durable | 44 |
| Conclusion | 58 |
| Chapitre 2 : « Système de transport intelligent » et transport à la demande | 59 |
| 1 Le développement des applications ITS pour le transport terrestre | 60 |
| 2 Les outils ITS transférables au transport à la demande | 65 |
| Conclusion | 74 |
| Chapitre 3 : Evolis-Gare, une expérience de transport à la demande en vraie grandeur à Besançon | 75 |
| 1 Besançon, un cadre favorable pour la mise en oeuvre d'un TAD par une recherche pluridisciplinaire | 76 |
| 2 Un outil d'aide à l'exploitation d'un service à la demande | 84 |
| 3 Pour aller plus loin | 93 |
| Conclusion | 100 |
| Conclusion de la première partie | 101 |

| | |
|---|-----|
| Partie 2 : Géomatique et intelligence artificielle : éléments pour la gestion d'un transport à la demande en temps-réel | 103 |
| Introduction de la seconde partie | 105 |
| Chapitre 1 : Une approche géographique d'un transport à la demande en temps-réel | 107 |
| 1 Le concept de notre TAD en temps-réel | 108 |
| 2 Un atelier dédié au transport à la demande | 121 |
| Conclusion | 132 |
| Chapitre 2 : Le transport à la demande par la simulation et l'intelligence artificielle | 133 |
| 1 Définir la demande dans l'espace et dans le temps | 134 |
| 2 L'élaboration de trajets provisoires par des algorithmes génétiques | 151 |
| 3 Une méthode d'optimisation basé sur la formalisation du comportement des insectes sociaux | 166 |
| Conclusion | 184 |
| Conclusion de la seconde partie | 185 |
| Conclusion générale | 187 |
| Bibliographie | 191 |
| Annexes | 209 |
| Table des tableaux | 220 |
| Table des figures | 221 |
| Table des matières | 224 |