



HAL
open science

La performance adaptative des systèmes de transports collectifs. Modélisation, mesures de vulnérabilité et évaluation quantitative du rôle de l'information des voyageurs dans la régulation des situations perturbées.

Julien Coquio

► **To cite this version:**

Julien Coquio. La performance adaptative des systèmes de transports collectifs. Modélisation, mesures de vulnérabilité et évaluation quantitative du rôle de l'information des voyageurs dans la régulation des situations perturbées.. Géographie. Université François Rabelais - Tours, 2008. Français. NNT : . tel-00372265

HAL Id: tel-00372265

<https://theses.hal.science/tel-00372265>

Submitted on 31 Mar 2009

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

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

ÉCOLE DOCTORALE Sciences de l'Homme et de la Société

UMR CITERES 6173

THÈSE présentée par :

Julien COQUIO

Soutenue le : **18 décembre 2008**

Pour obtenir le grade de : **Docteur de l'Université François - Rabelais**

Discipline / Spécialité : **Aménagement de l'Espace et Urbanisme**

**LA PERFORMANCE ADAPTATIVE DES
SYSTEMES DE TRANSPORTS
COLLECTIFS**

**Modélisation, mesures de vulnérabilité et évaluation
quantitative du rôle de l'information des voyageurs
dans la régulation des situations perturbées**

THÈSE dirigée par :

Monsieur MATHIS Philippe

Professeur Emérite, Université François - Rabelais

RAPPORTEURS :

Monsieur CHAPELON Laurent
Monsieur REYNAUD Christian

Professeur, Université de Montpellier III
Directeur de recherche, INRETS

JURY :

Monsieur CHAPELON Laurent
Monsieur DUMOLARD Pierre

Professeur, Université de Montpellier III
Professeur honoraire, Université de Grenoble
Joseph Fourier (invité)

Monsieur HUET Thierry

SNCF, Responsable du Centre Opérationnel Transilien
Lignes N et U (invité)

Monsieur MATHIS Philippe
Monsieur MIGNOT Dominique
Monsieur REYNAUD Christian
Madame THOMAS Isabelle

Professeur Emérite, Université François – Rabelais de Tours
Directeur de recherche, INRETS
Directeur de recherche, INRETS
Professeur, Université catholique de Louvain

Remerciements

Je souhaite tout d'abord exprimer ma plus grande reconnaissance envers mon Directeur de recherche, Monsieur le Professeur Philippe Mathis, pour m'avoir permis de commencer cette recherche et m'avoir ensuite encadré tout au long de ces cinq années. Les orientations qu'il m'a données, la confiance qu'il m'a accordée, son soutien et ses conseils ont permis à ce travail d'aboutir. Ses enseignements me seront profitables, bien au-delà de cette thèse.

Je remercie tous les doctorants du Laboratoire, anciens et actuels, pour tous les moments passés ensemble au cours de ces années, qui m'auront beaucoup apporté. Je tiens en particulier à remercier Jean-Baptiste Buguellou. Parmi les moments passés ensemble au cours de ces années, certains resteront inoubliables : « heureusement qu'ils sont là ! ».

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers Elisabeth Sevel, ancienne responsable du Pôle Information de la Direction de Transilien SNCF, qui m'a accepté en tant que stagiaire et a facilité mon intégration et mon recrutement. Ceci a été d'une grande importance pour le déroulement de cette recherche. Je remercie également toutes les personnes ayant travaillé ou travaillant actuellement au Pôle Information de la Direction de Transilien SNCF et en particulier Patrick Ung pour le temps qu'il a passé à récupérer des données informatiques très utiles.

Je tiens à témoigner de l'importance qu'a eu pour le déroulement de cette recherche la participation à un projet du PREDIT sur lequel j'ai été amené à travailler avec Hervé Baptiste, enseignant-chercheur au CESA¹.

L'obtention de données est très importante pour tout travail de thèse. Celle-ci a notamment été possible grâce aux personnes travaillant au Pôle Etudes de la Direction de Transilien et à l'Association Multimodale d'Information des Voyageurs Île-de-France (AMIVIF²). Qu'ils en soient remerciés ici.

Au cours de ces années, la participation à des colloques a été l'occasion d'obtenir des retours critiques sur le travail effectué. Je remercie toutes les personnes ayant ainsi enrichi ce travail. En particulier, je remercie tous les organisateurs du SEDER de Bordeaux, animé par Claude Lacour, dont chacune des éditions a été constructive pour cette recherche.

Je remercie vivement Evelyne Mathis pour les nombreuses relectures de ce document et Aurélie Cordier pour les traductions.

Enfin, mes pensées se tournent vers ma famille et toutes les personnes qui me sont chères et m'ont soutenu pendant ces années et notamment un vieil ami, M. Jean Rault.

¹ Le Centre d'Etudes Supérieures d'Aménagement est le Département Aménagement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours.

² L'AMIVIF a été intégré en 2008 au Syndicat des Transports d'Île-de-France (STIF).

Préambule

Cette recherche est l'aboutissement d'un travail de cinq années mené au sein du Laboratoire du CESA (UMR CITERES 6173) et fait suite à un travail réalisé au cours d'un DEA¹.

Plusieurs contrats de recherche, réalisés durant les deux premières années, ont permis d'apprendre à utiliser les outils informatiques conçus au sein du Laboratoire et à en développer de nouveaux, en fonction de nos propres questionnements. Ils ont été l'occasion de nombreux échanges et ont contribué à l'avancement de la recherche effectuée dans le cadre de la thèse.

L'intégration d'une entreprise de transports a permis de compléter l'approche exploratoire par des mises en situation plus concrètes. Ainsi, un stage à mi-temps de 10 mois suivi d'un contrat CIFRE² et d'un recrutement au Pôle Information/Projets du Département Services à la Clientèle de Transilien³ ont facilité l'acquisition d'une plus grande connaissance du domaine de recherche.

Enfin, la participation au cours de ces quatre années à divers colloques a permis des retours critiques sur le travail effectué, des réorientations dans le questionnement... et a ainsi joué un rôle déterminant.

Notre souhait est que ce travail puisse contribuer à une meilleure prise en compte de la vulnérabilité des transports en commun dans les politiques d'Aménagement⁴ et du rôle spécifique de l'information des voyageurs dans les phénomènes de régulation des situations perturbées.

Elle est « située » : elle a été menée dans un contexte spatial et temporel précis. Elle s'inscrit à la fois dans la continuité de travaux réalisés au sein du Laboratoire du CESA et de recherches spécifiques sur la vulnérabilité dans le domaine des transports.

Les préconisations effectuées ont pour but de dépasser le cadre théorique inhérent à tout travail universitaire et de proposer des applications concrètes liées aux problématiques développées, conformément aux exigences des travaux de recherche en Aménagement-Urbanisme.

¹ Intitulé : « La vulnérabilité des transports en commun : dans quelle mesure l'information dans les pôles d'échanges participe-t-elle à la régulation de situations perturbées ? » (Coquio, 2003).

² Convention Industrielle de Formation par la REcherche.

³ Activité Île-de-France de la SNCF.

⁴ Nous écrivons « Aménagement » avec une majuscule pour désigner la discipline, le processus, l'acte d'aménager, et nous écrivons « aménagement » avec une minuscule pour signifier le résultat de ce processus.

Résumé

L'espace dans lequel nous évoluons n'est pas homogène. Les services et activités sont répartis au sein de celui-ci et sont organisés en réseaux, opérant à des échelles spatiales et temporelles diverses. Les individus effectuent des déplacements plus ou moins longs, fréquents et pour des motifs divers, en utilisant des modes de transport individuels et collectifs. Ils doivent disposer d'une offre de transport fiable, évolutive et à capacité suffisante pour se déplacer.

Le déséquilibre modal tel qu'on l'observe actuellement est générateur de nombreuses nuisances, notamment environnementales, et nécessite des actions afin d'en limiter l'ampleur et les effets négatifs.

Cette recherche a pour vocation générale d'aborder la question de la performance adaptative des transports en commun, facteur important de leur développement. En étudiant en particulier la question de leur vulnérabilité, elle vise notamment à mieux comprendre les articulations entre l'Aménagement des transports et leur exploitation. En effet, les choix d'Aménagement (création d'une nouvelle ligne, renforcement de pôles d'échanges, modification de la structure horaire...) ont des conséquences à long terme sur le fonctionnement des systèmes de transport (adaptation à des perturbations, gestion des flux des voyageurs, etc.). Comment mesurer les conséquences de ces choix sur l'adaptabilité à des perturbations au niveau de la structure du réseau et du fonctionnement du système ?

De manière progressive et grâce aux progrès technologiques, l'information a trouvé sa place dans le fonctionnement des transports collectifs. Elle est devenue un élément fondamental de la qualité de service et l'amélioration de l'information en situation perturbée est actuellement une des priorités majeures pour les opérateurs. **Dans quelle mesure l'information des voyageurs contribue-t-elle à la régulation de situations perturbées ?**

- quel apport pour les voyageurs et les opérateurs de transport ?
- dans quelle mesure ces apports sont-ils compatibles ?

Notre travail porte sur la vulnérabilité structurelle et fonctionnelle du système de transport et non sur les perturbations du système urbain liées à des perturbations de l'offre de transport. L'approche structurelle a pour but d'étudier les dommages potentiels structurels et la vulnérabilité associée, c'est-à-dire les modifications des potentialités relationnelles du réseau compte tenu de sa nouvelle configuration. La vulnérabilité fonctionnelle mesure « *la dégradation des services assurés par le réseau* » en fonction des endommagements. Elle intègre la demande, l'utilisation du réseau par les voyageurs (Gleyze, 2005), mais aussi les moyens de régulation. Nous travaillons ici sur deux types de perturbations :

- interruptions de trafic sur des tronçons du réseau,
- mouvements sociaux entraînant la mise en place de Plans de Transport Adaptés.

La régulation des situations perturbées est de manière large relative à la limitation de l'écart entre une situation normale, de référence, et la situation perturbée grâce à des actions pouvant s'exercer à la fois au niveau de l'offre et de la demande de transport. Dans le domaine ferroviaire, le terme de régulation est employé pour la gestion des circulations et donc de l'offre. Néanmoins, inclure les voyageurs et l'information qui leur est diffusée nous semble fondamental. Nous nous focalisons sur les effets potentiels de l'information, liés aux changements de comportements induits des voyageurs, et notamment leur réorientation lors de situations perturbées grâce à des itinéraires de substitution. De nombreux travaux de recherches portent sur les choix faits avant le déplacement (mode, heure de départ, itinéraire...) mais peu d'entre eux portent sur les choix au cours de la séquence de déplacement. Or, le développement des technologies contribuant à une meilleure diffusion de l'information a pour conséquence la nécessité de mieux connaître leurs effets.

Quantifier le rôle de l'information est fondamental car l'information est généralement abordée à travers ses aspects qualitatifs dans le service proposé (ex : confort du voyageur, image du transporteur) alors que des réorientations facilitées des voyageurs peuvent avoir des influences non négligeables sur les temps de parcours (critère quantitatif).

Le modèle PERTURB et la plate-forme de simulation ont pour objet de mesurer la vulnérabilité structurelle et fonctionnelle des transports en commun ainsi que le rôle spécifique de l'information des voyageurs dans la régulation de situations perturbées. L'analyse est multi-niveaux : ensemble du réseau, ligne, voyageur(s), etc. Elle intègre les spécificités des transports en commun. Trois champs théoriques sont mobilisés :

- la théorie des systèmes qui fournit les clés méthodologiques facilitant l'identification des éléments importants du système et les relations internes et externes à celui-ci (niveau = système de transport) ;
- la théorie des graphes pour modéliser le réseau de transport (niveau = offre de transport) ;
- Les systèmes multi-agents, afin de représenter les voyageurs par des agents possédant diverses caractéristiques et règles de comportement (niveau = individu dans le système de transport).

Après avoir modélisé le système de transport (grâce à des hypothèses de travail), il est possible d'effectuer des simulations en faisant varier plusieurs paramètres :

- offre de transport (initiale et liée à des dysfonctionnements du système) ;
- caractéristiques des agents (origine, destination, heure de départ/d'arrivée...) ;
- information diffusée (sur le plan spatial et temporel).

Nous travaillons sur la région Île-de-France, qui offre des degrés de maillage variable, ainsi que sur des systèmes théoriques de transport afin de faire varier les paramètres d'entrée du modèle PERTURB et montrer l'adaptabilité de l'outil à différents cas.

Les simulations effectuées ne permettent d'émettre que des conclusions partielles et provisoires. Les éléments que nous apportons seront ou non confortés par d'autres études et simulations et avec d'autres modèles. Néanmoins, nous mettons en évidence les principaux points suivants :

- Des augmentations du maillage peuvent conduire à de plus fortes vulnérabilités à certaines perturbations, notamment lorsque des nouvelles lignes renforcent la dépendance à des lignes déjà existantes. L'obligation d'adaptabilité semble toutefois se concrétiser le plus souvent par la nécessaire redondance (même partielle) des éléments. L'absence de maillage et de surcapacité peut être très contraignante pour l'opérateur comme pour les voyageurs lorsque certaines parties du réseau connaissent des dysfonctionnements car il n'y a pas de report possible sur des itinéraires de contournement. Les liens entre maillage et vulnérabilité doivent être approfondis.
- Les conséquences des perturbations varient fortement en fonction de la situation des nœuds du réseau : situation par rapport à la perturbation, nombre et caractéristiques des lignes les desservant.
- Les conséquences des perturbations varient sensiblement dans le temps et sont donc dépendantes du moment où intervient la perturbation (heure de la journée, période de l'année..), ainsi que de sa durée. Les variations sont très rapides en fonction des horaires de circulation et sont d'autant plus importantes que les fréquences de circulations sont faibles.
- La sensibilité liée aux paramètres de diffusion de l'information est très variable et dépend des caractéristiques de l'offre de transport et de la perturbation, ainsi que de la situation du voyageur. La situation de chaque voyageur est spécifique dans l'espace comme dans le temps. Le maillage (et donc la redondance possible) et la structure horaire sont différents selon les lieux et principalement entre la périphérie et le centre, même sans prise en compte des contraintes de capacité. En conséquence, les perturbations affectent différemment les individus et le rôle de l'information est très variable.
- Néanmoins, les gains de temps liés à une bonne diffusion de l'information peuvent être importants car les réorientations en amont d'une perturbation permettent de contourner celle-ci et de limiter la gêne occasionnée.
- Les problèmes de capacité du réseau conduisent à des situations où une diffusion rapide et transparente de l'information entraîne des temps de parcours supplémentaires pour certains voyageurs, comparativement à une diffusion moins performante.
- Les intérêts de l'opérateur et des voyageurs peuvent parfois être divergents. L'opérateur a comme objectif d'assurer le meilleur fonctionnement possible du réseau de transport, y compris en cas de perturbation, ce qui implique un raisonnement en terme de flux favorisant la majorité des voyageurs transportés aux dépens éventuels de

quelques uns. La conséquence peut être un accroissement des inégalités de traitement et l'incapacité éventuelle pour certains d'obtenir une solution satisfaisante.

A la lumière des résultats obtenus, il est possible d'effectuer des préconisations générales. Même si nos expérimentations sont en grande partie de nature exploratoire, elles permettent ainsi de tirer quelques enseignements et d'apporter une contribution plus opérationnelle. Ceci constitue un objectif de toute recherche se situant dans le domaine de l'Aménagement-Urbanisme, discipline n'étant par nature pas uniquement descriptive.

Elles suscitent également de nouvelles interrogations. Comment intégrer l'information des voyageurs dans l'optimisation du traitement des situations perturbées ? Quels critères d'optimisation doivent être choisis ? Comment concilier une transparence de l'information et éviter des reports trop massifs de flux de voyageurs ?

Une thèse correspond à un travail cadré, finalisé, mais elle s'inscrit dans une démarche de recherche, toujours en mouvement. Ce travail offre un certain nombre de perspectives au niveau de la modélisation et des applications possibles en Aménagement-urbanisme. Les enjeux liés à la performance adaptative des transports collectifs nécessitent en effet la poursuite des recherches dans ce domaine.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE	9
PARTIE I : D'UN CONSTAT D'INSATISFACTION A DES QUESTIONNEMENTS DE RECHERCHE.....	15
Introduction	17
Chapitre I Déséquilibre modal dans les transports et problèmes engendrés	19
Chapitre II Aménagement et transport : actions correctives	29
Chapitre III Performance des transports collectifs	39
Chapitre IV Vulnérabilité des transports collectifs	55
Chapitre V Information des voyageurs dans les transports collectifs.....	83
Synthèse, définition des questionnements et de la méthode	95
PARTIE II : DE LA FORMALISATION DES QUESTIONNEMENTS A DES OUTILS INFORMATIQUES	103
Introduction	105
Chapitre I Approche du problème de modélisation.....	107
Chapitre II Champs théoriques mobilisés	129
Chapitre III Modèle PERTURB	151
Chapitre IV Plate-forme de simulation	189
Conclusion.....	209
PARTIE III : APPLICATIONS.....	211
Introduction	213
Chapitre I Applications sur l'Île-de-France	215
Chapitre II Applications sur des systemes théoriques de transport.....	285
Conclusion.....	321
CONCLUSION GENERALE.....	327
GLOSSAIRE, SIGLES ET BIBLIOGRAPHIE.....	345
Glossaire.....	346
Sigles	354
Bibliographie.....	357
TABLES	385

INTRODUCTION GENERALE

L'espace dans lequel nous évoluons n'est pas homogène. Les services et activités sont répartis au sein de celui-ci et sont organisés en réseaux, opérant à des échelles spatiales et temporelles diverses. Les individus effectuent des déplacements plus ou moins longs, fréquents et pour des motifs divers, en utilisant des modes de transport individuels et collectifs.

Ils doivent disposer d'une offre de transport fiable, peu vulnérable, évolutive et à capacité suffisante pour se déplacer. Un système de transport peut être défini comme « *un ensemble de moyens, dont la finalité fondamentale est de satisfaire un besoin de déplacement ou de transfert, ou plus généralement de communication, entre des lieux géographiques distincts* » (Chesnais, 1980). Les voyageurs font partie intégrante de ce système. L'offre de transport proposée doit être en adéquation avec la demande de mobilité, en répondant aux attentes des citoyens, en situation normale mais également lors de dysfonctionnements.

Le fonctionnement des espaces est ainsi lié à la mise en place des réseaux (nœuds et liens), à leur exploitation et leur utilisation. On parle alors d'espace réticulaire, au sens d'un espace construit par les réseaux (L'Hostis, 1997). L'espace des transports est composé de lieux privilégiés (gares, échangeurs autoroutiers, etc.), interfaces des réseaux, certaines étant mieux desservies que d'autres.

La définition de la notion d'espace est propre à chaque discipline et au sein de chacune d'entre elles existent également de nombreuses nuances. En tant qu'aménageur, nous considérons l'espace comme le support de territorialités. Le territoire implique la notion d'un pouvoir sur l'espace-substrat et une appropriation de celui-ci : « *les territoires comportent la notion de propriété, d'appropriation, de pouvoir. Ce pouvoir consiste, en dernière analyse, en la possibilité de séparer, par des procédés divers, les mouvements potentiellement continus en mouvements autorisés et mouvements interdits* » (Stathopoulos, 1997).

Le réseau a une réalité territoriale propre, constituée par une multitude d'acteurs rendus solidaires par des réseaux techniques infrastructurels et les services de mobilité disponibles (Dupuy, 1991). Dans les transports en commun, les espaces sont organisés en territoires dont chaque exploitant se doit d'assurer la sécurité, la qualité des lieux et le bon fonctionnement. Ce ne sont pas des « non-lieux », prélevés sur l'espace et uniquement assignés à une logique de gestion de flux. Ils correspondent à de véritables « articulations urbaines » dans lesquels les trajectoires des individus s'inscrivent (Amar, 1993).

Le maillage du réseau relève du passage de projets transactionnels (formant un réseau virtuel¹) à leur réalisation effective sur le territoire (réseau réel) en fonction des choix politiques en matière d'Aménagement des transports. L'égalité d'accès et de traitement ne peut être atteinte pour des raisons matérielles de coûts liés à de multiples facteurs dont la densité de population, sa répartition différentielle, la forme en doigts de gant d'une agglomération, etc.

¹ « *Les transactions du réseau virtuel, projetées sans contraintes, sont a-spatiales et a-temporelles, des « lignes de désir » simples et directes liant chaque point à tout autre. Le réseau virtuel est un réseau homogène sur le plan relationnel* » (Stathopoulos, 1997).

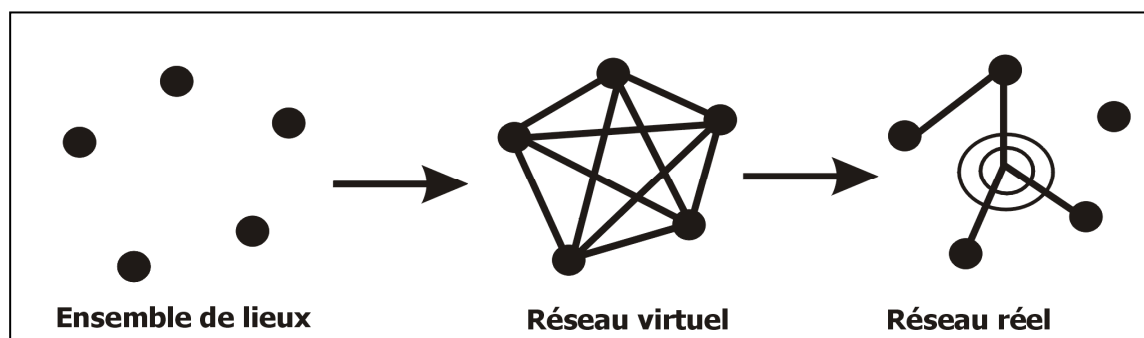


figure 1 Du réseau virtuel au réseau réel¹

Le réseau « définit en même temps l'espace et le temps. Il établit entre eux un [] rapport fondé sur la circulation, le flux, la vitesse » (Dupuy, 1991). La dimension cinétique apparaît avec l'utilisation des réseaux par des véhicules techniquement adaptés et selon certaines règles particulières². Ceci correspond à la notion de « binôme fonctionnel » qui « associe à un type de véhicule et un réseau partiel infrastructurel donnés, une vitesse de circulation distincte » (Chapelon, 1997). Les véhicules sont utilisés collectivement ou individuellement.

Prendre en compte la dimension fonctionnelle est fondamentale car « la finalité n'est pas celle du réseau mais celle du système apte à assurer la communication » (Chesnais, 1991). Le réseau constitue le support structurel sur lequel reposent les fonctions du système de transport, assurées avec une qualité plus ou moins optimale. Une capacité d'adaptation est nécessaire. A long terme, le système doit par exemple être en mesure de connaître des adaptations morphologiques majeures par la création de supports nouveaux pour de nouvelles liaisons, par l'inscription dans l'espace de nouveaux points susceptibles d'être reliés, etc. Les choix d'Aménagement peuvent avoir pour but d'adapter les réseaux à la demande de mobilité ou de contribuer à la réorganisation du territoire grâce aux moyens de communication.

La structure et le fonctionnement des systèmes de transport sont à l'origine de nuisances environnementales : bruit, pollutions, consommation d'espace, etc. La prise en compte des problématiques environnementales est de plus en plus forte et oriente de manière croissante les orientations dans ce secteur en général et dans le transport de voyageurs en particulier. Les attentes en matière de transports collectifs sont fortes, ceux-ci étant en général générateurs de moindres nuisances.

Leur rôle de service public, d'Intérêt Général, est ainsi renforcé ainsi que certaines de leurs missions : adaptabilité et continuité du service notamment. A ce niveau, l'Autorité Organisatrice (AO) « collectivité territoriale dans l'exercice de sa compétence transport, est responsable de l'organisation des transports publics dans l'agglomération, le département ou la région. [...] Elle définit l'offre de transport, le niveau de qualité de service, les tarifs et planifie l'organisation des déplacements » (ITS France, 2002).

Pendant longtemps, les systèmes de transport et les politiques mises en œuvre ont été caractérisés par une conception monomodale nuisant ainsi à leur complémentarité. Ceci est en

¹ Source : (Stathopoulos, 1997).

² Excepté la marche à pied où aucun véhicule n'est nécessaire pour utiliser le réseau.

partie lié à « *la prééminence de l'infrastructure sur le service comme outil principal de représentation de la fonction transport, conduisant à négliger la prise en compte du besoin de déplacement du point de vue de l'utilisateur: une chaîne de déplacement de bout en bout et non segment par segment* » (Joignaux, 2002). Ainsi, l'intermodalité vise à aboutir à un système global, cohérent et capable de gérer les interactions entre les divers modes de transport. Elle peut être définie comme « *l'ensemble des moyens mis en œuvre pour rationaliser le système de transport dans l'objectif d'aider les voyageurs à coordonner leurs modes de déplacement* » (Thévenin, 2002).

La bonne gestion des perturbations est fondamentale car elle limite les variations de la qualité du service réellement fourni, une baisse de celle-ci pouvant avoir des répercussions au-delà du système de transport lui-même. Les opérateurs de transports collectifs doivent être en mesure de gérer des perturbations de plus ou moins grande ampleur afin d'éviter une dégradation trop critique du service et revenir rapidement à une situation normale. Le système de transport subit des perturbations liées à d'autres systèmes. Inversement, les perturbations liées au système de transport se diffusent : « *le système de transport participe au métabolisme urbain et tout dysfonctionnement de sa part, accidentel ou chronique, se répercute sur l'activité de la ville* » (Menerault et Barré, 2001). Par exemple, des millions de personnes utilisent quotidiennement les transports collectifs et leur arrêt provisoire ou leurs perturbations ont des conséquences importantes : retards ou absences sur les lieux de travail, saturation du trafic routier dans les grandes agglomérations.

Cette recherche a pour vocation générale d'aborder la question de la performance adaptative des transports en commun. En étudiant en particulier la question de leur vulnérabilité, elle vise notamment à mieux comprendre les articulations entre l'Aménagement des transports et leur exploitation.

En effet, les choix d'Aménagement (création d'une nouvelle ligne, renforcement de pôles d'échanges, modification de la structure horaire...) ont des conséquences à long terme sur le fonctionnement des systèmes de transport (adaptation à des perturbations, gestion des flux des voyageurs, etc.). Comment mesurer les conséquences de ces choix sur l'adaptabilité à des perturbations au niveau de la structure du réseau et du fonctionnement du système ?

Au niveau individuel, chaque voyageur qui emprunte le réseau voit par ailleurs ses opportunités de déplacement et ses possibilités propres d'adaptation à des perturbations varier suivant la structure du réseau en fonction des trajets qu'il effectue. Le développement très rapide des technologies en matière d'information des voyageurs pose en outre des questions sur leur rôle en matière de gestion des perturbations :

dans quelle mesure l'information des voyageurs contribue-t-elle à la régulation de situations perturbées ?

- quel apport pour les voyageurs et les opérateurs de transport ?
- dans quelle mesure ces apports sont-ils compatibles ?

Afin de traiter ces questions, les clés méthodologiques doivent être trouvées. La modélisation est choisie dans le but de fournir des éléments de réponse de nature quantitative. Nous nous

positionnons dans la continuité des travaux menés au Laboratoire du CESA, appliquant et développant des concepts de la théorie des systèmes, de la théorie des graphes et des systèmes multi-agents. Dans ce cadre, la prise en compte conjointe des paramètres liés à l'information des voyageurs et aux perturbations, ainsi que des spécificités des transports collectifs est de nature exploratoire. L'analyse est multi-niveaux : ensemble du réseau, ligne, voyageur(s), etc.

Cette thèse est constituée de trois parties. La première d'entre elles correspond à une construction progressive de la problématique de recherche et des questionnements spécifiques. Elle aboutit notamment à la formulation de sept hypothèses à discuter, celles-ci étant relatives à la vulnérabilité structurelle et fonctionnelle des systèmes de transports collectifs. La deuxième partie consiste à formaliser les questionnements et à présenter les outils informatiques mis en place : le modèle PERTURB et la plate-forme de simulation. Enfin, la troisième et dernière partie présente les applications effectuées sur l'Île-de-France et sur des systèmes théoriques de transport afin de discuter les hypothèses définies. Nous revenons en conclusion sur les principales étapes de la démarche, effectuons quelques préconisations avant de présenter les perspectives possibles suite à cette recherche. Un glossaire en fin de document donne les définitions des principaux termes.

**PARTIE I : D'UN CONSTAT
D'INSATISFACTION A DES
QUESTIONNEMENTS DE
RECHERCHE**

INTRODUCTION

Cette partie présente tout d'abord une situation (déséquilibre modal dans les transports en faveur de l'automobile) qui peut être considérée, pour des raisons environnementales, comme insatisfaisante et légitimant une action dans le champ de l'Aménagement de l'Espace et Urbanisme (chapitre I).

Au cours du chapitre II sont étudiés les moyens à la disposition de l'aménageur. Parmi ceux-ci, nous soulignons l'importance de l'amélioration de la qualité de service des transports collectifs.

La question de la performance des transports en commun est abordée dans le chapitre III. Nous mettons en exergue l'importance de la prise en compte de la performance adaptative. La question de la vulnérabilité des transports collectifs constitue la problématique de cette thèse.

Au cours du chapitre IV consacré à la vulnérabilité, l'information est identifiée comme un levier potentiel dans la limitation de la propagation des perturbations. Le chapitre V est consacré à l'information des voyageurs dans les transports collectifs.

Lors du dernier chapitre de cette partie, il nous est possible de définir les questionnements spécifiques pour cette recherche et de formaliser des hypothèses à discuter. Nous précisons également la méthode utilisée (la modélisation) et le terrain d'étude choisi (Île-de-France).

Cette partie permet une construction progressive de la problématique de recherche et la définition d'hypothèses à discuter.

CHAPITRE I **DESEQUILIBRE MODAL DANS**

LES TRANSPORTS ET

PROBLEMES ENGENDRES

Introduction

Ces dernières décennies, une croissance forte de la mobilité des marchandises et des hommes en Europe a pu être observée. Pour les transports de voyageurs, cette croissance a principalement profité à la route et en particulier à l'automobile, à tel point que le terme « hégémonie » est parfois employé pour désigner la prédominance de ce mode.

Les hommes sont dépendants de l'automobile pour la grande majorité de leurs déplacements (Dupuy, 1999), ce qui pose de nombreux problèmes, notamment sur le plan environnemental. L'automobile est en effet, au niveau individuel, plus performante pour la plupart des déplacements que les modes de transport alternatifs (notamment sur les distances courtes ou moyennes, jusqu'à 200-300 kilomètres¹) mais il n'en n'est pas nécessairement de même sur le plan de l'Intérêt Général.

Ce phénomène a été largement facilité par les politiques de transport menées depuis la fin de la seconde guerre mondiale et l'absence de coordination entre les politiques en matière de transports et d'Aménagement.

Néanmoins, en raison de l'augmentation des problèmes liés à la dégradation de l'environnement, ce déséquilibre modal est désormais de plus en plus considéré comme un problème devant être traité dans une perspective de développement durable des territoires.

Quelles sont les caractéristiques de cette situation ? Les problèmes posés nécessitent-ils des actions correctives ?

¹ Sur les distances plus importantes, le TGV puis l'avion, lorsque des lignes existent, sont plus performants d'un point de vue temps de parcours (mais pas nécessairement au niveau du coût du trajet).

Section 1 - Caractéristiques générales

Quelques grandes tendances ont caractérisé l'évolution des déplacements durant les cinquante dernières années : une forte croissance de la mobilité se portant essentiellement sur l'automobile, le déclin relatif des transports collectifs, l'allongement des distances parcourues. De manière générale, la part modale de la voiture n'a cessé d'augmenter au cours des dernières années posant de nombreux problèmes au niveau de la gestion des déplacements.

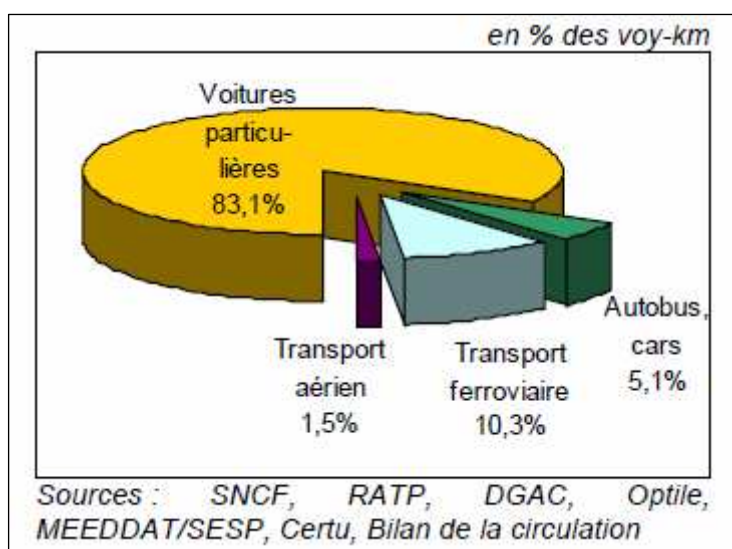


figure 2 Les transports intérieurs de voyageurs en France en 2007¹

Il existe des contre-exemples, comme par exemple la région parisienne (et notamment la Paris et sa proche couronne) où le taux d'utilisation des transports en commun reste élevé. Ces chiffres globaux masquent donc des réalités très diverses : parts modales des transports collectifs plus fortes en zone dense (ex : Paris) et très faibles en zones rurales. On observe également des évolutions conjoncturelles (celles-ci pouvant devenir structurelles) moins favorables à l'automobile, notamment lors d'augmentations des coûts de l'énergie. Les transports collectifs voient par ailleurs depuis quelques années leur trafic augmenter mais de manière hétérogène.

¹ Source : (Commission des comptes des transports de la Nation, 2008).

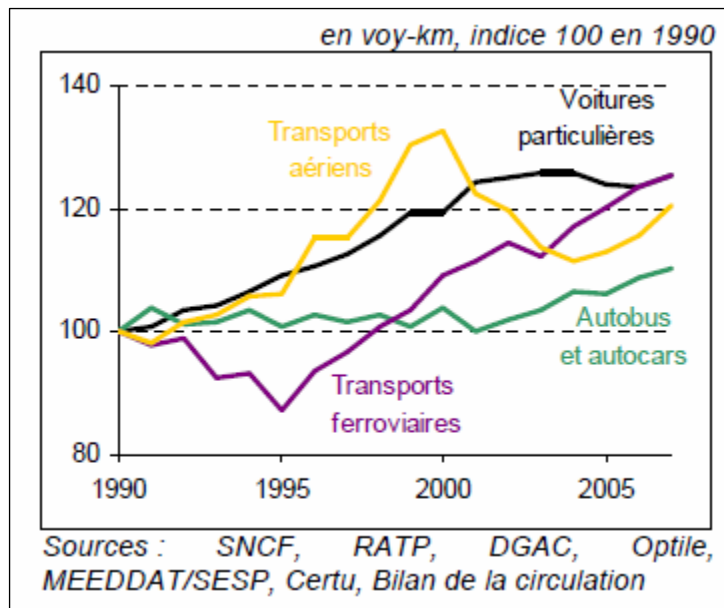


figure 3 Evolution des transports intérieurs de voyageurs en France par mode¹

A- Evolution de l'organisation spatiale et temporelle des territoires

Les facteurs à l'origine de ce déséquilibre sont multiples et liés à la fois à l'environnement du système de transport (demandes de déplacement de plus en plus éclatées sur le plan spatial et temporel) et à l'offre de transport proprement dite.

Il y a une adéquation entre la mobilité possible avec le véhicule individuel et l'évolution de la demande sociale en matière de déplacement. Les interactions entre l'offre et la demande sont fortes et de multiples actions ont facilité le développement de ce phénomène. Ainsi, durant les années 1960, la politique en matière d'urbanisme a consisté à « adapter la ville à l'automobile »².

Au cœur des métropoles, la mobilité s'est accrue, transformée et complexifiée. « A un modèle reposant sur une dichotomie centre/périphérie, heure pleine/heure creuse, domicile/travail se substitue une mobilité "éclatée" dans l'espace et le temps » (Jannin, 2000). Dans la mesure où un nouveau rapport à l'espace-temps se crée, fortement lié à l'utilisation de l'automobile, celle-ci multiplie les opportunités de combinaison des activités, en permettant d'effectuer plus facilement des boucles de déplacement.

Au niveau urbain et régional, l'offre de transport collectif fondée initialement sur des migrations alternantes et duales, rencontre aujourd'hui des difficultés pour s'adapter à la demande car la part des déplacements domicile-travail tend à régresser.

En Île-de-France, les déplacements s'opèrent sur des distances de plus en plus longues et de façon moins radioconcentrique. Les déplacements mécanisés banlieue-banlieue ont connu une

¹ Source : (Commission des comptes des transports de la Nation, 2008).

² Selon la formule de G.Pompidou, à propos de Paris.

forte croissance entre 1991 et 2001 : + 20 %. Or, la part modale de la voiture particulière est très élevée pour les déplacements banlieue-banlieue (87 %) alors que les transports collectifs sont prédominants pour les déplacements dans ou vers Paris¹.

En résumé, les territoires se sont considérablement transformés et leur organisation spatiale et temporelle a elle aussi connu des évolutions influençant la nature des demandes de déplacement, favorables aux modes de déplacement flexibles et multi-fonctionnels² et donc inévitablement à la voiture.

La sous-section suivante met en évidence, dans ce contexte, les handicaps des transports en commun, comparativement à l'automobile³.

B- Handicaps des transports en commun comparativement à l'automobile

L'utilisation des transports en commun se heurte à des obstacles spécifiques, comme l'astreinte à des lignes et à des horaires, comparativement à la continuité du déplacement offerte par l'automobile et sa plus grande flexibilité : « *l'automobile, par la maîtrise étendue de l'espace-temps qu'elle permet, multiplie les opportunités d'associer des activités à de la mobilité pour une plus grande accessibilité. Les transports publics permettent beaucoup moins ce type de chaînage, ce qui les rend moins attractifs car d'un usage moins flexible* » (Kaufmann, Jemelin et Margail, 2000). A ce niveau, des paramètres psychologiques jouent également un rôle non négligeable : il est souvent plus simple sur le plan cognitif de programmer un parcours en voiture comparativement aux transports en commun, qui induisent la plupart du temps des correspondances, des horaires, des opérateurs différents...et donc une recherche d'informations plus longue et parfois fastidieuse⁴.

Il est rarement possible d'effectuer l'ensemble du trajet sans changer de mode de transport. Seuls les modes de transports individuels (ex : voiture, vélo, moto) sont capables d'offrir un déplacement de porte à porte. Tout du moins, la capillarité du réseau routier permet plus souvent de réaliser des trajets sans changer de mode de transport⁵.

D'autres facteurs jouent un rôle non négligeable : inadaptation aux déplacements transversaux, sentiment d'insécurité, inconfort. Les perturbations (incidents divers, mouvements sociaux) ont également une influence sur l'image des transports collectifs.

F. Ascher résume ainsi la situation en Île-de-France : « *les habitants de l'Île-de-France aspirent à des transports plus rapides, plus souples, plus confortables, plus permanents et plus*

¹ Source : (STIF, 2005).

² Sur cet aspect, des efforts importants sont actuellement menés pour équiper les lieux de transports en commun (ex : gares) de services.

³ Il serait également possible de comparer les autres modes (marche à pied, bicyclette..) mais nous nous limitons ici au cas des transports en commun afin de ne pas alourdir inutilement la démonstration.

⁴ Toutefois, dans les agglomérations importantes, il est parfois plus simple pour un individu ne connaissant pas la ville de trouver son itinéraire en transport en commun, surtout si l'information est présentée de manière claire (site Internet avec recherche d'itinéraires d'adresse à adresse multi-modes et multi-transporteurs. Exemples en Ile-de-France : transilien.com, transport-idf.com et ratp.fr).

⁵ C'est pourquoi des politiques visant à réduire les facilités de stationnement sont parfois menées car il s'agit d'un levier d'action important si l'on souhaite limiter l'usage de la voiture (voir chapitre II de cette partie).

sûrs à tous points de vue. Il est certain que dans la période récente, c'est l'automobile qui a été le moyen principal d'adaptation à cette transformation des territoires et à cette évolution des besoins » (Ascher, 1999). La voiture est devenue un élément structurant de l'espace urbain et elle se développe suivant une logique exclusive qui tend encore à renforcer son usage. Par exemple, l'habitat diffus du périurbain ou l'installation des centres commerciaux en périphérie profitent et participent à l'adaptation de la ville à la voiture. En revanche, ils excluent la marche à pied et rendent difficile la desserte en transport collectif.

Ainsi, l'adaptation du véhicule individuel aux mutations territoriales et socio-économiques joue en faveur du renforcement de sa suprématie, au détriment des autres modes de transport, même si la croissance devrait être moins forte que par le passé (augmentation du prix de l'énergie, montée des préoccupations environnementales).

Section 2 - Problèmes liés à ce déséquilibre

Il convient de ne pas considérer la prédominance du véhicule individuel comme un aspect négatif en soi, mais comme un problème si elle engendre des dégradations de la qualité de vie.

Le problème réside tout d'abord dans le fait que *« les réseaux routiers et la voiture individuelle n'ont jamais été réellement pensés dans leur dimension spatiale »* (Drewe et Joignaux, 2002) et que le développement de l'utilisation de l'automobile s'est fait sans mécanisme de régulation, mais au contraire d'amplifications. Les problèmes liés à l'automobile ont toujours été perçus mais ils *« sont restés masqués par une large adhésion populaire à la modernité dont l'automobile était le symbole actif »* (Dupuy, 1999).

Nous présentons ici quelques aspects négatifs liés au déséquilibre modal.

A- Dépendance vis-à-vis du véhicule individuel

La voiture, grâce aux opportunités qu'elle offre (G. Dupuy la qualifie d'« intermédiaire social ») procure la plupart du temps des avantages à celui qui l'utilise grâce à des effets externes positifs pour les conducteurs¹ qui compensent les effets négatifs (embouteillage, pollutions, etc.). Il en résulte toutefois une forte dépendance. Les effets positifs *« interagissent de façon cumulative, de telle sorte que l'incitation à entrer dans le système automobile est considérable, la dépendance très forte, et la difficulté à surmonter cette dépendance très grande »* (Dupuy, 1999).

La voiture est devenue pour la société plus une dépendance qu'un véritable choix. *« Dans sa polysémie le terme évoque bien ce qui aujourd'hui fait problème avec l'automobile : le sentiment d'un déferlement irréprouvable aux effets incoercibles sur les établissements humains »* (Dupuy, 1999). La dépendance est individuelle² mais concerne aussi

¹ G. Dupuy définit trois types d'effets : effets de club, de flotte et de réseau. Voir (Dupuy, 1999).

² 83 % des Français déclaraient en 1998 à la SOFRES ne plus pouvoir se passer de l'automobile (Dupuy, 1999).

l'ensemble géographique formé par un espace de mobilité et l'organisation sociétale qui lui est liée. La voiture « *étend son emprise sur un espace étiré et dilaté par l'évolution d'un système automobile qui ne cesse de s'agrandir* » (Dupuy, 1999).

Le développement de l'automobile se fait sur un mode monopolistique¹ tendant à rendre nécessaire pour chacun sa possession et son utilisation, pour ne pas être marginalisé : « *ceux qui restent à l'extérieur du système automobile² peuvent sans doute survivre, ils sont moins dépendants, pourtant ils ne bénéficient pas des mêmes avantages que les autres* » (Dupuy, 1999). Cette dépendance est toutefois variable selon les zones, en fonction du niveau de service des transports collectifs.

B- Développement urbain non souhaitable

Les politiques de transports intéressent les aménageurs, urbanistes et géographes préoccupés par les questions d'Aménagement du territoire³. Les choix en matière de transports et d'urbanisme sont étroitement liés puisque les transports ont une influence sur le développement urbain et réciproquement.

Il est communément admis aujourd'hui que le choix de privilégier un mode de transport, individuel ou collectif, modèle des formes d'urbanisation. Ainsi, P. Merlin (Merlin, 1992) distingue deux modèles extrêmes. Le premier modèle accorde la priorité à la voirie et facilite le développement de l'automobile. Celui-ci entraîne un développement résidentiel à faible densité, à base d'habitat individuel, en tâche d'huile, ainsi que la dévitalisation du centre peu accessible. Au contraire, dans le deuxième modèle la priorité est accordée aux transports en commun et conduit à une urbanisation dense, à base d'immeubles collectifs, autour des stations de métro et à un renforcement du centre⁴.

Le premier modèle décrit correspond à ce que l'on qualifie souvent de modèle de ville à l'américaine. Or, celui-ci est très loin de correspondre à la forme traditionnelle de la plupart des villes européennes. Les transports collectifs et autres modes de transport alternatifs doivent donc continuer à jouer un rôle important dans ces villes si l'on souhaite qu'elles conservent leur identité et leurs spécificités.

Les infrastructures routières et leur utilisation par les véhicules individuels ne sont par ailleurs pas véritablement porteurs d'urbanité, au contraire des infrastructures de transport collectif qui peuvent apporter une dimension esthétique réelle à la ville. Il est possible à ce sujet d'évoquer l'impact fort du renouveau des tramways dans les agglomérations françaises sur l'urbanisme de celles-ci et leur image dans un contexte de concurrence entre villes. « *Aujourd'hui la réapparition du tramway n'est plus synonyme dans l'opinion de retour en*

¹ Ainsi, le développement de l'automobile s'est accompagné d'une dégradation des modes de transport alternatifs.

² Incluant le réseau routier, le carburant, les services de distribution et de réparation, de stationnement, les auto-écoles, les restaurants rapides, etc. (Dupuy, 1999).

³ Voir le chapitre II de cette partie.

⁴ Néanmoins, il convient de noter que l'automobile n'a pas entraîné à elle seule la périurbanisation puisque celle-ci a commencé bien avant avec les chemins de fer de banlieue.

arrière mais devient au contraire le symbole d'une modernité bien tempérée sachant garder une dimension humaine » (CERTU, 2004).

C- Pressions sur l'environnement naturel

Les transports représentent une part conséquente de la consommation totale d'énergie et en particulier de pétrole.

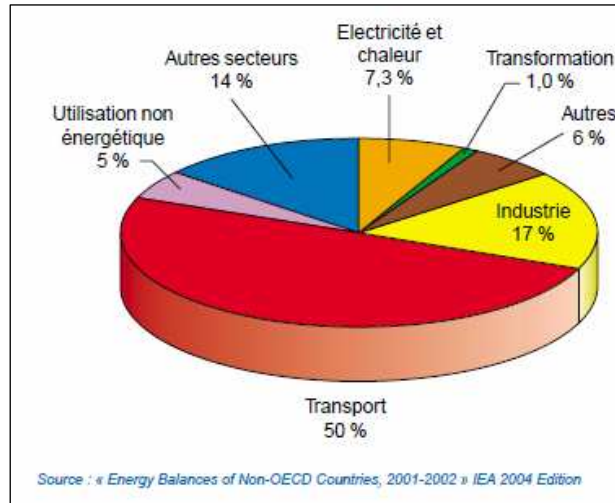


figure 4 Consommation de produits pétroliers dans le monde en 2002 : 3 GTep¹

Dans les zones urbaines, le développement des infrastructures routières a conduit à un étalement de la ville sur des bassins de vie de plus en plus vastes, avec des conséquences non négligeables sur les distances parcourues et les émissions inhérentes. Outre l'augmentation continue des flux, le déséquilibre modal s'est progressivement accru au profit des modes de transport les plus polluants et dont l'efficacité énergétique est comparativement faible².

Les faibles densités et le recours massif à l'automobile entraînent des consommations de carburants plus élevées (voir ci-dessous le graphique de P. Newman et J. Kenworthy).

¹ 3 milliards de tonnes équivalent pétrole. Source : (IFP, 2004).

² Ce propos peut être nuancé par un constat : l'amélioration de la performance énergétique des automobiles.

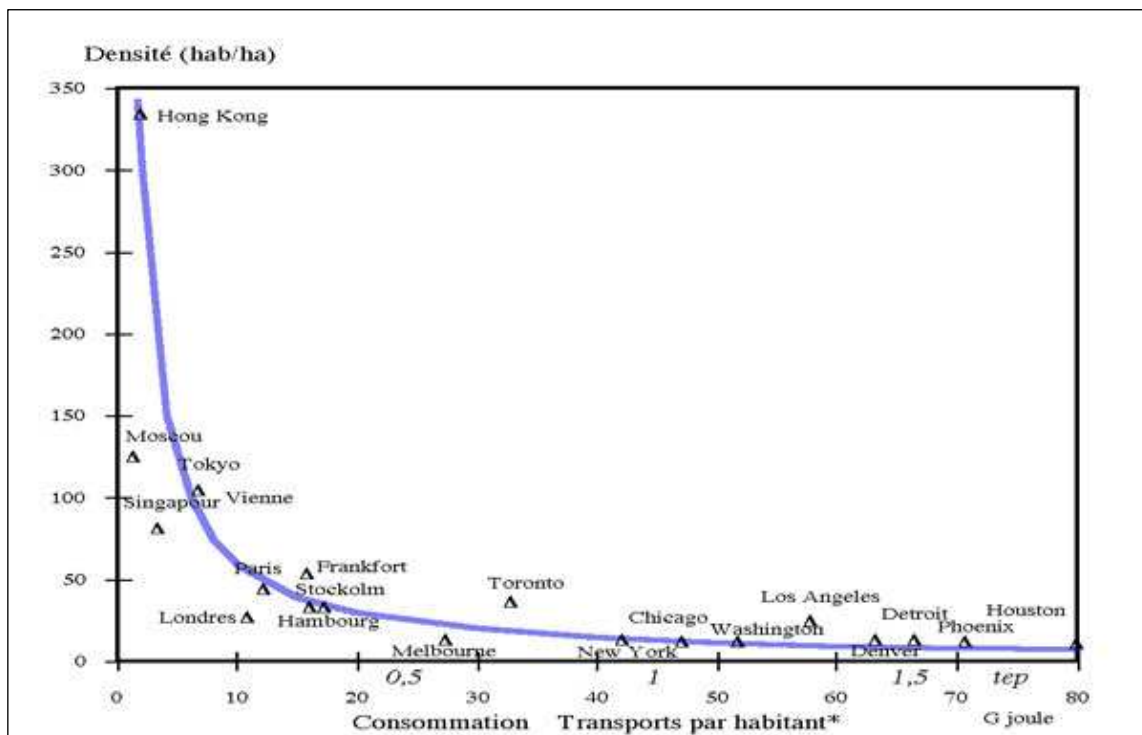


figure 5 Consommation de carburant par rapport à la densité de population en 1980¹

Les pressions sur l'environnement sont multiples et s'exercent à des échelles variées. Les problèmes posés sont tout d'abord globaux : réchauffement climatique, dû en partie à l'augmentation des émissions de dioxyde de carbone liées à l'utilisation des moyens de transport motorisés. Le secteur des transports doit ainsi faire face à des enjeux planétaires et il est certain que les contraintes internationales en matière d'environnement auront des répercussions croissantes sur les actions à mener.

Les nuisances sont également locales et régionales : pollutions de l'air, bruit, consommation d'espace, fractionnement des milieux naturels par les infrastructures, imperméabilisation et artificialisation des sols, etc. C'est d'ailleurs à ce niveau qu'elles sont le plus souvent perçues.

¹ Newman Peter, Kenworthy Jeffrey. 1989. *Cities and Automobile Dependence. An international Sourcebook*. Sydney : Gower Technical, 388 p.

Moyen de transport	Surface à l'arrêt (en m ²)	Nombre moyen de passagers (en pointe)	Surface à l'arrêt par passager (m ²)	Surface en mouvement par km parcouru (m ² *h/km)	Surface en mouvement par passager km (en m ² *h*/km)
Marche	0,3	1	0,3	0,4	0,4
Bicyclette	1,5	1	1,5	1,5	1,5
Automobile	10	1,25	8	3,0	2,4
Autobus	30	30	1,0	3,0	0,3
RER	540	1800	0,3	1200	0,66

1m²h = 1 m² utilisé pendant 1 heure

tableau 1 Consommation d'espace de différents modes de transports urbains¹

L'espace public occupé pour le déplacement de 100 personnes est de :

- 1700 mètres pour une file de 83 voitures à intervalle de 14 mètres,
- 30 mètres pour un tramway de 200 places occupé à 50 %, (Luca, 2002).

La consommation d'espace par les voitures pénalise également aux heures de pointe la circulation des autobus, entraînant des retards. Lorsque un voyageur subit un embouteillage, la cause première de celui-ci est le flux de voitures, pas le bus lui-même.

Le déséquilibre modal tel qu'on l'observe actuellement est ainsi générateur de nombreuses pressions, notamment environnementales, et nécessite des actions afin d'en limiter l'ampleur et les effets négatifs. Il s'agit de chercher à concilier la protection de l'environnement avec l'épanouissement de la mobilité. C'est précisément au niveau du lien entre l'intérêt individuel procuré par l'usage des modes de transport et les conséquences de leur utilisation (excessive pour l'automobile) que se situe un enjeu majeur actuel.

¹ Source : (CNT, 1999).

Conclusion

L'évolution des déplacements de voyageurs a été caractérisée ces dernières années par une forte croissance du volume et de la part modale de l'automobile, mieux adaptée aux évolutions territoriales, qu'elle a elle-même influencées.

Cette prédominance de l'automobile dans les déplacements est génératrice de problèmes, notamment sur le plan environnemental. A l'heure où la liberté de déplacement est considérée comme un acquis et un droit constitutionnel, un enjeu important est le rééquilibrage, au moins partiel, entre les modes de transport.

Ce rééquilibrage doit par ailleurs être accompagné de mesures visant à rendre propres et économes tous les modes de transport dont la société a besoin. Le traitement des problèmes ne peut consister uniquement à lutter contre un mode de transport en particulier.

Ce constat d'insatisfaction quant à la situation et les évolutions possibles dans le domaine des déplacements constitue la première étape de la réflexion et l'origine de notre recherche dans le domaine des transports.

Il fournit les éléments justifiant ce travail qui se situe dans le champ de l'Aménagement de l'Espace et Urbanisme.

Nous pouvons dès lors nous interroger sur les outils existants et pouvant être utilisés pour contribuer au développement d'un système de transport plus respectueux de l'environnement.

CHAPITRE II AMENAGEMENT ET TRANSPORT : ACTIONS CORRECTIVES

Introduction

La présentation faite dans le chapitre précédent des externalités négatives liées au déséquilibre modal plaide en faveur de mesures visant à améliorer la situation.

Les décideurs publics font face à un ensemble de problèmes cruciaux. En plus des préoccupations d'investissement et de congestion, ils doivent intégrer les problèmes de sécurité, d'efficacité mais aussi d'environnement. L'élargissement du champ des préoccupations élève la complexité de la tâche de la planification de façon significative (Laichour, 2002).

Diverses actions doivent être mises en place si l'on souhaite infléchir les tendances en cours. Nous pouvons dès lors nous poser la question suivante : quels sont les moyens d'action propres à l'Aménagement de l'Espace et Urbanisme ?

Il convient tout d'abord de définir l'Aménagement-Urbanisme, discipline et pratique sur laquelle se fonde cette thèse (section 1). En effet, la problématique et les questionnements à définir doivent être en cohérence avec le champ théorique (inter-) disciplinaire de l'Aménagement-Urbanisme.

Nous présentons ensuite les actions correctives possibles (section 2). Nous sommes ainsi en mesure à la fin de ce chapitre de définir le champ d'actions que nous choisissons d'approfondir dans le cadre de cette thèse : l'amélioration de la performance des transports collectifs.

Section 1 - L'Aménagement-Urbanisme

A- Fondements théoriques

L'Aménagement part d'une insatisfaction quant à l'état présent de l'espace et/ou à son évolution supposée¹. Les actions ont pour but de modifier cet état ou de contrecarrer une évolution considérée comme non satisfaisante. Elles portent principalement sur l'espace et le temps, l'objectif étant un état futur de cet espace dans le temps.

Nous avons présenté au cours du chapitre I les problèmes liés au fonctionnement actuel du système de transport et à ses tendances. Ceci constitue à nos yeux une situation insatisfaisante, légitimant des actions relevant de l'Aménagement-Urbanisme.

L'Aménagement-Urbanisme s'insère dans un cadre théorique, celui des théories de l'action et de la pratique. « *En effet, un aménagement-urbanisme purement théorique n'a d'autre intérêt qu'intellectuel, ce qui ne peut suffire étant donné la demande de la société pour l'amélioration de certaines situations, voire de toutes les situations auxquelles elle est confrontée* » (Martouzet, 2002b). Il s'inscrit également dans l'ensemble formé par les théories de la décision.

Au cours de sa thèse de Doctorat, D. Martouzet (Martouzet, 1995) retient quatre critères pour la définition de la pratique de l'Aménagement-Urbanisme² :

- Il s'agit d'une action qui s'inscrit dans le **temps** (prospective dans sa méthode et sa visée).
- C'est une action sur l'**espace** : cela reste la base de l'Aménagement : « *les problèmes d'Aménagement-Urbanisme ont nécessairement une dimension spatiale, non pas comme unique dimension mais où la dimension spatiale doit avoir une certaine importance relativement aux autres* » (Martouzet, 2002b).
- C'est une action **non close**. La non-clôture porte ici sur les aspects spatiaux et temporels mais également sur les disciplines constitutives de l'interdisciplinarité, les acteurs et populations concernés.
- C'est donc une action **collective**.

D. Martouzet souligne que l'Aménagement-Urbanisme s'intègre dans un cadre pluridisciplinaire ou interdisciplinaire : « *d'un point de vue historique, l'intégration de données multiples et diverses s'est faite de manière croissante, jusqu'à enlever à l'économie son statut de monocritère ou de critère prépondérant* » (Martouzet, 2002b).

¹ Selon les termes de Ph. Mathis.

² Dans son HDR, D. Martouzet discute ces critères et présente l'évolution de sa conception de l'Aménagement-Urbanisme. Nous renvoyons le lecteur au texte original de l'auteur (Martouzet, 2002b).

L'environnement est devenu une des préoccupations majeures en Aménagement-Urbanisme, comme dans d'autres domaines. Le principe de développement durable s'inscrit de plus en plus comme un référent incontournable. Il peut être défini comme un « *mode de développement veillant au respect de l'environnement par une utilisation prudente des ressources naturelles afin de les rendre durables dans le long terme* »¹. Il s'agit de satisfaire les besoins de développement des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. La recherche d'un compromis entre des critères souvent contradictoires (économiques, sociaux, environnementaux) est difficile, tout particulièrement dans le domaine des transports.

B- Aménagement des et par les transports

L'Aménagement a une influence sur la demande de mobilité au sein d'un territoire. Celle-ci est liée à des décisions à long et court terme, pouvant être regroupées en divers éléments (de Lapparent, 2003) : le choix du lieu de résidence, des aménités et du lieu de travail, du mode de transport, des itinéraires et horaires des déplacements. De même, l'Aménagement dans le domaine des transports est à plus ou moins long terme selon les actions entreprises (construction de nouvelles infrastructures, légères adaptations de l'offre de transport...).

1 - Aménagement des transports

L'Aménagement des transports consiste à mettre en adéquation l'offre avec les demandes existantes et leurs évolutions possibles. Il peut également y avoir une anticipation par rapport à ces évolutions.

L'offre de transport est liée à la représentation des besoins des voyageurs par les décideurs. Ces besoins se distribuent dans l'espace et dans le temps : origines et destinations des voyageurs, mais aussi heures de déplacement. Par ailleurs, certains éléments correspondent plus à des dimensions qualitatives de l'offre : information, confort, sécurité, etc.

Les actions de modification (adaptation, création, suppression) s'opèrent à des échelles diverses (globales ou locales) en fonction des évolutions à prendre en compte. Elles sont liées à des critères de rentabilité des infrastructures et des services proposés, outre les problématiques d'Aménagement-Urbanisme. Des partenariats sont nécessaires associant différents acteurs : Etat, collectivités, opérateurs, associations, etc.

En raison des externalités liées aux transports, l'Aménagement des transports pose également la question des modes à privilégier. A ce niveau, l'article 4 de la LOTI² stipule que « *le développement de l'usage des transports collectifs de personnes revêt un caractère prioritaire* »³.

La Loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie du 30 décembre 1996 a imposé la réalisation de Plans de Déplacements Urbains (PDU) pour les agglomérations de plus de

¹ Encyclopédie Universelle Larousse, 2004.

² Loi d'Orientation sur les Transports Intérieurs.

³ www.legifrance.fr

100 000 habitants, en leur imposant des objectifs parmi lesquels la réduction du trafic automobile, le développement des transports collectifs et des modes doux.

Les transports ont également une vocation sociale comme le stipule le **Droit au Transport** qui selon l'article 2 de la LOTI doit permettre aux citoyens de « *se déplacer dans des conditions raisonnables d'accès, de qualité et de prix ainsi que de coût pour la collectivité, notamment par l'utilisation d'un moyen de transport ouvert au public. Dans cet esprit, des mesures particulières peuvent être prises en faveur des personnes à mobilité réduite* ». Ce Droit au Transport est intimement lié à un **Droit à l'Information** (« *droit pour les usagers d'être informés sur les moyens qui leur sont offerts et sur les modalités de leur utilisation* »¹).

Dans ce contexte, les Autorités Organisatrices responsables des transports doivent donc satisfaire un double enjeu : écologique et social. Il s'agit d'offrir à la fois une alternative à la voiture pour assurer un développement durable des territoires et de garantir le Droit au Transport pour toutes les personnes ne disposant pas d'un véhicule individuel.

2 - Aménagement par les transports

Les transports sont le support d'actions d'Aménagement-Urbanisme car les moyens de transport mettent en lien les territoires et des hommes. Ils induisent des vitesses de déplacement différenciées et une action sur ces derniers a donc potentiellement des conséquences territoriales non neutres : concentration au niveau des zones pourvues d'une bonne accessibilité par exemple.

Les choix en matière de transports jouent donc un rôle important dans l'organisation de l'espace et la répartition des populations. Ils contribuent à structurer les liens sociaux, les modes de vie par les formes d'urbanisation qu'ils influencent : « *la configuration des dessertes influe directement sur la répartition sociale de la population, lui permet plus ou moins d'accéder à la ville et à ses équipements, désenclave ou enclave des quartiers, dont elle augmente ou diminue ainsi la sécurité* » (Lévy, 1999a). Par exemple, la mise en place du RER-E en région parisienne a contribué au développement de l'Est de la région Île-de-France.

Les réseaux de transport sont souvent développés afin de « structurer », d'assurer une cohésion du territoire desservi. Mais les relations directes, mécanistes, entre réseaux et territoires ne correspondent pas à la réalité. Celles-ci sont au contraire affectées d'un haut degré d'interaction, de complexité et donc d'incertitude : « *leur impact inéluctablement positif sur les différentes dimensions de leur environnement – territorial, socioéconomique, écologique – est loin d'être vérifié dans tous les cas et à toutes les échelles : de nombreux doutes subsistent, nourris par des travaux reconnus, particulièrement nombreux dans le champ des transports, et faisant apparaître des contre-effets ou effets pervers et une grande diversité spatiale et temporelle des impacts* » (Drewe et Joignaux, 2002).

La difficulté principale est liée à l'articulation de politiques sectorielles (réseaux) à des politiques territoriales (zonales), phénomène bien mis en évidence par les travaux se situant

¹ www.legifrance.fr

dans le courant de l' « urbanisme des réseaux »¹. Cette difficulté est valable à toutes les échelles. Par ailleurs, les transports se sont structurés par mode mais les politiques actuelles tendent à présent à favoriser leur complémentarité.

Le déséquilibre modal en matière de transport de voyageurs, mis en évidence au cours du chapitre précédent, est insatisfaisant sur le plan environnemental et légitime une action dans le champ de l'Aménagement-Urbanisme. Nous avons volontairement opté pour une définition large (dimensions de l'Aménagement-Urbanisme définies par D. Martouzet) afin d'envisager de nombreuses actions pour la correction de cette situation et des problèmes afférents.

Notre recherche se situe dans le domaine spécifique des transports et nous travaillons sur l'Aménagement des transports et non sur l'Aménagement par les transports, même si ces deux dimensions sont étroitement liées.

Section 2 - Actions en faveur d'un report modal

Nous présentons ici succinctement quelques actions en faveur d'un report modal, sans approfondir toutefois les tenants et aboutissants de cette problématique, très souvent discutée dans la littérature². De plus, « *le catalogue des actions locales, nationales et internationales est impressionnant* » (Dupuy, 1999).

De nombreuses mesures techniques et/ou politiques existent et sont à disposition de l'aménageur mais leur mise en œuvre est parfois difficile politiquement. Nous les présentons ici de manière très large dans la mesure où nous concevons l'Aménagement comme une discipline et une pratique non-close, aux multiples dimensions. Diverses mesures, dans différents domaines et à de multiples niveaux d'intervention sont nécessaires si l'on veut parvenir à un rééquilibrage dans l'utilisation des modes de transport. Les actions doivent à la fois concerner les réseaux physiques, supports des mobilités, et les services développés sur ces derniers (Joignaux, 2002). Elles sont également liées à des mesures dans d'autres domaines d'intervention (ex : mesures favorisant la densité urbaine).

Les actions s'inscrivent dans des temporalités variées et il est clair que nombre d'entre elles ne peuvent avoir de répercussions qu'à long terme. Les options en matière d'infrastructures de transports, de politiques d'Urbanisme et d'Aménagement se prennent sur des horizons de plusieurs dizaines d'années et confèrent une forte inertie à ce secteur. Les constructions de nouvelles infrastructures, soumises à débat public, se situent dans un horizon d'environ 15 ans.

¹ Courant trouvant son origine dans l'ouvrage fondateur *Broadacre City*, de Wright (1943) et largement développé en France par G. Dupuy.

² Voir par exemple les travaux de G. Dupuy (Dupuy, 1999) ou de V. Kaufmann relatifs à ce sujet. Exemples : (Kaufmann et Jemelin, 2002), (Kaufmann et alii, 2003).

A- Utilisation de l'espace

L'occupation de l'espace constitue un moyen d'action déterminant. Il existe un lien entre la trame urbaine et le niveau d'utilisation des transports collectifs. Ainsi, les zones denses présentent, toutes choses égales par ailleurs, des parts modales de transports en commun plus élevées que dans les aires d'urbanisation plus diffuses¹. On peut citer à ce sujet la politique des villes compactes menée aux Pays-Bas². L'automobile souffre de handicaps en milieu urbain dense : embouteillages et tarifs plus élevés pour le stationnement principalement. De plus, la densification des villes permet souvent de diminuer la longueur des trajets effectués.

Le partage de la voirie est un levier car il conditionne la performance des différents modes, notamment en milieu urbain : *« en transports de personnes, le problème essentiel se pose dans les agglomérations, où l'on doit viser une meilleure utilisation de l'espace limité qui est disponible pour les déplacements de personnes et des marchandises. La nouvelle répartition de la voirie, organisée dans le cadre de plans de déplacements urbains (PDU) prenant aussi en compte la distribution des marchandises, doit se faire au bénéfice de transports en commun en site propre, plus adaptés aux besoins »* (CNT, 1999). Le partage de la voirie peut contribuer à l'amélioration de la performance des transports alternatifs mais également diminuer celle de l'automobile, si l'on réduit l'espace dévolu à cette dernière. La limitation des places de stationnement, combinée à des mesures tarifaires, constitue également un levier d'action stratégique.

B- Tarification incitative

Le coût du transport est un élément décisif du choix modal, lorsque celui-ci est possible. Le rôle de la tarification ne se réduit pas au financement du fonctionnement et du développement du système de transport. *« Grâce au caractère de « signal de rareté » des prix, c'est un moyen de régulation souple permettant aux pouvoirs publics de jouer sur l'élasticité de la demande, à court ou long terme, avec un double effet : la dissuasion (surtout pour le trafic de pointe), la couverture des coûts, notamment externes, et des nouveaux investissements »* (CNT, 1999).

La perception du coût de l'utilisation de l'automobile est généralement partielle. Des coûts externes sont par ailleurs supportés par la collectivité (pollution, accidents, dégradation des infrastructures...) ³. Certaines mesures ont explicitement pour but de renchérir l'utilisation de la voiture particulière : prix du stationnement, péage urbain de zone. Néanmoins, elle sont difficiles à mettre en œuvre politiquement tant la dépendance vis-à-vis du « système automobile » est grande ⁴.

¹ On peut évoquer à nouveau ici la courbe de Newmann et Kenworthy sur le lien entre la consommation de carburant et la densité des villes (voir le chapitre précédent).

² Sur ce point Ph. Mathis signale que compacité et densité ne sont pas des notions équivalentes. On peut alors émettre l'hypothèse que densification et recherche de compacité vont dans le sens d'une limitation de l'hégémonie automobile.

³ Voir le chapitre précédent.

⁴ Toutes proportions gardées, on peut également noter que les hausses tarifaires des transports en commun entraînent également des mobilisations, notamment là où leur utilisation est importante. Le Syndicat des Transports d'Île-de France est ainsi parfois le théâtre de manifestations lors des augmentations annuelles des prix des billets et abonnements.

De même, le prix des billets de transports en commun correspond de la même manière rarement à la réalité des coûts effectifs de l'opérateur. Ces derniers sont pris en charge selon des proportions variables par la collectivité, en raison de la dimension de service public.

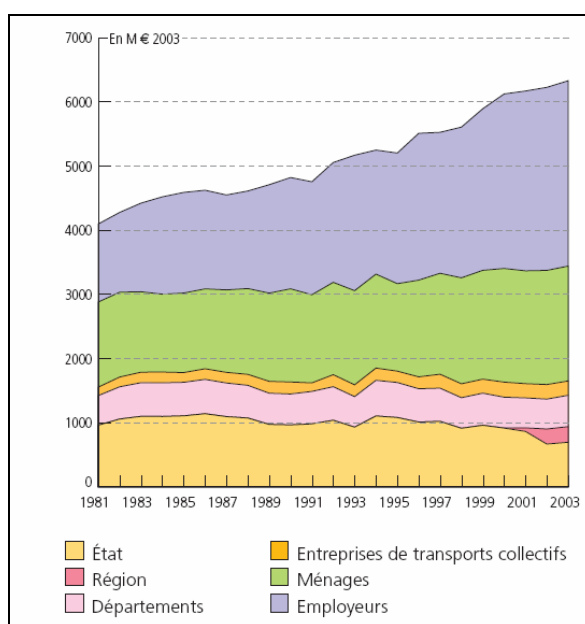


figure 6 L'évolution des contributions au financement des transports publics en Île-de-France¹

Selon F. Ascher, les tarifs exigés des voyageurs doivent être les plus proches possible des coûts réels de leurs déplacements. En parallèle, les déplacements relevant des objectifs prioritaires des services publics doivent alors être aidés par les pouvoirs publics (Ascher, 1999). Certains auteurs appellent à une tarification d'usage des infrastructures au coût marginal social de développement : « afin de moduler la demande de façon optimale pour la collectivité en s'approchant de la vérité des coûts, il convient d'imputer les coûts d'usage directs et indirects, ce qui amène généralement à se référer à la notion de « coût marginal social de développement » qui a l'avantage d'inclure les coûts de pollution et de congestion, ainsi que celui des investissements futurs » (CNT, 1999).

A contrario, R. Petrella plaide en faveur de la gratuité des transports en commun en Île-de-France : « tendre vers la gratuité, notamment dans le contexte de l'Île-de-France, c'est apporter une contribution importante à la reconstruction de la citoyenneté à l'aube du XXIème siècle. Comme la citoyenneté fut promue au XIXème siècle par la scolarisation obligatoire gratuite, et dans la seconde moitié du XXème siècle par la santé et le logement pour tous ainsi que par l'État du welfare, la citoyenneté au XXIème siècle sera rétablie – après les dévastations qu'elle a subies ces vingt dernières années – grâce au renouvellement, à l'échelle locale, nationale, continentale et mondiale, des droits d'accès aux biens et services de base (eau, santé, alimentation, éducation...) dont précisément les transports font partie » (Petrella, 1999).

¹ Source : (STIF, 2005).

La tarification des transports dépend des choix politiques plus ou moins volontaristes effectués. Elle dépend en partie de la place accordée à l'utilisateur du transport : usager, client, citoyen, consommateur¹ ?

C- Amélioration de la qualité des modes de transport alternatifs²

La qualité des modes de transport alternatifs est le facteur-clé d'un éventuel report modal, ou tout du moins d'une atténuation de la dépendance automobile. Les modes de déplacement doux, les transports en commun sont susceptibles de fournir une alternative crédible à l'automobile, si politiques de transport et d'urbanisme sont bien coordonnées (Kaufmann et alii, 2003). Il est en effet indispensable que les individus puissent être en mesure d'effectuer un véritable choix du mode à utiliser lorsqu'ils souhaitent se déplacer.

L'amélioration de la qualité de service des transports collectifs nécessite une action des pouvoirs publics, afin notamment d'assurer une certaine équité sur le plan spatial même si tout le monde ne peut disposer en tous points du territoire des mêmes possibilités de déplacement.

Les pouvoirs publics de nombreux pays ainsi que les autorités européennes se préoccupent de plus en plus de cette question et de la redéfinition des relations avec les opérateurs de transport. Ils s'efforcent d'améliorer le rapport « coût pour les pouvoirs publics / performances pour les usagers des services publics ». Certains pays facilitent la mise en concurrence entre les opérateurs (publics ou privés) potentiels de service public. Celle-ci n'est néanmoins pas toujours aisée car beaucoup de services publics nécessitent des compétences très pointues et des investissements à long terme.

Par ailleurs, en concurrence croissante avec la voiture particulière, l'intermodalité consiste à déployer une conception intégrée du produit transport public. C'est la performance globale des réseaux qui importe, plus que la performance de chacun d'entre eux³. Le développement de pratiques multimodales dépend étroitement de l'amélioration des interfaces et des performances des trajets initiaux et terminaux.

Ainsi, l'intermodalité s'inscrit dans une logique de « transport durable » permettant d'assurer une meilleure maîtrise des mobilités grâce à l'optimisation des connexions entre les modes et la promotion des modes moins polluants, comme les transports en commun. Ceci suppose une coordination des actions.

¹ Cette question est développée dans le prochain chapitre.

² Il aurait été possible d'inclure la tarification à cette partie mais nous avons préféré l'isoler afin de mettre en évidence ses caractéristiques propres.

³ Parfois, on utilise le terme intermodalité pour désigner spécifiquement l'articulation entre transports collectifs et modes de transport individuels. Ce n'est pas notre cas ici : ce terme renvoie ici à l'articulation entre modes de transports collectifs.

D- Coordination des actions

Les mesures contribuant au développement d'un système de transport plus respectueux de l'environnement doivent être coordonnées si l'on souhaite qu'elles soient efficaces. Les modes de transports doivent être organisés dans un souci de complémentarité, tant au niveau de la construction d'infrastructures que de la gestion des services de déplacements.

G. Dupuy propose de s'attaquer aux mécanismes de développement du système automobile par des mesures jouant sur les effets générateurs de la dépendance automobile. Les mesures portent sur la diversification des véhicules, le maillage des infrastructures routières et les politiques de stationnement (Dupuy, 1999). Elles s'attaquent aux mécanismes du développement plutôt qu'à ses symptômes.

Au niveau des agglomérations, les Plans de Déplacements Urbains ont pour but de promouvoir des actions allant dans le sens d'un report modal au profit des modes de transport moins polluants¹ :

- Déplacements : limitation par le maintien des acteurs économiques en zone urbaine dense.
- Circulation des voitures : abandon des élargissements et création des voies routières qui facilitent les déplacements en voiture et l'étalement périurbain. Accroissement des « zones 30 ».
- Stationnement des voitures : développement des parcs relais en extrémité des lignes de transports en commun et réduction des places sur les lieux de travail.
- Transports en commun : création de lignes fortes avec restructuration du réseau (lignes de rabattement, pôles multimodaux, interconnexions entre réseaux urbain et périurbain, etc.).

Les entreprises et administrations sont incitées à promouvoir l'utilisation de modes alternatifs à l'automobile pour les déplacements domicile-travail dans le cadre de Plans de Déplacement d'Entreprises (PDE) et de Plans de Déplacement d'Administration (PDA).

La coordination doit également être envisagée au niveau des échelles d'intervention : « *il est impossible pour des politiques dont le périmètre est local de s'inscrire dans une ambition de modération de la dépendance automobile si les politiques nationales n'expriment pas cette ambition par d'autres moyens, à leur échelle* » (Dupuy, 1999).

Parmi les mesures possibles, nous choisissons de développer ici la question de la performance des transports collectifs. Il s'agit à nos yeux d'un enjeu majeur actuel. Les transports collectifs doivent être adaptés à leur environnement et influencer sur le développement de celui-ci.

¹ Les PDU sont régis depuis juin 2001 par la Loi Solidarité et Renouvellement Urbains (SRU) qui considère l'espace urbain dans sa globalité : urbanisme, habitat, déplacements.

Conclusion

Suite au constat d'insatisfaction dressé lors du chapitre I, nous avons au cours du présent chapitre défini le cadre dans lequel s'effectuait cette recherche en délimitant le champ de l'Aménagement-Urbanisme. Nous avons ensuite présenté quelques actions pouvant contribuer à augmenter la part des modes alternatifs en les rendant plus compétitifs que le véhicule individuel dans certaines circonstances.

L'amélioration de la qualité de service des transports en commun constitue un élément décisif d'un report modal. Les conditions de mobilité ne doivent pas être dégradées en raison du nécessaire rééquilibrage entre modes. Il est préférable de proposer des alternatives crédibles à l'automobile plutôt que de limiter l'utilisation de celle-ci par des mesures coercitives, difficiles à mettre en œuvre et risquant d'être inefficaces.

Notons toutefois que les marges de manœuvre demeurent faibles et que des résultats spectaculaires ne peuvent être attendus, du moins à court terme. L'attractivité des modes de transport n'est pas toujours réciproque. Si des transferts modaux s'opèrent relativement facilement entre la marche à pied et l'automobile comme entre les deux-roues et le transport collectif, l'attractivité entre le transport collectif et l'automobile est dissymétrique : le transfert du transport collectif à l'automobile est facile, l'inverse beaucoup moins. Les atouts de la voiture et du système que l'on a organisé autour d'elle (disponibilité, liberté, confort, image sociale, etc.) rendent la comparaison très déséquilibrée en sa faveur¹ (CERTU, 2004).

De plus, tout report modal trop rapide poserait des problèmes de capacité sur de nombreux réseaux de transports en commun, en particulier en heures de pointe.

Nous abordons dans le chapitre suivant la question de la performance des transports collectifs.

¹ Pour nuancer notre propos, signalons que certains modes autres que l'automobile peuvent se développer rapidement, comme on le voit par exemple avec le Velib' à Paris.

CHAPITRE III PERFORMANCE DES TRANSPORTS COLLECTIFS

Introduction

L'amélioration de la performance des transports en commun constitue un élément décisif du rééquilibrage entre les modes de transport. La priorité à accorder pour des raisons environnementales aux modes de transport alternatifs ne doit pas se traduire in fine par des restrictions de la mobilité. L'utilisation de modes de transport alternatifs doit être un choix et non une contrainte.

La qualité de service peut être envisagée de différentes manières suivant le point de vue adopté : voyageur, opérateur¹, aménageur, politique, etc. Néanmoins, la performance doit être au service des voyageurs. L'organisation des transports doit être faite pour satisfaire le besoin de déplacement des citoyens, en situation normale ou perturbée.

Dans ce chapitre, nous dressons un cadre théorique et conceptuel de la qualité de service en combinant différentes approches. La première étape consiste à identifier ce que l'on entend par système de transports collectifs afin de définir notre objet d'investigation (section 1). Ceci nous permet également de donner quelques caractéristiques propres aux transports en commun, qui en font leur spécificité. Nous soulignons en particulier l'importance des interfaces du réseau.

Nous identifions ensuite les liens existants entre qualité de service et missions de service public (section 2). Enfin, nous présentons deux approches complémentaires de l'évaluation de la qualité de service des transports en commun (section 3).

Suite à ce travail, il nous est possible de définir trois types de performance (économique et commerciale, territoriale, adaptative). Nous choisissons alors de travailler sur la performance adaptative en étudiant la vulnérabilité des transports collectifs.

¹ Il peut également y avoir différentes façons d'évaluer la qualité de service chez un même opérateur. Voir à ce sujet (Lévy, 1999a) qui présente un tableau regroupant différents indicateurs de qualité de service au sein de la RATP.

Section 1 - Définitions, typologies et caractéristiques spécifiques aux transports collectifs

Dans le domaine du transport routier, le terme « transport en commun de personnes » est défini par le Code de la route comme le transport de plus de 8 personnes, conducteur non inclus. Il y a donc transport en commun de personnes lorsqu'un véhicule a une capacité supérieure ou égale à 9 places. Les véhicules répondant à ce critère sont les autocars et les autobus. Les transports collectifs sont également présents au niveau ferroviaire, aérien et maritime. Le transport à la demande reste un mode de gestion relativement peu développé, réservé aux bouts de ligne et aux zones rurales. Nous ne le prenons pas en compte ici.

Avant d'aborder la question de la performance des transports en commun, il est intéressant de présenter plusieurs classifications et de déterminer leurs caractéristiques propres.

A- Typologies relatives aux transports en commun

1 - Transports en commun guidés ou non guidés

Contrairement aux modes de transport individuels, tels que le vélo ou la voiture, les transports en commun peuvent être guidés. Les trains, les métros ou encore les tramways entrent dans cette catégorie. Ils ne sont donc pas dépendants des conditions de circulation routière, contrairement aux autobus, appartenant à la classe des systèmes de transport non guidés¹. Cette caractéristique confère néanmoins à ces derniers d'autres avantages comme par exemple une plus grande souplesse et un coût d'exploitation plus faible. Enfin, certains modes (ex : trolleybus) sont qualifiés d'« hybrides », traduisant leur possibilité de circuler à la fois en site propre et sur une chaussée traditionnelle.

2 - Transports collectifs urbains et non urbains

En France, la distinction légale entre transports collectifs urbains et non urbains est fondée sur l'acte de déclaration d'existence d'un Périmètre de Transports Urbains (PTU), créé par arrêté préfectoral, sur demande de l'autorité compétente. Selon cette définition, les dessertes des transports collectifs urbains sont mises en place à l'intérieur d'un PTU dont le périmètre correspond à une ou plusieurs communes, ou encore à celui d'un Etablissement Public de Coopérations Intercommunales (EPCI).

Les transports non urbains assurent, quant à eux des dessertes :

- réalisées en partie dans un PTU et en partie sur une ou plusieurs communes non membres d'un PTU ;
- reliant plusieurs communes n'appartenant pas à un PTU ou reliant entre eux deux PTU distincts, même contigus.

¹ Implicitement, nous associons ici les notions de site propre et de guidage des véhicules. Toutefois, certains bus peuvent circuler en site propre sans être guidés. De plus, il existe différentes catégories de sites propres, plus ou moins en interaction avec d'autres véhicules.

Cette distinction ne tient pas nécessairement compte de façon pertinente des limites réelles de l'urbanisation car l'instauration d'un PTU est un acte de nature politique et administrative. La différenciation peut également être faite en fonction des limites de l'urbanisation. Les transports urbains correspondent ainsi aux déplacements internes à une agglomération et les transports interurbains aux déplacements entre deux agglomérations ou entre une agglomération et la campagne environnante. Mais les limites d'une agglomération sont généralement floues.

Tout en gardant à l'esprit ces considérations, nous ne les abordons pas plus car elles dépassent largement le cadre de nos investigations.

3 - Transports publics et privés

Les services de transport en commun sont gérés selon diverses modalités par des acteurs privés et publics. Le terme « transports publics » est communément utilisé pour désigner les transports collectifs parce qu'ils correspondent en règle générale à un investissement d'acteurs publics, qu'ils assurent des missions de service public¹ pour le compte de la collectivité et que les véhicules peuvent transporter de nombreux individus.

Toutefois, certains services de transports en commun sont entièrement assurés par des opérateurs privés (Veolia, Kéolis², etc.)³, en contrat avec les Autorités Organisatrices compétentes. Ils mettent alors en pratique les objectifs de service public qui ont servi de cadre aux missions leur ayant été confiées. L'outil juridique utilisé est la délégation de service public⁴.

Nous utilisons ici de préférence les termes « transports collectifs » ou « transports en commun », qui prêtent moins à confusion que le terme « transports publics ».

4 - Typologie selon les segments de marché

Il est également possible de se baser sur les segments de marché des transports en commun. On distingue alors (Peyronnet, 2000) les services de :

- transport interrégional (routiers, ferroviaires, aérien, maritime) ;
- transport départemental et régional (par autocar, ferroviaire) ;
- transport urbain (bus, métro, tramway...) ;
- transport collectif privé (ex : transport de personnel) ;
- desserte scolaire et autres services spécifiques ;
- desserte d'aéroport.

Cette classification est utilisée pour les certifications dans les transports collectifs.

¹ Voir section suivante.

² Kéolis est une filiale de la SNCF, entreprise publique. Cet exemple illustre le caractère « flou » de la distinction entre public et privé.

³ On peut se référer à un ouvrage du CERTU (CERTU, 1999) qui apporte un éclairage sur la stratégie des grands groupes français de transport, les alliances, les concurrences... et leur positionnement sur la scène internationale. Il met notamment en évidence la forte réduction du nombre d'acteurs dans ce domaine au cours des dernières années, notamment dans le domaine des transports urbains (en 1998, trois grands groupes réalisaient près de 75 % du chiffre d'affaires).

⁴ D'autres services publics de réseaux peuvent être délégués (ex : eau, déchets).

Le terme « transports en commun » ou « transports collectifs » regroupe donc des modes de transports très différents, aux finalités diverses. On observe par ailleurs une certaine hybridation des modes terrestres : trams-trains, tramways sur pneus, bus guidés, taxis collectifs si bien que l'appartenance à telle ou telle catégorie est de plus en plus floue. Le développement de systèmes comme Vélib' à Paris correspondent à des utilisations collectives de modes de transport individuels.

B- Caractéristiques spécifiques aux transports en commun

Les transports collectifs possèdent des spécificités qui méritent notre attention.

1 - Présence d'opérateurs

Tout système de transports en commun possède au moins un opérateur (SNCF, RATP, Veolia...), responsable de son fonctionnement : « *la confusion entre réseau et système fait implicitement référence à la nécessité d'une constitution ad hoc de l'opérateur en tant que système de régulation interne au réseau* » (Stathopoulos, 1997).

L'opérateur possède des moyens humains, matériels et financiers pour assurer le bon fonctionnement du système. Plusieurs logiques orientent son action : il doit satisfaire un ensemble de besoins, tout en tenant compte des impératifs économiques et des contraintes techniques. Il est en règle générale lié par un contrat à une Autorité Organisatrice qui définit l'ensemble des critères relatifs à la qualité de service devant être assurée. Plusieurs opérateurs peuvent assurer des services sur un même territoire¹.

2 - Horaires et lignes : la non permanence de l'offre

Contrairement aux modes de transport individuels, les transports en commun ne proposent pas une offre permanente : leur fonctionnalité est temporelle. La répartition des circulations sur le réseau est plus ou moins régulière dans le temps mais il existe souvent des périodes de pointe et des périodes creuses présentant des intensités de circulation variables, même lorsque les horaires sont cadencés².

De plus, les circulations sont la plupart du temps structurées en lignes, même si celles-ci ont des configurations variables : ligne à une branche, à trois branches, un seul type de desserte (ex : métro) ou desserte variable (ex : RER en Île-de-France).

Ceci est souvent à l'origine de chaînes de déplacement (multi ou mono modales) pour les voyageurs car des correspondances sont nécessaires pour passer d'une ligne à l'autre (et parfois sur une même ligne lorsque les dessertes sont différentes).

¹ Au niveau de l'Île-de-France : SNCF, RATP et transporteurs privés regroupés dans l'association OPTILE (voir dans le chapitre I de la Partie III).

² On peut ainsi avoir des cadencements à l'heure en période creuse et des cadencements à la demi-heure en période de pointe.

3 - Importance des connexions nodales

Intimement liées aux pratiques multimodales, les connexions nodales relatives aux transports en commun doivent s'envisager tant au niveau spatial que temporel. L'interconnexion nodale rapproche des réseaux techniques « *par des lieux d'échanges, des lieux d'interface entre les réseaux et les territoires* » (Thévenin, 2002).

Ainsi, les correspondances sont spécifiques aux transports en commun et renvoient à une dimension organisationnelle de l'offre de transport, intégrant des données temporelles. Issues de la logique ferroviaire, elles renvoyaient originellement à une « *coordination des horaires entre deux trains de manière à optimiser le temps d'attente en gare tout en tenant compte du temps nécessaire au transbordement* » (Chapelon, 1997).

En les étendant à l'ensemble des systèmes de transport en commun, L. Chapelon les définit plus globalement comme « *tout changement de véhicule nécessaire à l'accomplissement de la suite du trajet en cours, et ce, si possible dans une logique de coordination des horaires lorsqu'elles font intervenir un seul opérateur ou, plus rarement, lorsqu'une concertation a pu être menée entre plusieurs opérateurs* »¹ (Chapelon, 1997).

De façon plus générale, les connexions peuvent être définies comme tout processus qui induit une modification des conditions de déplacement suite à un changement de réseau partiel et/ou de véhicule au cours d'un déplacement (Chapelon, 1997). Un changement de véhicule implique nécessairement une rupture dans le processus de transport alors que le seul changement de réseau partiel traduit une simple adaptation du mode de transport utilisé à de nouvelles conditions de déplacement. Lorsqu'une connexion s'opère au sein du même réseau de transport, il est possible de parler d'intra-connexion et lorsqu'elle implique deux réseaux distincts d'inter-connexion (Chapelon, 1997). La connexion est considérée comme directe lorsqu'il n'y a pas de changement de véhicule et indirecte dans le cas contraire.

¹ Il est nécessaire de replacer la citation de L. Chapelon dans son contexte temporel. En effet, depuis 1997, l'intermodalité a progressé et les correspondances entre transporteurs se sont développées. Il existe parfois des correspondances assurées, permettant à un voyageur de ne pas rater son bus même si son train est en retard. Néanmoins, les correspondances demeurent difficiles à organiser. Par exemple, les transporteurs routiers doivent être prévenus longtemps à l'avance des modifications d'horaires de la SNCF pour adapter leurs horaires et faciliter ainsi les correspondances.

	Changement de réseau	Changement de véhicule	Changement de réseau partiel
Intra-connexion indirecte	NON	OUI	OUI ou NON
Intra-connexion directe	NON	NON	OUI
Inter-connexion indirecte	OUI	OUI	OUI
Inter-connexion directe	OUI	NON	OUI

tableau 2 Typologie des connexions¹

Les connexions indirectes sont spécifiques aux transports en commun (nécessité de changer de véhicule). Elles sont amenées à jouer un rôle croissant avec le développement des pratiques multimodales, en raison du développement des modes de transport collectifs rapides comme le TGV. Leur optimisation est déterminante pour le développement des transports en commun et s'effectue notamment par l'amélioration de la qualité infrastructurelle des interfaces et la coordination entre les opérateurs concernés.

Afin de favoriser l'intermodalité, l'aménagement des pôles d'échanges est déterminant. Un pôle d'échanges constitue une interface entre plusieurs modes de transport et entre ceux-ci et leur environnement notamment grâce à des services divers. La fonction transport est bien évidemment l'élément primordial d'un pôle d'échanges. Le nombre de modes interconnectés, la densité des circulations au sein de cet espace détermine fortement les flux de voyageurs et donc les services présents ainsi que la dimension urbaine du lieu. Les services présents sont étroitement liés à la vocation première des pôles d'échanges, à savoir le transport de voyageurs. Toutefois, d'autres services plus « tournés vers la ville » peuvent également trouver place dans ces lieux (Mosnat et Sahabana, 2002).

Les interfaces jouent un rôle essentiel dans le bon fonctionnement des transports en commun grâce à l'articulation entre les lignes de transport (parfois exploitées par des transporteurs différents) et les relations avec leur environnement. Elles conditionnent fortement le niveau de qualité de service fournie par l'ensemble de la chaîne multimodale de transport.

¹ Source : (Chapelon, 1997).

Section 2 - Objectifs de qualité de service et missions de service public

A- Notion de service public

L'évaluation de la qualité des transports en commun est liée aux principes de service public. Il est donc utile de revenir sur ceux-ci. La notion¹ de service public est souvent l'objet de confusions entre les missions de service public, le monopole des entreprises publiques, le statut des personnels et finalement l'État (Bauby, 2002). Le statut d'entreprises publiques pour la RATP et la SNCF illustre bien l'ambivalence entre des activités de service public et de nécessaires logiques commerciales.

Compte tenu du foisonnement intellectuel et de la multiplicité des références, le but n'est pas ici de faire une synthèse de ce champ. Toutefois, quelques points de repères permettent de situer notre recherche par rapport aux principes de service public, qui constituent le socle sur lequel fonctionnent généralement les systèmes de transports en commun.

Selon P. Bauby (Bauby, 2002), le service public fait référence à trois registres indissociables :

- la garantie du **droit individuel** de chacun d'accéder à des biens ou services essentiels pour la satisfaction de ses besoins, la garantie d'exercice des droits fondamentaux de la personne, conditions du lien social (droits à l'éducation, à la santé, au logement, à l'eau et à l'assainissement, à l'énergie, aux communications, aux transports, etc.) ;
- l'expression de l'**Intérêt Général** de la collectivité pour assurer la cohésion sociale et territoriale (égalité d'accès, de fourniture, de service et de qualité, recherche du moindre coût, péréquation géographique des tarifs, adaptabilité) ;
- un moyen essentiel que se donne la puissance publique pour conduire des **politiques publiques** et concourir au développement économique et social (emploi, participation au développement local, etc.).

On considère communément que les services publics doivent répondre à trois principes majeurs (Ascher, 1999) :

- la **continuité du service** qui suppose l'obligation, la garantie et la permanence de la fourniture des prestations aux usagers ;
- l'**égalité** d'accès et l'égalité de traitement : les usagers doivent être traités de manière identique lorsqu'ils sont dans des situations semblables ;
- l'**universalité** : les mêmes services doivent être fournis en tous points du territoire ;

et à trois principes secondaires :

- la mutabilité ou l'**adaptabilité**, c'est-à-dire la capacité d'adaptation aux circonstances et à l'évolution des besoins ;
- la **sécurité** ;
- l'**exemplarité**.

¹ Nous employons volontairement le terme de « notion » dans la mesure où le terme service public n'est pas complètement formalisé et peut être défini de plusieurs manières.

Ces principes sont difficiles à mettre en œuvre dans le domaine des transports en commun. L'offre de transport est par nature discontinue (le même niveau de service ne peut être proposé à toutes les heures de la journée) et peut également être interrompue en situation très perturbée. L'égalité de traitement est difficile à atteindre (ex : lorsqu'il y a des problèmes de capacité, certains voyageurs peuvent monter dans les véhicules et pas d'autres) et l'hétérogénéité de l'espace rend impossible l'universalité du service.

La notion de service public intègre des éléments très variés et parfois antagonistes ce qui lui confère sa complexité :

- économique/social/politique ;
- marchand/non marchand ;
- local/régional ;
- individu/collectivité.

L'Autorité Organisatrice (AO) définit les objectifs de qualité de service à atteindre (dans le cadre réglementaire d'une délégation de service public) sur la base de ces principes. L'autorité publique définit ainsi les missions, l'organisation et le financement, un processus de contrôle, des procédures d'évaluation, ainsi que des critères d'évolution dans le temps et dans l'espace, afin d'adapter régulièrement le contenu du service public à l'évolution des besoins des usagers, des citoyens et de la société (Bauby, 2002).

L'évaluation de la qualité de service des transports en commun dépend étroitement de la manière dont est envisagé le service public : la place des voyageurs, son inscription territoriale.

B- Le voyageur : utilisateur du service

La notion de qualité de service dépend de la manière dont sont considérés les utilisateurs : la *« connaissance de l'utilisateur d'un produit ou d'un service est source d'enjeux pour les opérateurs, que ceux-ci appartiennent au secteur privé ou au secteur public. Les enjeux recouvrent plusieurs objectifs : l'adaptation d'un contenu à une demande ou à des attentes qu'il convient d'identifier, l'intégration des goûts du public dans un programme, l'amélioration de la relation de service, la recherche d'une proximité avec le client »* (Pailliat, 2002).

Différents termes sont utilisés pour qualifier les utilisateurs d'un service, tel que les transports en commun : usager, client, citoyen ou encore consommateur, impliquant des visions différenciées (et pour certaines antagonistes d'un point de vue idéologique) de l'individu pour lequel le service est conçu. Ceci a des répercussions sur la façon d'évaluer la qualité de service. Comme le note R. Petrella, *« si l'accès à un bien-service marchand contribue à rendre heureux ou satisfaire un consommateur, cela n'est pas nécessairement le cas en ce qui concerne le citoyen. Le citoyen est lié aux biens et aux services publics. Il englobe aussi le consommateur mais le consommateur ne peut pas et, a fortiori ne saurait englober, le citoyen »* (Petrella, 1999).

On oppose généralement le terme d'usager à celui de client, qui insiste plus sur la possibilité de choix de l'utilisateur, induisant donc des stratégies de type commercial. Le terme d'usager est ainsi plus associé aux services publics et le terme client aux entreprises. Mais il est de plus en plus commun pour les opérateurs de transport de parler de client. En effet, les opérateurs de transports collectifs se situent dans un environnement concurrentiel (notamment par rapport au véhicule individuel). Ils doivent « séduire » leurs clients (réels ou potentiels), sans toutefois négliger leurs missions de service public.

La prise en compte de la diversité des utilisateurs potentiels d'un service et de leur liberté de choix plaide en faveur d'une double approche : usager/citoyen pour les impératifs de service public et client/consommateur pour la recherche d'une certaine rentabilité du service et de la conquête de nouvelles parts de marché. Rien n'empêche a priori d'avoir diverses représentations des utilisateurs réels ou potentiels du service proposé. C'est ainsi que les figures d'usagers, de clients et de citoyens cohabitent aujourd'hui et constituent les trois faces du public des entreprises de transport (Lévy, 1999a).

La présentation de la notion de service public et de la représentation de l'utilisateur de ce service nous invite à poursuivre en identifiant précisément les éléments constitutifs d'une qualité de service des transports en commun (sur la base des principes de service public). En effet, « là est bien la difficulté, celle d'inscrire les missions de service public énoncées de façon générale dans le fonctionnement réel, dans l'offre proposée » (Lévy, 1999a).

Section 3 - Deux approches de la qualité de service

De manière générale, les services de la vie quotidienne « se définissent par leur immatérialité, l'absence de transfert de propriété, et leur opposition aux biens » (Durrande-Moreau, 1994), ce qui entraîne des évaluations de la qualité différentes par rapport à celles de produits matériels ¹. Il existe plusieurs manières d'aborder la qualité de service des transports en commun. Nous en présentons deux ici.

A- Démarche de mise en qualité, adaptée aux transports en commun

La qualité perçue par le client n'est pas une qualité objective, se mesurant par référence au produit ou service lui-même mais représente l'opinion des utilisateurs. La qualité perçue est ² :

- subjective, elle est vue par le client avec son filtre de la perception, son expérience, sa motivation ;
- abstraite, ce n'est pas une simple collection d'attributs physiques mesurables ;
- globale, elle ressemble à une attitude envers le produit ;

¹ En réalité, la frontière n'est pas toujours aisée à tracer, car les services incorporent des biens, que l'on appelle alors éléments tangibles, et les biens incorporent des services (garanties, facilités de paiement...), que l'on appelle alors services annexes aux biens (Durrande-Moreau, 1994).

² ZEITHALM V.-A. 1988. Consumer Perceptions of Price, Quality, and Value : a Means-End Model and Synthesis of Evidence. *Journal of Marketing*, July 1988, n°52. Cité dans (Durrande-Moreau, 1994).

- dépendante du contexte et de « l'ensemble évoqué » de la personne, c'est-à-dire des pratiques commerciales courantes et de l'univers de choix dont le client a conscience.

Les démarches d'amélioration de la qualité proposée aux clients s'appuient sur le concept de « cycle de la qualité » développé par W.E Deming¹, spécialiste des questions liées à la qualité d'un service ou d'un produit.

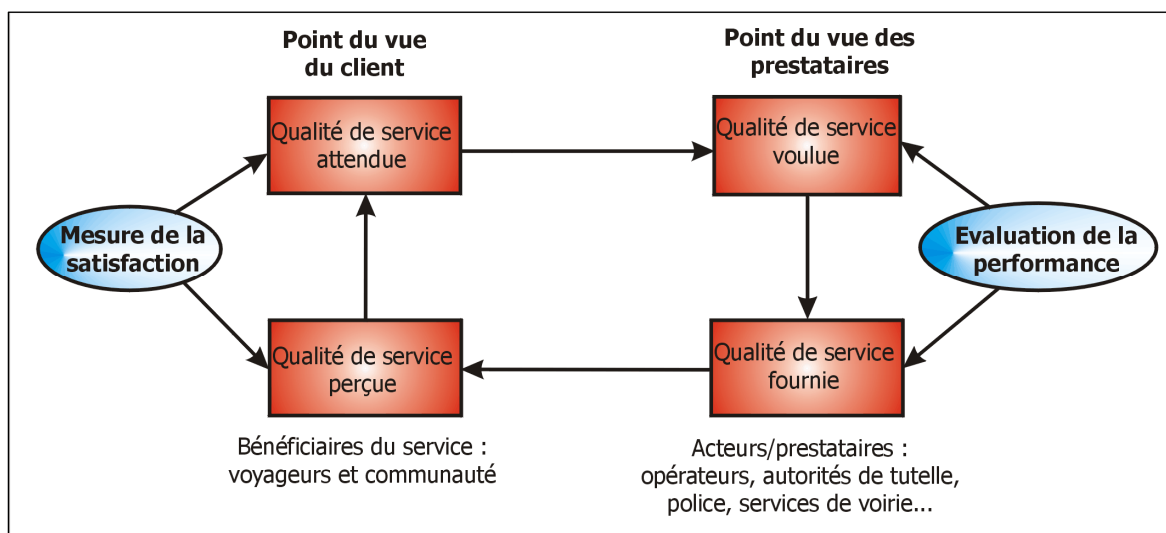


figure 7 Le cycle de qualité, adapté aux transports en commun²

L'objectif est de trouver le point d'équilibre entre ce qu'il est possible de produire et ce que le client souhaite trouver. Les attentes de celui-ci augmentent au fur et à mesure des évolutions et le cycle tourne avec comme objectif une amélioration continue du service.

Il est difficile de mesurer la qualité de service perçue. Les transporteurs ont des méthodes afin de la mesurer au mieux (ex : Indices de Satisfaction Clientèle une fois par an à la SNCF). Les exigences augmentant, le transporteur doit améliorer le service afin de maintenir un niveau de satisfaction au moins constant. Pour évaluer la performance, les Enquêtes Client Mystère (ECM) sont communément utilisées.

Les transporteurs s'engagent de plus en plus dans des démarches de certification de service afin de structurer la démarche de mise en qualité et faire reconnaître la qualité de la prestation fournie. Le but est de fixer des objectifs à atteindre ce qui contribue à une plus forte implication des équipes, dont le travail de qualité est reconnu, valorisé par un label. Ces démarches portent sur des lignes (RER, TER, métros...), des interfaces du réseau (ex : programme « Gares en mouvement ») ou sur l'ensemble d'un réseau.

La certification s'appuie sur une norme définissant les objectifs et les mesures (dans le domaine des transports collectifs, la norme NF EN-13816³ avec différentes gammes selon les modes de transport). La certification se fait sur la base d'un engagement de services,

¹ Le très connu cycle de Deming est un modèle d'amélioration continue de la qualité. Pour une présentation, voir par exemple (Gogue, 2000).

² Source : (Peyronnet, 2000).

³ La marque NF-Services est la propriété de AFAQ-AFNOR.

correspondant à un consensus établi après un Comité tripartite réunissant l’Autorité Organisatrice, le transporteur et une association de consommateurs.

INDICATEURS	CONTENU
Offre de service	Description du service offert en termes de zone géographique desservie, d’horaires, de fréquence et de mode de transport.
Accessibilité	Accessibilité au système de transport en commun y compris l’interface avec d’autres modes de transport.
Information des voyageurs	Mise à disposition systématique de tous les renseignements concernant le système de transport en commun nécessaires aux voyageurs pour programmer et effectuer leurs déplacements.
Temps/durée	Aspects relatifs aux temps nécessaires pour programmer et effectuer les déplacements.
Attention portée au client	Eléments de service introduits pour assurer la meilleure adéquation possible entre le service de référence et les attentes de chaque client.
Confort	Eléments de service introduits dans le but de rendre les déplacements en transports en commun relaxants et agréables.
Sécurité	Sentiment de sécurité ressenti individuellement par chaque client, procuré par les moyens effectivement mis en œuvre et par la communication faite.
Impact environnemental	Effet sur l’environnement de la fourniture d’un service de transports en commun.

tableau 3 Norme NF EN-13816 : critères de qualité¹

A chacun des critères est associée la description d’un service de référence, un niveau d’exigence et la description d’une ou plusieurs situations inacceptables.

La fiabilité et la capacité du système à s’adapter à des perturbations ont une influence transversale sur ces indicateurs. L’écart entre une qualité optimale et une qualité en situation dégradée crée un effet de contraste très pénalisant. Les recherches en marketing ont par exemple montré, sur le plan général de la qualité de service, que l’hétérogénéité est préjudiciable aux services et nuit à la crédibilité des entreprises (Durrande-Moreau, 1994). Les critères de certification intègrent donc une évaluation de

¹ Source : (Peyronnet, 2000).

la capacité de l'opérateur à respecter ses engagements et à revenir à une situation normale lors de dysfonctionnements.

B- Approche territoriale de la qualité de service

Les questions relatives aux services publics de transport sont nécessairement liées à des problématiques plus globales d'Aménagement-Urbanisme. Ainsi, la LOTI reconnaît pour tout citoyen l'existence d'un « Droit au Transport »¹ que la collectivité est chargée de mettre en œuvre dans des conditions de coût acceptables. « *Le service public des transports doit concourir à l'unité, à la solidarité nationale, à la défense du pays, au développement économique et social, à l'aménagement équilibré du territoire* ». Le respect de ces obligations doit conduire à la satisfaction de l'Intérêt Général.

L'offre de transport est notamment définie en fonction d'objectifs relatifs :

- au choix des lieux à desservir, des relations à proposer ;
- au niveau de desserte (fréquence, rapidité...) ;
- à la forme souhaitée du réseau (ex : maillage versus arborescence).

Des approches territoriales de la performance des transports ont été développées depuis une vingtaine d'années, mobilisant notamment le champ de la théorie des graphes². Suite aux travaux de G. Dupuy, l'ouvrage de N. Stathopoulos³ marque une étape importante de cette approche. N. Stathopoulos définit la performance territoriale d'un réseau comme « *une fonction décroissante de son « éloignement » au réseau virtuel possible entre les lieux à desservir. Ce réseau maximaliste [réseau virtuel] est la meilleure solution que le concepteur puisse imaginer, mais il est incompatible avec les contraintes de l'opérateur, que le concepteur doit prendre en compte* » (Stathopoulos, 1997).

Une approche territoriale de la qualité de service a été développée dans le cadre d'un programme de recherches du PREDIT (Chapelon (dir.), 2005)⁴. Parmi les grandes composantes de la notion de service de transport public (sécurité, confort, ponctualité, accessibilité), les auteurs se sont intéressés plus particulièrement à l'accessibilité territoriale. « *L'accessibilité est le principal levier d'action à disposition des autorités organisatrices pour planifier les services de transport. En modifiant les conditions d'accès, on modifie l'attractivité des territoires. Le fait de disposer d'une bonne accessibilité est un atout majeur pour nombre de communes qui offrent à leurs résidents et futurs résidents une alternative efficace à la voiture* » (Chapelon (dir.), 2005).

¹ Voir le chapitre II de la présente partie.

² Ce champ théorique est largement abordé dans la chapitre II de la Partie II.

³ STATHOPOULOS Nikolas. 1997. *La performance territoriale des réseaux de transport*. Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, 127 p.

⁴ L'auteur de cette thèse a été amené à travailler sur ce contrat de recherche pour l'adaptation d'un programme permettant de calculer les itinéraires en transports en commun sur une journée. Ce programme a été le point de départ du modèle PERTURB (voir dans la Partie II). L'origine d'une telle approche, territoriale et basée sur les horaires, est plus ancienne. On la retrouve déjà dans une recherche coordonnée par Ph. Mathis en 1997 : MATHIS Philippe. (dir.). 1997. *Grille de niveau de service : exploitation des bases horaires ferroviaires et aériennes*, réalisée dans le cadre de l'évaluation des Schémas Directeurs des infrastructures de transports, Rapport final au Ministère de l'Équipement. Tours : Laboratoire du CESA). Il s'agit d'améliorations de travaux dont l'origine remonte aux années 1970 (MATHIS Philippe. 1978. *Economie urbaine et théorie des systèmes*. Thèse de Doctorat : Sciences Economiques : Université de Tours, 548 p.)

Dans cette conception, l'accessibilité ne renvoie pas uniquement à la seule possibilité d'atteindre ou non un lieu donné mais elle traduit la pénibilité du déplacement, la difficulté de la mise en relation appréhendée le plus souvent par une fonction décroissante des temps de parcours entre les lieux. Les indicateurs qui en découlent reflètent la performance territoriale du système de transport, sa capacité à assurer les relations entre les nœuds du réseau.

Dans les transports collectifs les niveaux d'accessibilité sont principalement fonction de cinq paramètres indissociables :

- la densité de la desserte territoriale (localisation des arrêts, nombre d'arrêts par unité de surface, distance entre deux arrêts),
- la fréquence de circulation en heures creuses et en heures de pointe,
- le positionnement horaire des services (cadencement, amplitude, plages horaires),
- le nombre et la durée des éventuelles correspondances,
- la performance des services de nœud à nœud qui dépend des vitesses autorisées techniquement sur le réseau, du nombre d'arrêts intermédiaires impliquant ou non une ou plusieurs correspondances.

Les horaires ont constitué pour ce travail l'information centrale pour l'évaluation des niveaux d'accessibilité. C'est en effet l'architecture de l'offre horaire qui détermine la performance du système tant du point de vue de l'adéquation à la demande de déplacement que de la desserte territoriale. Des indicateurs issus de la *time-geography*¹ (nombre d'allers-retours possibles dans la journée, possibilité de rester X heures dans une ville en partant d'une autre..) ont permis de dépasser les indicateurs traditionnels, en intégrant directement le service rendu aux voyageurs. Différentes applications ont été proposées : modifications à la marge de l'offre de transport ou conception ex-nihilo d'une grille horaire.

C- Eléments retenus dans le cadre de cette recherche

Après avoir présenté les caractéristiques propres aux transports en commun, la notion de service public et deux approches de la qualité de service des transports en commun, il est possible de mieux circonscrire le cadre de notre recherche. Nous distinguons trois types de performance :

- La performance territoriale (qui tient compte du fait que les voyageurs² (et donc les lieux du réseau) doivent avoir accès de manière relativement équitable à une bonne qualité de service),
- La performance économique et commerciale (qui représente la capacité à produire un service de qualité (cf indicateurs de certification) dans de bonnes conditions économiques),
- La performance adaptative (le système doit être capable de produire un service de qualité en diverses circonstances). Pour les opérateurs, elle permet de limiter les différences entre la qualité de service voulue et la qualité de service fournie (cf *figure 7*).

¹ Pour une présentation de la *time-geography*, voir par exemple (Chardonnel, 2001).

² Nous faisons volontairement le choix ici d'inclure les voyageurs dans la performance territoriale. Cela est cohérent avec la recherche PREDIT mentionnée plus haut (utilisation de la *time-geography*).

Ces types de performance ne sont pas forcément naturellement compatibles : « *les objectifs de l'Aménagement du territoire, et à travers eux, la recherche d'une certaine équité territoriale, ne sont pas naturellement compatibles avec la recherche d'un optimum dans le secteur des transports* »¹.

Nous étudions ici l'adaptabilité des systèmes de transports en commun. Nous avons vu qu'il s'agit d'un des principes de service public. Une bonne adaptabilité du service garantit un niveau de service globalement stable (mais avec des améliorations progressives) et adapté aux évolutions des besoins.

L'adaptation d'un système de transports en commun à des événements et à différentes échelles de temps a une influence forte sur les divers éléments constitutifs de la qualité de service. Par exemple, l'offre théorique doit être suffisamment robuste pour ne pas être désorganisée dès le moindre incident. Ceci aurait pour conséquence une qualité de service réelle nettement plus faible que celle offerte théoriquement.

Nous étudions plus particulièrement au cours de cette recherche la vulnérabilité des systèmes de transports en commun (liée à la plus ou moins bonne capacité d'adaptation à court terme lors d'événements perturbateurs). L'offre proposée au voyageur et la vente d'un titre de transport correspondent à une forme d'engagement de l'opérateur, à un contrat sur la prestation qui sera offerte, notamment sur le temps de parcours. La non réalisation du contrat entraîne de l'attente supplémentaire, de l'inconfort dans les véhicules plus chargés, de l'incertitude, un sentiment d'insécurité, etc². C'est pourquoi l'adaptabilité est essentielle.

Nous choisissons de travailler sur la performance des transports en commun dans une perspective de report modal. La place importante à accorder aux transports en commun nécessite une faible vulnérabilité en raison du rôle de médiateur territorial de tout système de transport. De plus, dans un contexte de concurrence avec l'automobile, la performance adaptative est nécessaire car la voiture est perçue comme un mode de transport plus souple et s'adaptant facilement. Par conséquent, **la performance adaptative est un critère de qualité pour le bon fonctionnement et le développement des transports collectifs. Quelles stratégies sont possibles pour l'opérateur ? Quelle est la place du voyageur (utilisateur du service) et sa place dans la gestion des situations perturbées ?**

¹ Commissariat général du Plan. 1992. Transports 2010 : rapport du groupe présidé par le commissaire au plan. Paris : La documentation française, 516 p. Référence citée dans (L'Hostis, 1997).

² Une attente en pleine nuit dans un lieu peu fréquenté peut être source d'inquiétude.

Conclusion

En caractérisant le système de transports en commun, nous avons mis en évidence quelques éléments essentiels et spécifiques aux transports en commun : opérateur(s), lignes et horaires, interfaces du réseau. Les pôles d'échanges, articulations entre les transports et la ville et entre plusieurs lignes de transport, sont des lieux particulièrement stratégiques pour les politiques en faveur du développement de l'intermodalité et des transports collectifs.

La question de la performance, de la qualité de service des transports en commun a ensuite été abordée en basant tout d'abord notre réflexion sur la notion de service public. Nous avons identifié les dimensions d'une activité de transports collectifs, devant à la fois combiner une logique commerciale (par son inscription dans le marché des déplacements) et une logique de service public (et donc le respect des principes afférents).

Divers indicateurs peuvent être utilisés pour mesurer le niveau de service offert en fonction de l'objectif souhaité. Une approche territoriale de la qualité de service a également été présentée en raison de l'importance des transports en matière d'Aménagement-Urbanisme.

Dans le cadre de notre recherche, il est nécessaire de circonscrire le champ d'analyse de la qualité de service des transports en commun. Nous faisons le choix de baser notre travail sur les questions liées à la performance adaptative des transports collectifs, en étudiant en particulier leur vulnérabilité.

Le prochain chapitre aborde la question de la vulnérabilité des transports collectifs.

CHAPITRE IV VULNERABILITE DES

TRANSPORTS COLLECTIFS

Introduction

La vulnérabilité des transports en commun nuit à leur performance de façon plus ou moins importante en fonction de leur adaptabilité. En effet, la qualité de service peut être fortement dégradée lors de perturbations et le système de transports en commun doit pouvoir s'adapter.

Les enjeux se situent au niveau du système de transport mais également au niveau du système urbain, de la vie économique et sociale qui en dépend. La fermeture d'un axe de transport ou la suspension d'un service de transport sur une ligne sont pénalisantes pour un territoire si elles déconnectent des lieux essentiels à son fonctionnement et à son développement.

Dans ce chapitre, nous définissons les principales notions (risque, aléa, vulnérabilité, fiabilité) en faisant le lien entre les notions de fiabilité et de vulnérabilité (section 1).

Nous identifions les enjeux propres aux transports collectifs (section 2). Nous nous focalisons sur la vulnérabilité du système de transport et non sur les perturbations du système urbain liées à des perturbations de l'offre de transport¹. Notre approche se situe au niveau de la performance propre du système de transport, comme élément constitutif du système urbain.

Nous recensons ensuite les facteurs de vulnérabilité (section 3) et les moyens de protection (section 4), avant de présenter les difficultés de mesure des dommages (section 5).

Ceci nous permet notamment de mettre en évidence l'importance de l'information, que nous approfondissons par la suite (chapitre V).

¹ Cette problématique est largement abordée dans la thèse de F. Demoraes (Demoraes, 2004).

Section 1 - Vocabulaire associé à la notion de risque

Le vocabulaire associé au risque est souvent issu du langage courant et peut prêter à confusion. Il ne fait pas l'objet d'un consensus et doit généralement être redéfini dans le contexte propre à chaque étude ou recherche.

Le risque peut se définir comme « *la possibilité de conjonction (d'occurrence) d'un phénomène réputé dangereux avec l'existence d'enjeux pouvant subir des dommages* » (Xouillot, 1995). Le phénomène mentionné dans la définition correspond à l'aléa et les enjeux (économiques, humains, politiques...) subissent des dommages en raison de leur vulnérabilité à cet aléa. L'enjeu se situe au cœur de la définition du risque.

Le risque se définit ainsi dans la plupart des cas comme l'espérance des dommages déplorés suite à un évènement selon la formule :

$$\text{Risque} = \text{aléa} \times \text{vulnérabilité}$$

La composante aléatoire du risque est généralement inversement proportionnelle aux dommages provoqués. Les courbes isorisques croisent l'aléa et la vulnérabilité et chacune d'entre elles représente des niveaux de risque identiques.

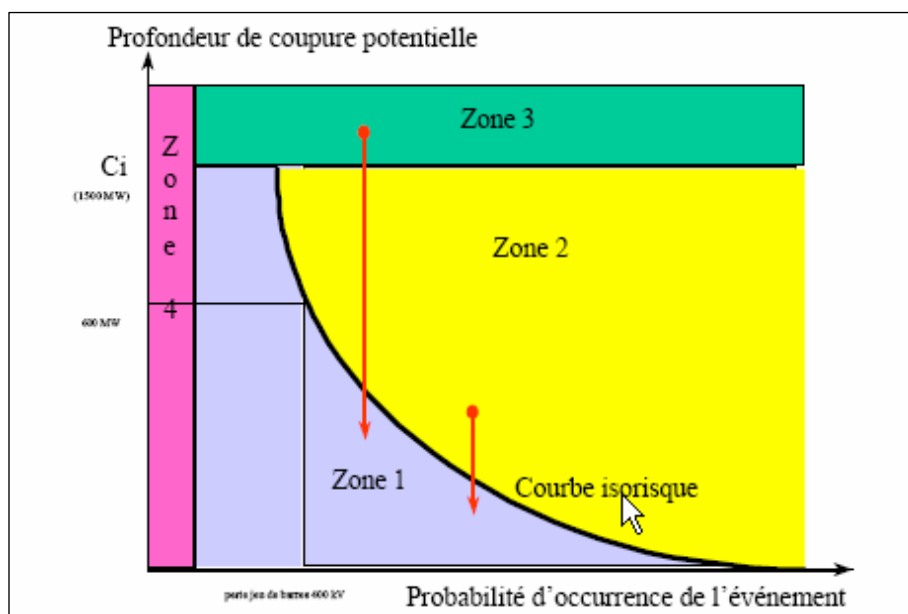


figure 8 Niveaux de risques dans le cadre de coupures d'électricité¹

Mais la délimitation de ces frontières fait intervenir une part de subjectivité. En effet, le risque est inégalement perçu selon les époques, le lieu, la culture...

¹ Source : www.rte-france.com.

A la différence d'une catastrophe, le risque constitue donc une potentialité : la possibilité de survenue d'un évènement à l'origine de conséquences (dommages).

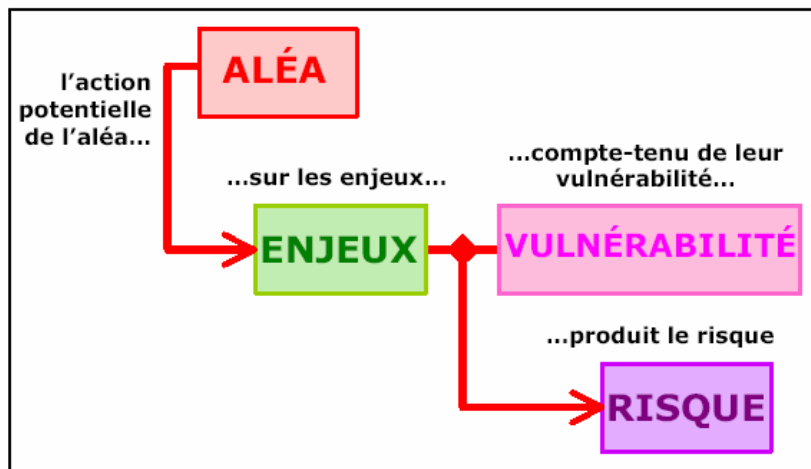


figure 9 Situation des notions d'aléas, d'enjeux et de vulnérabilité dans le mécanisme produisant le risque¹

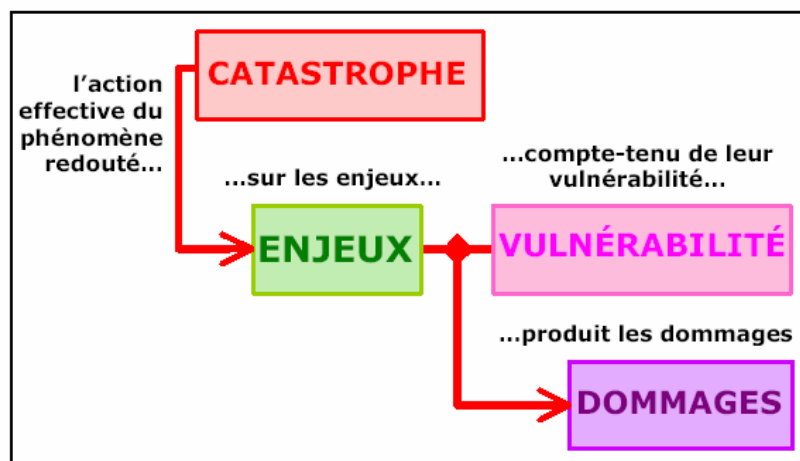


figure 10 Situation des notions de catastrophe, d'enjeux et de vulnérabilité dans le mécanisme produisant les dommages²

Une faible vulnérabilité est nécessaire lorsqu'une fiabilité totale ne peut être atteinte. Le système doit pouvoir fonctionner de manière convenable même en situation perturbée et revenir le plus rapidement possible à une situation normale.

¹ Source : (Gleyze, 2005).

² Source : (Gleyze, 2005).

A- Fiabilité et vulnérabilité

L'aptitude à fonctionner sans défaillance pendant un temps déterminé correspond à la fiabilité (Gogue, 2000). La fiabilité peut être définie comme la « *probabilité pour qu'une pièce primaire, un dispositif ou un équipement complet soit utilisé sans défaillance pendant une période de temps déterminée, dans des conditions opérationnelles spécifiées* »¹.

Ainsi, un système peut être considéré comme fiable par rapport à un évènement si ce dernier n'entraîne aucune perturbation, aucun dommage. Dans le cas contraire, il est plus ou moins vulnérable selon le niveau de perturbation. La définition d'une situation normale ou perturbée dépend de l'échelle adoptée (ex : nombre de minutes de retard, nombre de véhicules et d'individus concernés) et se définit en référence à une situation théorique, parfaite.

Chaque élément du système (dans le cas des transports, un tronçon par exemple) a une fiabilité : $p = 1 - q$ (q étant la probabilité de non-fonctionnement ou de fonctionnement en mode dégradé). La fiabilité d'un système formé d'éléments couplés en série est le produit des fiabilités de chacun de ses éléments si les fiabilités de ces derniers sont indépendantes. Par conséquent, la fiabilité d'un système décroît rapidement quand le nombre des éléments couplés en série augmente même si ceux-ci ont une fiabilité moyenne élevée (Lange, 1976).

Nombre d'éléments du système	Fiabilité moyenne de chaque élément	Fiabilité du système
10	0,99	0,9
100	0,99	0,4
1000	0,99	0,00004
500	0,999	0,6
1000	0,999	0,4

tableau 4 Fiabilité d'un système avec des éléments couplés en série²

Afin d'augmenter la fiabilité, il faut introduire dans le système le nombre approprié d'éléments de réserve couplés en parallèle (montage en parallèle alternatif). La défaillance du système correspond alors à la probabilité qu'il y ait une défaillance de tous les éléments.

¹ Encyclopédie Universelle Larousse, 2004.

² Source : (Lange, 1976).

		Nombre de chaînons couplés en série			
		N=1	N=3	N=20	N=1000
Nombre d'éléments couplés en parallèle dans le chaînon	M=1	0,90	0,73	0,12	0,000026
	M=2	0,99	0,97	0,81	0,35
	M=3	0,999	0,997	0,98	0,90

tableau 5 Fiabilité d'un système avec des éléments couplés en parallèle et en série¹

Dans le cas d'un réseau de transport, cela signifierait que de très fortes redondances (ex : au niveau des lignes) permettraient de maintenir la fiabilité. Néanmoins, les redondances ne sont pas totales pour des raisons de coût et des problèmes de capacité peuvent exister en cas de report d'une ligne sur l'autre. La redondance n'est que partielle. Par conséquent, pour les réseaux de transport, lorsque le nombre d'éléments couplés en parallèle augmente, ce serait ainsi plus la vulnérabilité que la fiabilité qui diminuerait. Nous reviendrons sur la question du maillage du réseau.

Il faut distinguer la vulnérabilité d'un élément du système et la vulnérabilité du système liée à la défaillance de cet élément. La diminution de la vulnérabilité des éléments constitutifs du système et la recherche de leur redondance (complète) correspondent à une augmentation de la fiabilité. Une bonne adaptation à une défaillance d'un élément entraînant un fonctionnement en mode dégradé du système correspond à une faible vulnérabilité du système à cet évènement.

Le système peut être à la fois fiable (perturbations très rares) et très vulnérable à certaines perturbations. **Les stratégies de réduction de la fiabilité ou de la vulnérabilité sont différentes mais ne s'excluent pas.**

B- Définition de l'aléa

Selon A. Dauphiné, l'aléa correspond à « une probabilité qui prend en compte deux caractéristiques : l'occurrence et l'intensité du phénomène » (Dauphiné, 2001). Sa mesure est très délicate et fait souvent intervenir de nombreuses approximations. En effet, même si une longue série statistique à propos de cet aléa est disponible et exploitable, la distribution statistique n'est pas toujours stable : elle peut évoluer ou dépendre de nombreux facteurs, eux-mêmes de nature probabiliste. En l'absence d'une série statistique, le calcul doit être réalisé de façon indirecte à partir des causes pouvant conduire à l'aléa.

La mesure de l'aléa peut donc être le résultat d'un calcul complexe, établi sur la base d'une connaissance toujours partielle du phénomène. Nous pouvons également évoquer la notion d'aléa majeur, lequel correspond à un « évènement imprévisible quant à sa survenance et

¹ Source : (Lange, 1976).

irrésistible quant à ses effets » (Blancher, 1998). Sa prise en compte dépasse néanmoins le cadre de notre recherche.

C- Définitions de la vulnérabilité

Il existe plusieurs définitions de la vulnérabilité. Nous les présentons ici afin de pouvoir choisir celle que nous retenons dans le cadre de cette recherche.

Idéalement, la mesure de la vulnérabilité associée à un phénomène est la résultante d'une démarche déterministe (contrairement à la fiabilité) car elle ne prend pas en compte la probabilité de survenance de l'évènement : *« l'aspect aléatoire est théoriquement absent dans l'analyse de la vulnérabilité : de fait, le phénomène considéré, même s'il est physiquement bien caractérisé, est un scénario dont la réalisation n'entre pas en ligne de jeu »* (Gleyze, 2001). Les conséquences liées à la vulnérabilité sont d'ordres divers : physiques, économiques, politiques, psychologiques, etc.

Deux modes de raisonnement (inductif et déductif) se retrouvent dans les modélisations d'accidents de systèmes arborescents et donc dans l'évaluation de leur vulnérabilité. Il est ainsi courant, dans le cadre de systèmes simples à décomposer, d'utiliser la méthode des arbres qui consiste à étudier la succession de séquences d'actions sous forme d'arborescence déductive (arbres des défaillances ou des défauts) ou inductive (arbres d'évènements).

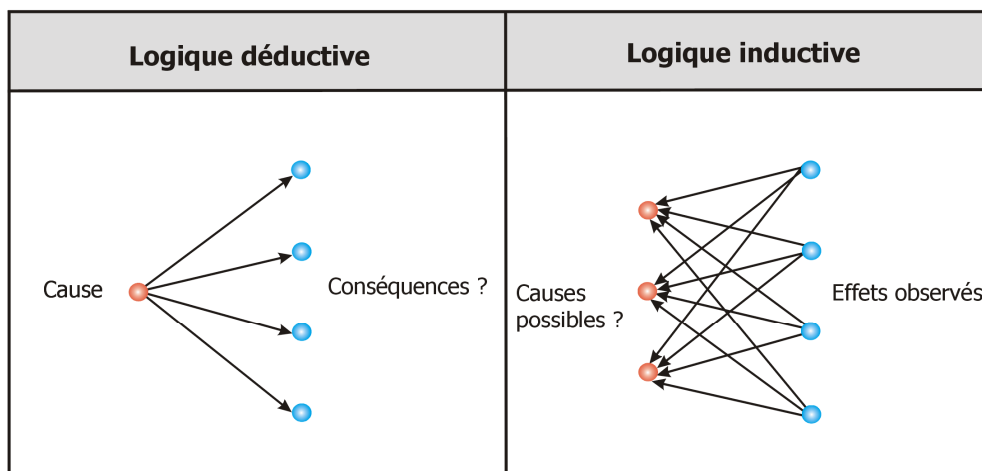


figure 11 Deux principes de traitement des incertitudes dans une étude de risques¹

De plus, l'évaluation de la vulnérabilité peut être effectuée de deux manières, issues de démarches différentes : *« il n'est pas rare de constater que le terme de « vulnérabilité » correspond tantôt à une mesure de l'endommagement ou du préjudice potentiel des entités menacées par une catastrophe, tantôt à un facteur aggravant de l'aléa comme une mesure de la propension à être endommagé »* (Gleyze, 2001). La première correspond à une démarche analytique alors que la seconde est plus de nature systémique.

¹ Source : (Gleyze, 2001).

1 - Démarche analytique

Selon cette démarche, les enjeux, correspondant aux domaines affectés par le risque, sont décomposés. La vulnérabilité exprime alors « *le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène naturel sur les enjeux* » (Dauphiné, 2001). Cette démarche offre l'avantage d'être opératoire mais demeure empirique et largement subordonnée aux pondérations effectuées. Certaines techniques multicritères combinent des informations variées, mesurées à différentes échelles, le plus souvent pour produire un indice d'évaluation unique. Chaque critère est standardisé, puis pondéré en fonction de son importance supposée. La mesure de la vulnérabilité peut également être unifiée par une évaluation monétaire.

2 - Démarche synthétique

La démarche synthétique, de nature systémique¹, est de nature fondamentalement différente : « *à l'approche classique de la vulnérabilité qui mesure un endommagement potentiel des biens et des personnes et ses répercussions sur l'environnement économique semble s'opposer celle qui considère la vulnérabilité des sociétés à travers leur capacité de réponse à des crises potentielles* » (Dauphiné, 2001).

La fragilité du système, ainsi que sa capacité à surmonter la crise provoquée par un aléa, est considérée dans son ensemble. Plus un système est apte à se rétablir après un aléa, moins il est vulnérable. Généralement, les travaux mettent l'accent sur « les points de faiblesses » mais les études intègrent aussi de plus en plus l'autre dimension du risque, c'est-à-dire « les points forts » qui permettent de contrecarrer les premiers (Demoraes, 2004).

L'évaluation de la vulnérabilité a alors pour objectif de mesurer la propension de ce système à subir des dommages en cas de survenance d'un évènement ou à mesurer sa faculté à résister aux perturbations.

Il est plus aisé selon cette démarche de mettre en place une stratégie de réduction de la vulnérabilité et donc des dommages potentiels.

3 - Définition retenue pour cette recherche

Comme nous venons tout juste de le souligner, il existe deux façons d'appréhender la notion de vulnérabilité. Nous nous basons sur la définition suivante : « *la vulnérabilité peut être définie comme une variable qui exprime les impacts potentiels d'un phénomène par rapport :*

- *aux paramètres de l'aléa ;*
- *aux enjeux, c'est-à-dire la quantité et la nature des biens, activités...exposés à cet aléa, ainsi que leur fragilité par rapport à celui-ci ;*
- *aux ressources mobilisables pour limiter les impacts* » (Hubert et Ledoux, 1999).

En considérant les « ressources mobilisables pour limiter les impacts » dans un sens large, elles peuvent être assimilées à la capacité du système à réagir suite à une perturbation et à

¹ Voir dans le chapitre II de la Partie II la section consacrée à la théorie des systèmes.

prévenir celle-ci. Cette définition a l'avantage de prendre en considération des éléments issus des deux démarches. En effet, la mesure exprime aussi bien le niveau de conséquences prévisibles d'un phénomène sur les enjeux (démarche analytique) que la capacité de réponse face à des crises potentielles (démarche synthétique).

Selon cette définition, l'évaluation de la vulnérabilité repose sur la recherche d'indicateurs d'impacts, qualitatifs et/ou quantitatifs associés aux enjeux. Aussi, **l'évaluation de la vulnérabilité passe par plusieurs étapes : la caractérisation des enjeux¹, la détermination des aléas potentiels² et plus globalement des facteurs de perturbations, l'identification des ressources mobilisables pour limiter les dommages.** Ces trois étapes doivent en dernier lieu aboutir à une mesure des dommages potentiels selon les paramètres des aléas.

Section 2 - Identification des enjeux des transports collectifs

A- Caractérisation des enjeux

L'explicitation des enjeux a pour objectif d'appréhender de manière globale les éléments exposés à un événement ou concernés par celui-ci et donc de mettre en évidence une vulnérabilité potentielle. Sans enjeu, il n'y a pas de risque.

Il faut ensuite quantifier les enjeux, c'est-à-dire leur attribuer une valeur physique, économique ou financière. En effet, « *l'enjeu correspond à une caractérisation physique, économique ou financière des éléments (biens, activités, personnes) exposés à un événement donné ou concernés par celui-ci* » (Hubert et Ledoux, 1999). Les éléments considérés sont plus ou moins nombreux selon le degré de précision souhaité et les enjeux indirects pris en compte.

Nous focalisons ici notre attention sur les enjeux propres au système de transport et non sur ceux du système urbain³ dans lequel il s'inscrit. Pour l'offre de transports en commun, les enjeux sont tout d'abord les suivants :

- les **infrastructures** (nodales et linéaires) constitutives du réseau ;
- les **véhicules**.

Ces enjeux correspondent à des enjeux matériels.

La **mise en relation des nœuds** du réseau, plus ou moins dégradée en situation perturbée, est également à prendre en compte en raison du rôle de médiateur territorial d'un système de transport.

¹ Nous faisons le choix d'identifier les enjeux en premier lieu dans la mesure où les facteurs de perturbations et les moyens pour les limiter sont liés à ceux-ci.

² Même si nous ne les intégrons pas dans la mesure même de la vulnérabilité (qui n'est pas probabiliste) contrairement à F. Demoraes qui considère l'exposition aux aléas comme une forme de vulnérabilité à part entière (Demoraes, 2004). Nous les présentons car les caractéristiques des perturbations sont différentes en fonction des aléas.

³ Sur ces aspects, voir la thèse de F. Demoraes (Demoraes, 2004).

La **qualité de service fournie aux voyageurs** est un enjeu majeur car c'est la principale finalité du système. Au sein d'un système de transport, offre et demande se structurent mutuellement, à différentes échelles spatio-temporelles¹.

Ces deux derniers enjeux sont de nature socio-économique et intéressent plus particulièrement l'Aménagement des Transports, puisqu'ils considèrent les misés en relations de lieux sur le territoire et les individus utilisant les transports collectifs.

Ces enjeux ne sont pas indépendants. Par exemple, une infrastructure constitue un enjeu fort si de nombreux voyageurs l'utilisent et/ou si sa non disponibilité entraîne des détours conséquents. L'importance de l'enjeu peut varier dans le temps².

B- Vulnérabilité amont, interne et aval

Il est possible de distinguer plusieurs types de vulnérabilité (amont, interne et aval) en fonction des enjeux étudiés.

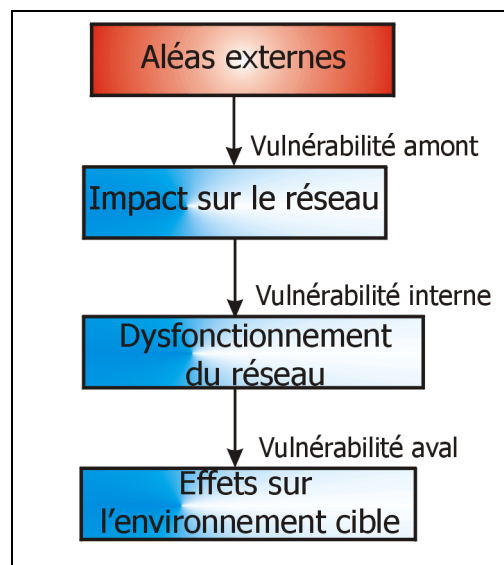


figure 12 Maillons élémentaires de la chaîne des risques³

Un aléa entraîne des perturbations au sein d'un système en raison de sa vulnérabilité amont. Celles-ci se traduisent par des dysfonctionnements plus ou moins graves en fonction de sa vulnérabilité interne. Ces dysfonctionnements entraînent des répercussions sur l'environnement de celui-ci plus ou moins importantes (vulnérabilité aval).

¹ Exemple sur le court terme : lors d'une grève, la demande s'« adapte » à l'offre (utilisation d'autres moyens de déplacement, prise de congés par exemple).

² Exemple d'une ligne dans les Alpes pouvant être plus importante l'hiver que l'été. Ou au cours d'une journée, variation des conséquences d'une perturbation selon l'heure (période de pointe ou creuse). Voir les applications dans la troisième partie.

³ Source : PROST Thierry. 1994. *La ville, les risques et le génie urbain*. Mémoire de DEA en Méthodes de conception en bâtiment, aménagement et techniques urbaines : INSA de Lyon, 1994.

Nous ne travaillons pas sur la vulnérabilité aval. Nous n'intégrons pas les enjeux urbains dans le cadre de l'analyse, en nous concentrant sur le système de transport et ses enjeux propres.

Notre approche est en effet essentiellement basée sur la vulnérabilité interne, c'est-à-dire sur les dysfonctionnements du système lorsque certains éléments de celui-ci connaissent des défaillances. **Les enjeux correspondent ainsi à des critères propres au système de transport : voyageurs et mises en relation des nœuds.**

Nous abordons également mais dans une moindre mesure la question de la vulnérabilité amont, en identifiant les facteurs de perturbation. En effet, en fonction des aléas, les perturbations affectant le système sont différentes. Nous prenons en compte les aléas internes, pouvant générer des perturbations. Ceux-ci pourraient être considérés uniquement comme des facteurs de manque de fiabilité. Néanmoins, dans notre approche, la vulnérabilité commence dès lors que l'on est en situation perturbée (par manque de fiabilité) en raison d'un évènement, qu'il soit d'origine interne ou externe. Il faut donc identifier les évènements perturbants pour le système de transport.

C- Vulnérabilité matérielle, structurelle et fonctionnelle

Au cours de sa thèse, J-F. Gleyze travaille sur la vulnérabilité structurelle dans le domaine des transports (Gleyze, 2005). Il la resitue dans le contexte de la vulnérabilité matérielle et fonctionnelle.

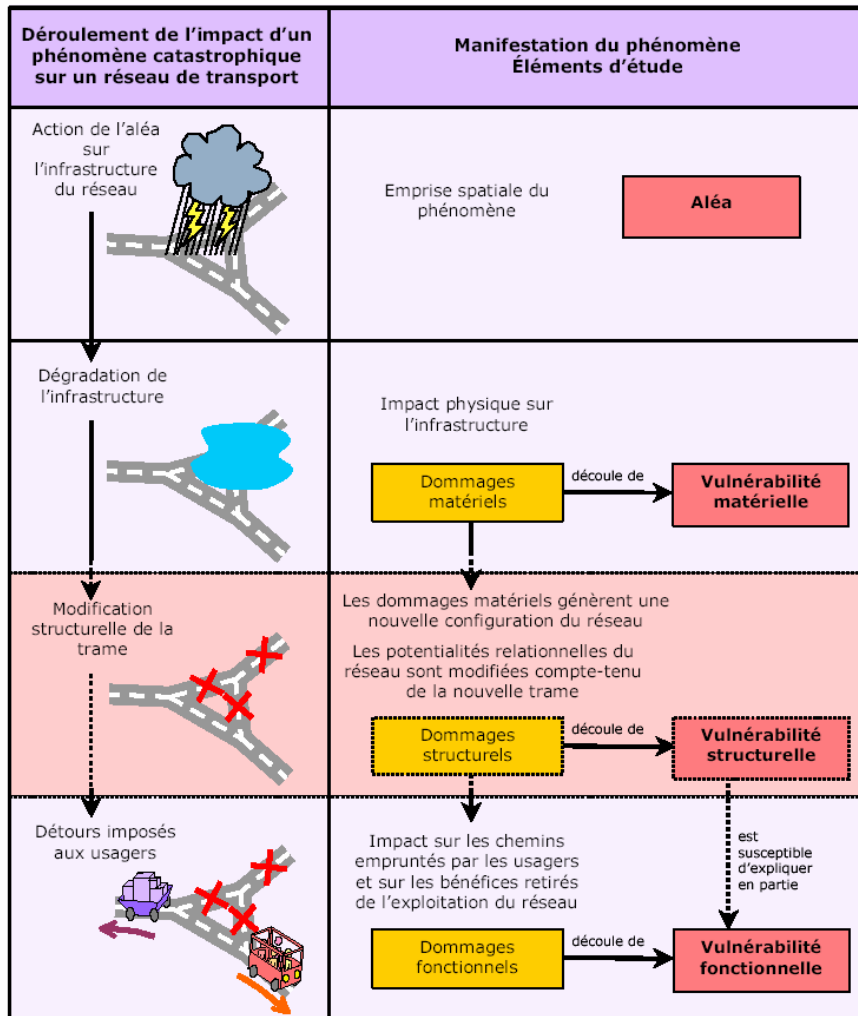


figure 13 Impact d'un phénomène catastrophique sur un réseau de transport : détail des dommages et des vulnérabilités impliquées¹

- La **vulnérabilité matérielle** décrit « le degré d'endommagement physique des infrastructures du réseau consécutivement à l'ensemble des phénomènes catastrophiques susceptibles d'intervenir ».
- La **vulnérabilité fonctionnelle** mesure « la dégradation des services assurés par le réseau » en fonction des endommagements. La vulnérabilité fonctionnelle intègre la demande, l'utilisation du réseau par les voyageurs.
- L'**approche structurelle** se situe entre l'approche matérielle et l'approche fonctionnelle. Elle a pour but d'étudier les dommages potentiels structurels et la vulnérabilité associée, c'est-à-dire les modifications des potentialités relationnelles du réseau compte tenu de sa nouvelle configuration.

C'est en fonction des enjeux retenus qu'une approche se situe dans le champ de l'analyse matérielle, structurelle ou fonctionnelle.

¹ Source : (Gleyze, 2005).

Notre approche se situe :

- **dans le cadre de la vulnérabilité structurelle, puisque la mise en relation des nœuds du réseau est considérée comme un enjeu,**
- **dans le cadre de la vulnérabilité fonctionnelle, en travaillant sur les enjeux relatifs aux voyageurs (perte de temps notamment) et en incluant certaines ressources contribuant à limiter les perturbations¹.**

Ainsi, la vulnérabilité porte ici sur les conditions de la mobilité (baisse des potentialités de déplacement : approche structurelle) et ses répercussions sur les voyageurs (approche fonctionnelle). L'unité de mesure est le temps.

Certaines études associent spécifiquement le terme de « dégâts » aux dommages matériels, le terme de « perturbations » (ou de « désordres ») aux dommages enregistrés par les activités et le terme de « préjudices » aux dommages subis par les personnes (Gleyze, 2005). Nous travaillons ainsi sur les perturbations de l'offre et sur les préjudices subis par les voyageurs.

Néanmoins, notre approche est différente de celle proposée par J-F. Gleyze. Au niveau structurel, nous intégrons les éléments relatifs aux lignes, aux horaires et aux véhicules, alors que J-F. Gleyze ne prend en compte que la trame du réseau. Ces éléments font partie intégrante de la structure de l'offre. Notre travail, axé de manière spécifique sur les transports en commun, se doit de les prendre en compte.

Par ailleurs, pour l'étude de la vulnérabilité fonctionnelle, nous intégrons certaines ressources limitant les conséquences de perturbations (régulation). De plus, nous incluons des événements n'entraînant pas nécessairement un endommagement des infrastructures du réseau. En effet, certains événements (ex : blocage des voies, grèves) ont des conséquences importantes sur la circulation, sans dégradation de l'infrastructure.

Section 3 - Facteurs de perturbations dans les transports collectifs

Nous présentons au cours de cette section les facteurs internes et externes à l'origine de perturbations ou facilitant leur propagation. Il convient de ne pas se limiter aux phénomènes extérieurs car des aléas d'origine interne provoquent également des dysfonctionnements.

A- Approche typologique des aléas et interactions

Les aléas et leurs conséquences sont communément abordés selon une typologie distinguant les aléas naturels, technologiques et humains.

Nous nous basons sur cette typologie, sans prétendre à une exhaustivité dans notre exposé. Nous présentons quelques exemples pour chaque catégorie, ainsi qu'un tableau avec des événements recensés par le PC INFO Trafic Transilien en 2006.

¹ Voir plus bas : étude du rôle de l'information des voyageurs dans la régulation des situations perturbées.

1 - Aléas naturels

Les aléas dits naturels sont ceux qui ne sont pas directement occasionnés par l'Homme. La France ne fait pas partie des pays les plus menacés par ces aléas. Ceux-ci sont à l'origine de perturbations plus ou moins graves pour la société en général et pour les transports en particulier. Une classification au sein même des aléas naturels permet de distinguer les aléas climatiques et les aléas géologiques.

Les aléas climatiques correspondent à la pluie (et aux inondations pouvant en résulter), à la neige, au gel, au vent, aux tempêtes, à la foudre, au soleil. Parmi ceux-ci, les inondations représentent le risque faisant le plus de victimes et de dégâts à travers le monde. Les inondations regroupent différents phénomènes : débordement des cours d'eau, ruissellement de surface, inondations maritimes des plaines côtières, etc. Outre le dommage direct dû à l'interruption du service, elles entraînent également une corrosion des équipements. La canicule de l'été 2003 a montré que la chaleur pouvait également être considéré comme un aléa car les températures au sol, proches de 60°C, ont entraîné une dilatation des rails, le déclenchement d'alarmes stoppant les trains, ou encore des problèmes de climatisation dans les véhicules.

Les aléas géologiques englobent quant à eux les séismes et autres mouvements du sol, les glissements de terrain (parfois liés à des aléas climatiques), les éruptions volcaniques (absentes en France métropolitaine), ainsi que divers phénomènes liés au relief (ex : chute de pierre).

La probabilité d'occurrence de tels aléas, très difficile à évaluer, est fonction du type de milieu.

Chute d'un arbre sur la voie
Arbre déraciné et présentant un danger pour la caténaire
Choc anormal sur un train TER (branche d'arbre)
Patinage des trains sur des feuilles mortes
Heurt de sanglier par un train
Heurt d'un chevreuil => interruption de trafic
Inondation dans le tunnel de Châtelet

tableau 6 Exemples d'aléas d'origine naturelle recensés par le PC INFO Trafic Transilien en 2006

2 - Aléas techniques

Les incidents techniques sont de nature variée : rupture d'un appareil, incendie, explosion, pannes diverses, etc. Ils sont d'origine interne (ex : panne de matériel) ou externe (ex : coupure d'électricité). Des techniques de recherche de fiabilité ont pour objectif de limiter l'occurrence de tels aléas avec des mesures comme la redondance des éléments constitutifs.

Ces aléas sont de moins en moins acceptés. On remarque en effet depuis quelques dizaines d'années un accroissement de la valeur attribuée à la sécurité dans le fonctionnement des systèmes de transport en raison des progrès technologiques. Les causes des incidents et

accidents sont par conséquent mal comprises et provoquent la colère et l'indignation de la population et des usagers.

Le rôle des pouvoirs publics dans ce domaine est très important. En France, les exigences sont très fortes en matière de sécurité et l'Etat en est le garant. Ainsi, selon l'article 9 de la LOTI¹, « l'Etat définit les règles de sécurité, d'organisation des secours et de contrôle technique applicables aux transports, veille à leur mise en application et en contrôle l'exécution »².

Les accidents et catastrophes d'origine technique ont toujours pour fondement l'action humaine (Dauphiné, 2001). Les conditions et chemins aboutissant à ces accidents sont extrêmement variés car l'influence de l'Homme s'inscrit à tous les niveaux : conception, réalisation, fonctionnement, maintenance ou encore régulation. Mais l'Homme peut également limiter les aléas ou la propagation des perturbations.

TRAINS
Problème de traction
Début d'incendie sur des climatiseurs
Incident sur un joint de dilatation
Déraillement d'un train de ballast
Fuite de gaz sur un train
Plaque sur les voies perdue par un train fret
Rupture d'attelage d'un train fret
Dégagement de fumée + changement de rame
Pannes de locomotive
Disjonction à répétition
Rupture d'éclisse ³
Problème de fermeture de portes
VOIES
Incendie dans un entrepôt près des voies
Coupure d'électricité
Dérangement d'aiguilles
Distension de la caténaire
Chute d'une goulotte de câbles
Affaissement caténaire
Poutre en fer tombée d'un abri de quai
Incident affectant la voie (zone au rouge)
Dérangement de la signalisation
Début d'incendie dans une armoire électrique
Bris de barrières => interruption de trafic
Dérangement de l'intervalle de voie unique
Dérangement d'un passage à niveau
Rail cassé => retards/perturbations
Conduite de gaz endommagée sur un chantier
Coupure d'urgence suite à un incendie près des voies dans une casse automobiles
Chute d'un bloc de béton d'un pont

tableau 7 Exemples d'aléas d'origine technique recensés par le PC INFO Trafic Transilien en 2006

¹ Loi d'Orientation sur les Transports Intérieurs.

² www.legifrance.fr.

³ Éclisse : « plaque d'acier allongée servant à réunir l'extrémité de deux rails, pour assurer la continuité et la rigidité de la surface de roulement » (Encyclopédie universelle Larousse, 2004).

3 - Aléas humains, sociaux et politiques

Les aléas humains, sociaux et politiques affectant le fonctionnement des transports en commun traduisent l'interdépendance entre les systèmes. Les guerres, le terrorisme, les grèves, les actes de malveillance mais aussi les grandes manifestations entrent dans cette catégorie. Une fiabilité sur le long terme semble illusoire dans la mesure où des tensions d'origines diverses se répercutent dans le fonctionnement des systèmes de transport. On peut citer à titre d'exemple les manifestations anti-CPE qui ont fortement perturbé les transports en 2006.

Le **terrorisme** est une forme de violence affectant la société depuis de longs siècles. Il peut être défini comme un « *ensemble d'actes de violence commis par une organisation pour créer un climat d'insécurité ou renverser le gouvernement établi* » (Xouillot, 1995). Drainant des flux de voyageurs, les transports en commun constituent naturellement des lieux potentiels d'un point de vue stratégique pour ces actions terroristes : les attentats des métros de Paris et de Tokyo en 1995, de Londres en 2005 le montrent bien. Une thèse est actuellement en cours sur ce sujet¹.

Les transports en commun s'insèrent dans un système plus vaste. Ils constituent un élément de ce système pouvant être frappé pour désorganiser, affecter ce système englobant².

Les **grèves**, aléas internes, sont très mal ressenties par les voyageurs et nuisent à l'image des transporteurs. Dans une agglomération, l'immobilisation en raison d'un mouvement social est très mal perçue, notamment lorsque des choix politiques volontaristes ont consisté à investir fortement dans les transports collectifs. De plus, certains voyageurs (qualifiés de captifs) sont fortement dépendants des transports en commun. Certaines grèves sont parfois la conséquence d'évènements d'origine externe (ex : actes d'agression contre le personnel).

Cette remarque nous conduit à évoquer le problème de l'**insécurité** dans les transports en commun qui résulte plus généralement des problèmes contemporains de notre société : « *les problèmes de sécurité du métro sont davantage importés de la ville que créés en son sein* » (Stathopoulos, 1997). Parce qu'ils sont parfois les derniers services publics présents, parce qu'ils symbolisent en quelque sorte l'Etat et l'autorité, les transports collectifs sont une cible privilégiée de cette violence. Les incivilités entrent par ailleurs pour beaucoup dans le sentiment d'insécurité : murs souillés par les tags, incendies dans les bus, vandalisme, vitres brisées, etc.

Les grandes affluences sont parfois source de perturbations ponctuelles. La demande à laquelle doit répondre de façon performante le système de transport fluctue dans le temps. Des heures de pointe alternent avec des périodes creuses et les périodes de début ou de fin de vacances constituent des périodes de grandes affluences. Par ailleurs, des manifestations ponctuelles (concerts, évènements sportifs, etc.) entraînent également des demandes de

¹ LERICOLAIS Marine. *Risque terroriste et économie des infrastructures critiques de transport*. Thèse de Doctorat en cours : Sciences Economiques, Université de Lyon 2.

² Voir la notion de vulnérabilité aval décrite plus haut.

transport plus importantes. Outre l'influence que de tels évènements peuvent avoir sur la sécurité des voyageurs, les transporteurs sont parfois débordés par de telles situations.

Enfin, d'autres types d'aléas altérant le fonctionnement des transports collectifs entrent dans cette catégorie : suicide dans une station de métro, collision à un passage à niveau, embouteillages entraînant des retards dans les bus, défaillance d'un conducteur, présence d'objets sur la voie, etc.

AGRESSIONS
Vols à l'arraché
Mécanicien menacé
Agression de voyageur
MANIFESTATIONS – ACTES DE MALVEILLANCE
Vol de câbles
Signaux d'alarmes tirés par des voyageurs
Objets sur les voies
Personnes dans les voies
Heurt d'un bidon par un train
Bagarre entre voyageurs
Poteau placé sur les voies
Manifestation d'une association
Jet de pierre
Plaqué de béton sur la voie
Colis abandonné
Incendie de guérites de signalisation dues à des actes de malveillance
ORGANISATION / ERREUR HUMAINE
Défaut de commande des itinéraires
Absence de relève d'un mécanicien
Dégarage tardif d'un train
Conflit de circulation avec un TGV
Réddition tardive de travaux programmés
Grève
Attente d'un contrôleur sur un train
AUTRES
Malaise d'un voyageur
Accident de personne sur un train / suicide
Forte affluence de voyageurs
Voyageurs dans les voies tentant de récupérer un chien
Découverte d'un corps aux abords des voies
Voiture sur la voie
Coupure d'urgence suite à la présence de personnes sur un grillage
Accident routier à un passage à niveau
Accident routier ayant entraîné la chute d'un poteau électrique sur la caténaire

tableau 8 Exemples d'aléas d'origine humaine recensés par le PC INFO Trafic Transilien en 2006

4 - Interactions entre ces aléas

Les aléas ne sont pas indépendants les uns des autres. Ainsi, Th. Xouillot (Xouillot, 1995) met en évidence les liens existant entre les aléas, de la même famille ou non. Il signale par exemple que dans la famille des aléas naturels, les aléas climatiques semblent jouer un rôle

d'initiateurs d'aléas puisque capables d'engendrer à eux seuls des avalanches, des inondations et des mouvements de terrains.

Les aléas naturels sont générateurs d'autres aléas alors que les aléas techniques constituent un champ d'action privilégié des deux autres. En effet, des inondations entraînent une corrosion du matériel, des actes terroristes provoquent des défaillances techniques.

Les arbres d'évènements, déjà évoqués précédemment schématisent les liens potentiels entre les aléas. Heureusement, ces liens ne sont pas systématiques car le système serait alors dans l'impossibilité de lutter contre ceux-ci et par conséquent de conserver son intégrité.

Enfin, signalons que les travaux sont des aléas car ils dégradent provisoirement la qualité du système de transport mais ils ont souvent pour but de diminuer l'occurrence d'autres aléas, ceux-là non prévus et donc plus difficilement gérables.

B- Propagation des perturbations

Comme nous venons de le voir, des causes internes ou externes sont à l'origine de dysfonctionnements. Les perturbations se propagent ensuite en raison de la dimension réticulaire du système : « *le réseau sur lequel se déplace l'incident apparaît pour ce qu'il est toujours, dans ses formes sociales ou techniques, une machine épidémique qui progresse de proche en proche, un dispositif qui se joue des frontières et des limites* » (Joseph, 1999).

L'« effet papillon » est une expression qui résume une métaphore concernant le phénomène de sensibilité aux conditions initiales en théorie du chaos, en raison de la propagation des perturbations (dans notre cas : il s'agit d'une perturbation de l'offre de transport). Le concept lui-même préexistait depuis très longtemps à travers des proverbes comme « *petites causes, grands effets* », ou par des maximes comme celle de B. Franklin :

« Faute d'un clou, le fer fut perdu.
Faute d'un fer, le cheval fut perdu.
Faute d'un cheval, le cavalier fut perdu.
Faute d'un cavalier, la bataille fut perdue.
Faute d'une bataille, le royaume fut perdu.

Et tout cela faute d'un clou de fer à cheval. »¹

Lors d'un incident sur le réseau, le voyageur subit par exemple un accroissement de la durée de déplacement et un inconfort accru du fait de la distribution déséquilibrée des charges entre les véhicules. De plus, l'instabilité de fonctionnement entraîne une perte de capacité, pouvant être à l'origine d'une augmentation des perturbations. Les actions de régulation doivent limiter ces effets en chaîne. Ceux-ci varient suivant la charge du réseau : si le réseau est proche de sa capacité maximale, les perturbations se propagent potentiellement de façon plus importante. Il y a une régulation par l'offre (gestion des circulations) mais également par la demande (par l'information des voyageurs). Nous reviendrons dans cette recherche sur la prise en compte des voyageurs dans la régulation des situations perturbées.

¹ Extrait de l'« Almanach du Pauvre Richard », 1732.

La topologie du réseau joue un rôle déterminant dans la propagation des perturbations. Les réseaux de transport en commun sont souvent caractérisés, notamment en France, par une centralisation qui n'est pas sans rappeler l'architecture « Hub and spokes » du secteur aérien¹. Par rapport au réseau maillé, la structure en étoile représente pour les transporteurs la possibilité de réduire le nombre de liaisons et de véhicules en circulation, et en même temps d'accroître le remplissage des véhicules du fait de la massification des flux. Les flux sont donc rabattus vers les « hubs », puis réorientés à travers les « spokes », au détriment des liaisons directes moins performantes. Cette logique de massification des flux se retrouve à toutes les échelles spatiales (Baptiste, 1999). Ainsi en France, à l'échelle intra-urbaine, le réseau converge vers le centre-ville et même vers l'hypercentre en empruntant des radiales. Au niveau régional, il converge vers la ville centre, ses zones d'emplois et de services et à l'échelle nationale, les réseaux se dirigent vers la capitale. Nous approfondissons la question du maillage des réseaux au cours de cette recherche².

De plus, le système est en relation avec d'autres systèmes. S'il peut subir une dépendance fonctionnelle par rapport à ceux-ci, il peut à l'inverse entraîner des perturbations en leur sein, par exemple au niveau du « métabolisme urbain ». Comme tout réseau, il constitue un élément puissant de diffusion des sinistres à l'ensemble de l'espace urbain en diffusant et en amplifiant l'impact de l'aléa (Blancher, 1998)³.

Ainsi, dans un contexte général de gestion des risques qui dépasse le cadre de notre simple système, J. Theys et J-L. Fabiani soulignent que l'analyse de la vulnérabilité revient à mesurer la capacité de systèmes interdépendants à fonctionner sans accroc en absorbant les perturbations extérieures, même les plus imprévisibles (Hubert et Ledoux, 1999). Nous n'approfondissons pas ce champ d'investigation au cours de cette recherche, en privilégiant l'étude de la vulnérabilité interne au système.

Les facteurs de perturbation des transports en commun sont divers et nécessitent des moyens de protection variés afin de limiter la vulnérabilité.

Section 4 - Moyens de protection

Un système de transports en commun est la cible de nombreux aléas, entraînant des perturbations pouvant ensuite se propager en raison de sa nature réticulaire. La maîtrise de l'occurrence et de la diffusion des perturbations constitue un enjeu essentiel pour les opérateurs et nécessite la mise en place de moyens de protection efficaces. Le système n'est pas passif face à ces risques et des mesures existent pour limiter sa vulnérabilité. Celles-ci interviennent à deux niveaux : résistance par rapport aux aléas et limitation de la propagation des perturbations.

Plusieurs types d'action participent ainsi à la réduction de la vulnérabilité : prévention, prévision et gestion des évènements.

¹ Quelques contre-exemples existent comme le métro parisien, dont le maillage est relativement fin et homogène.

² Voir notamment les applications dans la troisième partie.

³ Voir la notion de vulnérabilité aval présentée plus haut.

Il convient de bien distinguer les dispositifs permettant d'agir sur des parties spécifiques en réduisant leur vulnérabilité à l'aléa de ceux qui ont une influence plus globale sur le système et facilitent une régulation de celui-ci.

Les premiers correspondent en grande partie à la recherche d'une fiabilité du système (celui-ci doit pouvoir fonctionner sans problème) par les dispositifs les plus simples (ex : redondance des éléments) : « *le plus aisé et le plus simple utilise l'élimination des perturbations par des absorbeurs de chocs, des tampons, des boucliers, des isolateurs...* » (Le Moigne, 1977). Ces dispositifs sont ici considérés en tant qu'actions spécifiques sur le système. Les « frontières » entre fiabilité, vulnérabilité et aléa sont floues.

Les seconds concernent davantage la diminution de la vulnérabilité et s'effectuent à un niveau plus global, grâce notamment à une organisation, un mode de fonctionnement facilitant les adaptations. Le maintien d'une qualité de service satisfaisante nécessite de limiter l'incidence des perturbations de manière à offrir une prestation satisfaisante.

A- Actions spécifiques : améliorer la résistance face aux aléas

De nombreuses mesures spécifiques aident le système à se protéger des aléas évoqués. Celles-ci ne sont pas présentées ici dans un souci d'exhaustivité mais afin de donner quelques exemples caractéristiques. Les outils de résistance face aux aléas naturels ne sont pas présentés car ils correspondent la plupart du temps à des mesures très particulières et rarement spécifiques aux transports en commun.

1 - Réduction de l'occurrence des aléas techniques et de leurs conséquences

L'approche « Sûreté de Fonctionnement » repose sur quatre principes majeurs : la fiabilité, la sécurité, la maintenabilité et la disponibilité du service pour les voyageurs (Planchette, 2000).

Ces quatre principes sont étroitement liés. Lorsqu'un équipement tombe en panne (par manque de fiabilité), il doit être rapidement remis en état de marche. La maintenabilité est « *la probabilité qu'un appareil soit remis en fonctionnement au bout d'un temps donné après une défaillance, lorsque les opérations de maintenance ont été faites dans des conditions définies* » (Gogue, 2000). La notion de disponibilité est relative à la fois à la fiabilité et à la maintenabilité. Elle peut être définie comme « *la probabilité qu'un appareil réparable soit en état de fonctionner pendant une certaine portion du temps total de service* » (Gogue, 2000).

La fiabilité est augmentée considérablement par la redondance des équipements mais celle-ci est limitée par des considérations de coût et d'encombrement.

Malgré tous les efforts entrepris, le risque zéro n'existe pas et des événements engageant la sécurité peuvent se produire. Dans ce cadre, « *la sécurité passive consiste à prendre en compte les événements accidentels dans le dimensionnement de la structure de caisse des véhicules et à prévoir des dispositifs afin de réduire les conséquences des collisions* » (Lecussan, 2000). Ces actions minimisent la gravité des accidents n'ayant pu être évités grâce à des dispositifs ou des mesures de « sécurité active ».

2 - Lutte contre l'insécurité et les actes de malveillance

Des mesures spécifiques peuvent être mises en place pour lutter contre l'insécurité et les actes de malveillance : accroissement du personnel de contrôle et d'accueil, équipements des stations en systèmes automatiques de surveillance, installation de dispositifs anti-agression, sensibilisation et formation du personnel à la sécurité et à la gestion d'une situation de crise, agents de médiation sociale, adaptation de la longueur des véhicules suivant l'affluence, etc.

L'implication de l'ensemble des acteurs concernés est déterminante car les problèmes de sécurité dans les transports relèvent de problèmes sociaux plus complexes ne se limitant pas à ce secteur particulier.

L'objectif pour le transporteur est de parvenir à une maîtrise des lieux : les règles s'appliquant sur tous les lieux de transport doivent être fixées clairement. En effet, « *si on laisse des interstices, les facteurs de trouble vont s'y engouffrer et l'insécurité retentira sur toute la chaîne de transport* » (Descours, 1997). A ce niveau, la présence humaine joue un rôle déterminant pour sécuriser les déplacements et lutter contre la fraude.

3 - Diminution de la fréquence des grèves et de leurs conséquences

Les grèves constituent également des aléas dont la fréquence et l'ampleur peuvent être diminuées. D'après M. Cornil, Président de l'Union des Transports Publics (UTP), il faut assurer une continuité du service public et concilier droit de grève et droit au transport : « *pour concilier droit de grève et droit de transport, nous devons ouvrir un nouvel espace de dialogue social et favoriser une large concertation entre clients, salariés, syndicats et employeurs* » (La Gazette des communes, 2002).

La « Loi sur le dialogue social et la continuité du service public dans les transports terrestres réguliers de voyageurs », dite « Loi sur le service minimum », votée le 2 août 2007 par le Parlement et entrée en vigueur le 1^{er} janvier 2008, prévoit que certaines catégories de salariés informent 48h à l'avance leur employeur de leur intention de faire grève (article 5). L'objectif est une meilleure prévisibilité du trafic pouvant être assuré, afin notamment de mieux organiser la production et l'information des voyageurs. Un des objectifs est également de diminuer l'occurrence des grèves, en améliorant le dialogue social.

Les actions spécifiques interviennent elles-mêmes à deux niveaux. Tout d'abord, elles peuvent diminuer l'occurrence même des aléas. Mais elles permettent également de lutter contre les perturbations liées aux aléas, en renforçant la résistance du système par rapport à ces derniers. La frontière entre aléa et vulnérabilité n'est pas nette.

B- Les actions à un niveau global : adaptations aux perturbations

Le service dans les transports en commun s'effectue en mode normal ou perturbé. Lorsque le service normal (théorique) n'est plus respecté, des mesures de régulation sont mises en œuvre pour limiter l'effet des perturbations. Celles-ci ont un caractère provisoire et un effet limité dans le temps, l'objectif étant de retrouver le plus rapidement possible le service théorique et

de limiter la gêne des voyageurs. En effet, « *la défaillance d'un réseau est ressentie par les usagers comme une atteinte plus ou moins grave selon la durée, l'importance et la fréquence des contraintes qu'elle induit* » (Blancher, 1998).

Les régulateurs ont donc pour mission d'adapter l'offre à la perturbation rencontrée. La régulation se fait a priori lors d'une perturbation connue à l'avance, en temps réel, ou peut correspondre à une adaptation sur le long terme à des modifications. Le déclenchement des actions de régulation est lié à la définition des situations perturbées, à la frontière entre situation normale et perturbée. Les actions de régulation de l'offre sont accompagnées d'une information des voyageurs.

1 - Régulation a priori

La régulation a priori s'effectue en amont et intervient en particulier lors de mouvements de grève annoncés ou de travaux sur le réseau. Ainsi, un opérateur peut être amené en cas d'évènements annoncés à modifier son plan de transport initial. Classiquement, une perturbation est dite prévue si elle est connue plus de 24h à l'avance. L'information est diffusée aux voyageurs afin que ceux-ci puissent prendre leurs dispositions¹.

Sur ce plan, la Loi sur le service minimum dans les transports a pour objectif d'améliorer la continuité du service en cas de perturbation prévisible :

- travaux programmés sur les infrastructures,
- incidents d'exploitation durables,
- aléas climatiques après alerte météorologique,
- évènements divers dont l'entreprise de transport est avertie à l'avance par l'Etat, l'Autorité Organisatrice du transport ou le gestionnaire de l'infrastructure,
- grèves.

La Loi donne à l'Autorité Organisatrice la responsabilité de la définition des dessertes prioritaires. L'entreprise doit ensuite élaborer un plan de transport adapté aux priorités de desserte (article 4) et informer de manière fiable les voyageurs.

2 - Régulation en temps réel

La régulation en temps réel correspond à la nécessité d'adapter en continu le système en raison des perturbations qu'il subit. L'objectif majeur est d'éviter une propagation des dysfonctionnements sur le réseau et d'acheminer les voyageurs en fonction des priorités de circulation retenues, tout en essayant de parvenir au plus vite à un retour à la normale.

E. Lévy (Lévy, 1999a) distingue trois types de situation :

- les situations de « non perturbation » (la structure du planning, du Tableau de Marche permet d'intégrer de petits aléas),

¹ Exemple du site Internet www.abcdtrains.com qui indique les horaires des jours de grève pour Transilien.

- les situations simples (intervention légère du régulateur, sans difficulté apparente)¹,
- les situations complexes, où les paramètres se multiplient et où l'activité du régulateur s'intensifie.

A ce niveau, le travail du régulateur peut être découpé en plusieurs phases :

- l'acquisition d'informations,
- l'analyse,
- la décision sur les actions à mener².

Ces stratégies sont nécessairement tributaires de contraintes dont le régulateur doit tenir compte. Il s'agit ici d'une « régulation par l'offre ». Par ailleurs, de plus en plus de systèmes diffusent de l'information en temps réel aux voyageurs. Quel peut-être leur rôle en situation perturbée ? Dans quelle mesure cela peut-il être complémentaire avec la régulation « par l'offre » ?

3 - Régulation à long terme

Les transports doivent également s'adapter sur une échelle de temps plus importante. Le processus de formatage de la mobilité, auquel participent les transports en commun, révèle inévitablement à son observateur des éléments n'entrant pas dans les cadres et les formats définis : ces éléments constituent des « singularités » (spatiales, temporelles, humaines). Si celles-ci deviennent suffisamment répétitives et stables, elles peuvent acquérir le statut de « régularités » et il faut alors modifier la nature du système de circulation et ses rapports à l'environnement. Ainsi, « *les changements de TM^3 indiquent à la fois un effort d'optimisation de l'offre à la demande mais aussi une adaptation aux rythmes de la ville, une catégorisation implicite des voyageurs* » (Lévy, 1999a).

Le retour d'expérience permet d'obtenir des informations pertinentes dans le but d'adapter le système aux nouvelles « régularités ». Plusieurs actions sont possibles, allant des modifications à la marge de l'offre de transport jusqu'à des actions de plus grande ampleur (ex : mise en place de nouvelles lignes). Néanmoins, l'Aménagement n'a pas uniquement pour but d'adapter l'offre à la demande. Des politiques volontaristes peuvent être mises en place afin d'organiser le territoire différemment (Aménagement par les transports⁴).

Le système doit s'adapter, se réguler à plusieurs échelles temporelles mais également aux différents niveaux de son organisation. Les actions sur l'offre de transport nécessitent des traitements d'informations, lesquelles peuvent ensuite être diffusées aux voyageurs. A ce niveau, l'amélioration des possibilités technologiques ouvre de nouvelles perspectives.

¹ « Ce type de situation peut cependant basculer à tout moment vers quelque chose de plus difficile à gérer. Une erreur de jugement, un moment d'inattention, des manoeuvres inadaptées peuvent en effet entraîner des effets en cascade » (Lévy, 1999).

² En milieu urbain, se basant sur les travaux de la RATP, H. Laïchour distingue cinq logiques de régulation : l'enlèvement de la charge, la régularité, la ponctualité, la correspondance et la gestion du personnel : voir le chapitre 2 dans (Hayat (dir.), 2001).

³ Tableau de Marche.

⁴ Voir dans le chapitre II le paragraphe consacré à l'Aménagement par les transports.

C- Notion de Système de Transport Intelligent

Le terme “Transports intelligents ” désigne « *les applications au domaine des transports des nouvelles technologies de l'information et de la communication. Plus particulièrement, il s'agit de l'ensemble des systèmes permettant de collecter, stocker, traiter l'information relative au mouvement des personnes et des marchandises et notamment des systèmes d'information voyageur, de paiements électroniques, de gestion de fret, d'aide à la gestion du trafic...* » (ITS France, 2002). Il trouve son origine aux Etats-Unis dans les années 1960, en réponse à l'augmentation de la congestion routière (Hwang, 2006).

De nombreux progrès sont attendus et la notion de « Système de Transport Intelligent » est de plus en plus utilisée, en particulier pour exprimer l'adaptation d'un système de transport à des situations variées grâce au rôle joué par l'information. Elle est liée au développement d'outils technologiques adaptés au domaine des transports, autorisant la diffusion d'une information dynamique et personnalisée : « *les systèmes de transport intelligents sont constitués d'un ensemble complexe de technologies dérivées de l'informatique et appliquées aux infrastructures de transport et aux véhicules*¹ » (Stough, 2001).

Deux catégories de systèmes s'intégrant dans les STI peuvent être distinguées (Button et Hensher, 2001).

Les « Advanced Traffic Management Systems »² (ATMS) utilisés par les opérateurs, dont le but est de faciliter la fluidité du trafic. Ils regroupent différents outils tels que la signalisation ou les systèmes de régulation en cas d'accident.

Les « Advanced Traveler Information Systems »³ (ATIS) dirigés vers les voyageurs et leur permettant d'avoir un comportement actif par rapport à la situation, notamment en cas de perturbations : « *au final, c'est le comportement des gens qui utilisent, influencent, ou sont influencés par la technologie du transport, qui déterminera à long terme dans quelle mesure les Systèmes de Transport Intelligents atteignent leurs objectifs*⁴» (Stough, 2001).

Il s'agit par exemple d'une information en temps réel sur le trafic, sur les travaux pouvant avoir des conséquences sur la circulation. La diffusion des messages s'opère au moyen de nombreux canaux (ex : Internet, radio, téléphone portable, etc.). L'utilisation de tels systèmes devrait améliorer les relations entre l'infrastructure, les véhicules, les utilisateurs, afin que les composants fonctionnent comme un tout et de façon plus efficiente. Bien que non quantifiables à l'heure actuelle, de nombreux bénéfices sont escomptés par rapport à une information traditionnelle (statique) : meilleure utilisation des infrastructures, amélioration du trafic, meilleure utilisation du transport public et développement de l'intermodalité, amélioration de la sécurité, réduction des impacts environnementaux... (Button, 2001).

¹ « *Intelligent transport systems are a complex of technologies that are derived from information and computer technology and applied to transport infrastructure and vehicles.* »

² Que l'on pourrait traduire par : « systèmes avancés de gestion du trafic ».

³ Que l'on pourrait traduire par : « systèmes avancés pour l'information des voyageurs ».

⁴ « *In the end it is the behaviour of people who use, influence, or are influenced by transportation technology that will ultimately determine how successfully ITSs achieve their intended objectives.* »

Cette notion, bien que non spécifique aux transports en commun, met en évidence le rôle de l'information dans les mécanismes d'adaptation. Le terme « intelligent » traduit la connaissance supplémentaire des voyageurs et des opérateurs, grâce à l'information, facilitant une adaptation du système aux circonstances. On peut déjà se poser la question de la complémentarité des ATMS et des ATIS : les objectifs des opérateurs (réguler le trafic) sont-ils compatibles avec ceux des voyageurs (arriver le plus rapidement possible)? Par exemple, si tout le monde connaît le chemin le plus court et l'utilise, cela peut engendrer des problèmes de capacité. Ne faut-il mieux pas jouer sur des rationalités différentes des individus ?

Nous travaillons ici sur la régulation des situations perturbées que l'on peut définir de manière large comme la limitation de l'écart entre une situation normale, de référence, et la situation perturbée grâce à des actions pouvant s'exercer à la fois au niveau de l'offre et de la demande de transport. Dans le domaine ferroviaire, le terme de régulation est employé pour la gestion des circulations et donc de l'offre. Néanmoins, inclure les voyageurs et l'information qui leur est diffusée nous semble fondamental. Ces actions de régulation varient selon le degré de perturbation du système.

Section 5 - Intensité des situations perturbées, mesure des dommages

Les systèmes de transports en commun subissent des perturbations d'origine interne ou externe pouvant altérer leur fonctionnement. Celles-ci sont de nature et d'intensité diverses. Les préjudices ne sont pas toujours de nature booléenne. En effet, un aléa peut par exemple engendrer une vitesse de déplacement moins élevée, une perte de capacité, une saturation sur d'autres lignes du réseau en raison des réorientations des voyageurs.

A- Mesure des dommages

Le dommage est « *une valeur anthropocentrique qui traduit la conséquence économique défavorable [d'un évènement] sur les biens, les activités et les personnes* » (Hubert et Ledoux, 1999). Sa mesure est fortement liée à la prédétermination des enjeux. Plusieurs types de dommages existent : dommages directs ou indirects, tangibles ou intangibles.

1 - Dommages directs et indirects

Les dommages directs aux réseaux correspondent principalement à leurs dégradations physiques. Leur évaluation peut être réalisée par le biais d'une estimation des coûts de réparation, de remise en fonctionnement ou de renouvellement. Dans le cas des grèves ou des fortes affluences par exemple, il y a perturbation sans dégradation du « réseau-support » et des véhicules.

Les dommages indirects traduisent les « *dégâts et perturbations engendrés par le phénomène par l'intermédiaire des dommages directs* » (Hubert et Ledoux, 1999). Les dommages indirects primaires surviennent dans la zone où le phénomène s'est produit et les dommages indirects secondaires se manifestent à l'extérieur de cette même zone. Pour les réseaux, les

dommages indirects concernent les pertes d'exploitation, les frais de nettoyage et les effets (immédiats ou différés) dûs à un arrêt de fonctionnement ou à un fonctionnement en mode dégradé (temps perdu pour les voyageurs, conséquences économiques de la non-fourniture du service, etc).

2 - Dommages tangibles et intangibles

Outre la distinction entre les dommages directs et indirects, les dommages sont de nature tangible ou intangible. Les dommages tangibles font l'objet d'une évaluation monétaire (ex : dégâts matériels sur les biens et activités dont la valeur est connue ou facilement évaluable par expertise).

Les dommages intangibles sont eux difficilement chiffrables : vies humaines, problèmes de santé à court et moyen terme, pertes de biens privés irremplaçables, traumatismes et problèmes psychologiques (par exemple à la suite d'attentats ou de suicides).

3 - Difficulté de la mesure

Une évaluation des conséquences d'un aléa nécessite d'identifier clairement tous les types d'enjeux en présence et de pouvoir les caractériser séparément les uns des autres¹. Lorsque le risque est appréhendé sous ses formes économiques, la vulnérabilité est explicitement exprimée sous forme de coûts. Cependant, cette opération est très délicate car les enjeux et les dommages « *présentent des effets combinés et en chaîne qui peuvent être immédiats ou différés et qui peuvent s'exprimer à différentes échelles spatiales* » (Hubert et Ledoux, 1999). Il existe une variété de modes d'endommagement : fonctionnels, matériels, psychologiques...sur une variété d'entités touchées.

Par ailleurs, les dommages intangibles et les dommages indirects sont difficiles à identifier, à quantifier et même à comparer proportionnellement à l'ensemble des dégâts. Cela peut nuire fortement à la précision des mesures.

En outre, la mesure des dommages aux réseaux est par nature complexe. Outre les typologies présentées ci-dessus, on distingue généralement les dommages surfaciques, que l'on rattache directement à un type d'occupation des sols de manière proportionnelle, et les dommages non surfaciques, pour lesquels on ne peut évaluer le dommage en proportion d'une surface. Les réseaux entrent typiquement dans la seconde catégorie. Il n'existe pas de relation directe entre un point de coupure et le dommage car ce dernier dépend de la structure du réseau (maillage, interconnexions, etc).

Par ailleurs, « *la vulnérabilité n'est pas scalaire², mais [est] une variable (ou une fonction) associant à chaque phénomène une valeur de vulnérabilité : de ce fait, sa connaissance doit permettre de caractériser la réaction de l'entité considérée quelles que soient les caractéristiques physiques du phénomène envisagé* » (Gleyze, 2005).

¹ Ceci est à rapprocher de la démarche analytique, présentée plus haut.

² Se dit d'une grandeur caractérisable par un simple nombre (Le Petit Larousse illustré, 2006).

Ainsi, il n’y a pas une mais des vulnérabilités. Un système peut en effet être peu vulnérable à certains phénomènes et fortement à d’autres.

Nous abordons donc de manière partielle la mesure de vulnérabilité du système. Ceci est cohérent avec notre choix de travailler uniquement sur certains dommages indirects du système de transport en les intégrant dans l’analyse de la vulnérabilité structurelle (dégradation de la mise en relation des nœuds du réseau) et fonctionnelle (baisse de la performance fonctionnelle en raison des pertes de temps des voyageurs).

Nous travaillons sur la dégradation du « réseau-service » (liée à des causes diverses : matériel, roulant, infrastructures, actes d’incivilité...) qui correspond à un dommage indirect. L’unité de valeur est le temps (mise en relation des lieux, temps de parcours des voyageurs), celui-ci pouvant ensuite être éventuellement converti en valeur monétaire¹.

B- Des perturbations de nature et d’intensité variables

En dépit de la difficulté de mesure des dommages liés aux situations perturbées, il est possible de distinguer aisément différents degrés dans l’intensité des perturbations (Bayart, 1996a) :

- *perturbation partielle sur une ligne* (ex : retard, suppression d’un ou deux trains) ;
- *perturbation prolongée sur une ligne* : il faut instaurer une organisation spécifique temporaire ;
- *perturbation étendue à plusieurs lignes* (du fait de la structuration du réseau et de l’organisation de la circulation) ;
- *perturbation massive* : grève.

La nature des perturbations est variable. Généralement, c’est au niveau du respect des horaires que des conséquences des dysfonctionnements sont les plus visibles (ex : retard d’un train). Il est ainsi possible de quantifier le degré de perturbation, de mesurer l’intensité de la perturbation, telle que présentée plus haut².

Des critères plus qualitatifs permettent de saisir la notion de « situation perturbée » dans toute sa complexité : inconfort des voyageurs (lié par exemple à une diminution de la capacité), incohérence de diffusion de l’information, dégradation des véhicules. Une très faible perturbation (au niveau du pourcentage de véhicules concernés par exemple) peut avoir des répercussions importantes pour quelques voyageurs.

Ainsi, le terme « situation perturbée », utilisé très couramment, demande à être explicité dans la mesure où il fait référence à différents degrés de dysfonctionnements, à différentes natures de troubles.

E. Lévy a fait au cours de sa thèse une exploration des traces écrites concernant les perturbations à la RATP. Elle a notamment mis en évidence la place prépondérante des

¹ Voir dans la troisième partie les applications faites sur l’Île-de-France.

² Il est par exemple possible de calculer la différence entre le nombre de kilomètres prévus par le tableau de marche théorique et le nombre de kilomètres réalisés et de spatialiser par ligne l’intensité de la perturbation.

critères quantitatifs dans l'évaluation des situations perturbées. Selon elle, « *parler de "perturbation", c'est suggérer un point de référence. Une défaillance se mesure toujours en fonction de, par rapport à quelque chose* » (Lévy, 1999a). Les situations perturbées (domaine de vulnérabilité) se définissent en référence à une situation considérée comme normale théorique (domaine de fiabilité). Mais il existe un continuum et la frontière n'est pas aisée à délimiter. Elle dépend du niveau d'exigence.

Quel est le seuil à partir duquel on sort du domaine de la fiabilité pour entrer dans celui de la vulnérabilité et des régulations ? De faibles retards peuvent être considérés comme mineurs pour un exploitant mais très pénalisants pour un voyageur s'il rate une correspondance sur une ligne dont la fréquence de circulation des véhicules est faible.

Nous travaillons dans cette recherche sur deux types de perturbations :

- **interruptions de trafic sur des tronçons du réseau,**
- **mouvements sociaux entraînant la mise en place de Plans de Transport Adaptés.**

Conclusion

Les facteurs de vulnérabilité entraînent des dysfonctionnements des transports en commun et donc des variations de la qualité de service fournie aux voyageurs.

Au cours de ce chapitre, nous avons tout d'abord abordé le champ théorique du risque afin de l'appliquer au domaine des transports. Nous avons ensuite déterminé les enjeux propres aux transports en commun, les facteurs de vulnérabilité et les moyens de protection des systèmes de transports en commun, en cohérence avec la définition de la vulnérabilité adoptée.

Nous concentrons notre analyse sur les enjeux relatifs à la mise en relation des nœuds du réseau (approche structurelle) et aux temps de parcours des voyageurs (approche fonctionnelle), la première approche « nourrissant » la seconde.

Les perturbations sont de nature et d'intensité variables. Nous travaillons plus particulièrement sur les conséquences liées à des interruptions de trafic sur des tronçons et à des mouvements sociaux.

Parmi les moyens de régulation, nous avons insisté sur l'importance de l'information. La gestion de l'information (acquisition, circulation, diffusion) est fondamentale dans la régulation d'un système et permet donc de diminuer sa vulnérabilité. Nous avons notamment souligné le rôle que jouait l'information interne aux opérateurs.

Nous nous intéressons plus particulièrement ici au rôle que peut jouer l'information diffusée aux voyageurs dans les phénomènes de régulation.

Le chapitre V est consacré à l'information des voyageurs dans les transports collectifs.

CHAPITRE V INFORMATION DES VOYAGEURS DANS LES TRANSPORTS COLLECTIFS

Introduction

Au cours de ce chapitre, nous abordons l'information des voyageurs en utilisant plusieurs approches. Nous avons entrevu au cours du chapitre précédent le rôle potentiel de l'information dans la régulation des situations perturbées affectant les transports en commun.

L'information des voyageurs s'est progressivement développée dans les systèmes de transport. Une approche historique est ainsi proposée (section 1). La section 2 correspond à une approche théorique autour des concepts d'information et de communication.

L'information peut être diffusée de diverses manières, en différents lieux et dans des situations variées. L'objectif principal est de réduire les incertitudes sur les itinéraires, la durée, le coût du déplacement, la fréquence des dessertes et d'orienter le choix du voyageur avant et pendant son voyage. La section 3 est consacrée à une approche typologique de l'information des voyageurs : lieux de diffusion, informations théoriques et conjoncturelles...

Nous finissons ainsi de poser les briques sur la base desquelles nous construisons notre problématique et nos questionnements.

Section 1 - Approche historique

Selon G. Claisse (Claisse, 2002), dès le XIX^{ème} siècle, l'histoire des réseaux modernes de transports et celles des télécommunications sont étroitement liées comme l'illustrent ces deux exemples :

- la première ligne de télégraphe électrique est ouverte en 1839 le long de la ligne de chemin de fer londonienne Paddington-Euston,
- en France, la première ligne télégraphique est réalisée le long de la voie ferrée Paris-Rouen en 1845.

En effet, les premiers clients des compagnies télégraphiques sont les sociétés ferroviaires qui souhaitent disposer de moyens modernes de signalisation, de sécurisation et de régulation du trafic. Ainsi, en associant le « cheval d'acier » au « fil qui chante », les compagnies télégraphiques et la puissance publique visent également à assurer la surveillance, la sécurité et le contrôle de ce nouveau réseau.

Néanmoins, les outils de communication, tout du moins ceux pouvant être utilisés par les voyageurs, sont restés longtemps relativement peu sollicités. L'information est une composante « secondaire » de la qualité de service fournie aux clients par les exploitants, dont les missions primordiales sont d'assurer la mobilité et la sécurité dans les déplacements. Ce n'est qu'une fois le besoin premier de mobilité satisfait, qu'apparaît le besoin de commodité du déplacement, dont fait partie intégrante l'information des clients (Bréheret et Henry, 2000).

Cette place croissante de l'information dans les systèmes de transport, en particulier dans les transports en commun, est fortement liée à l'environnement (social, politique, technique...) dans lequel se situent les exploitants des systèmes de transport : « *informer et être informé sont, désormais, des besoins exprimés par l'ensemble de nos concitoyens. On peut constater que les transports publics n'échappent pas à cette règle. L'information dans les transports publics est devenue, non seulement un besoin mais aussi une exigence. Les usagers des transports publics souhaitent être de mieux en mieux informés avant et pendant leur déplacement* » (CERTU et UTP, 1996). L'importance accordée à l'information des voyageurs est liée à la place croissante de la dimension commerciale et de service dans la stratégie des exploitants. Elle a par ailleurs été facilitée par les progrès technologiques en la matière. La satisfaction des voyageurs est de plus en plus recherchée. Comme nous l'avons déjà souligné, on peut observer un glissement sémantique, l'utilisateur du service n'étant plus considéré comme un usager mais comme un client.

On est ainsi progressivement passé de la simple juxtaposition des réseaux à l'hybridation des fonctions et des services dans l'ensemble des systèmes de transport : « *Le téléphone mobile, la route intelligente, la voiture intelligente, mais aussi de nouvelles terminologies telles*

que l'infogistique, pour le transport de marchandises, et l'infomobilité, pour le transport de personnes, rendent compte de cette hybridation des transports et des TIC¹ » (Claisse, 2002).

L'application des nouvelles technologies dans le domaine de l'information s'est faite de manière progressive et différente suivant les réseaux. Les technologies de l'information et de la communication sont devenues un facteur de production et d'innovation essentiel dans la gestion des infrastructures, des véhicules et des prestations de services liés aux transports² : *« la recherche de gains d'efficacité, de qualité et de diversité dans le secteur des transports passe par une utilisation de plus en plus intensive des TIC. On en attend plus d'efficacité dans la gestion et la régulation du trafic »* (Claisse, 2002). Ces systèmes d'information en temps réel sur l'état de la circulation, la localisation des flottes de véhicules peuvent être utilisés pour :

- l'alimentation des modèles de prévision de trafic,
- la régulation en temps réel ou en temps différé des flux,
- l'information des voyageurs.

Ils sont donc au coeur des métiers des gestionnaires d'infrastructures routières et des réseaux aériens, ferroviaires et urbains de transports publics, l'objectif étant de rendre le couple infrastructure-véhicule intelligent et communicant, afin d'assister les régulateurs dans leur mission et les voyageurs dans la préparation et la réalisation de leurs déplacements.

De manière progressive, en fonction des outils techniques disponibles et des volontés des acteurs engagés, l'information a trouvé sa place dans le fonctionnement des transports collectifs. Elle est devenue un élément fondamental de la qualité de service, devant de surcroît conférer une image de modernité aux opérateurs. L'amélioration de l'information en situation perturbée est actuellement une des priorités majeures pour les opérateurs et les Autorités Organisatrices.

Section 2 - Approche théorique³

Les notions d'information et de communication ne sont pas complètement formalisées. L'Encyclopédie Universelle Larousse 2004 donne plusieurs définitions pour le terme « information », dont les deux suivantes : *« action d'informer quelqu'un, un groupe, de le tenir au courant des évènements », « indication, renseignement, précision que l'on donne ou que l'on obtient sur quelqu'un ou quelque chose »*. On a ici deux aspects : le produit et le processus d'échange.

L'information est généralement considérée comme se rapportant aux signes ou aux messages codés transmis unilatéralement par un émetteur (source) à un receveur. Celle de communication correspond davantage à la complexité des phénomènes d'échange de toute

¹ Technologies de l'Information et de la Communication.

² Voir dans le chapitre précédent le paragraphe consacré aux Systèmes de Transport Intelligents.

³ Les sous-sections A, B et C sont basées sur (Masmoudi, 2002).

nature intervenant au moyen de signes et de symboles entre les individus et les groupes (Masmoudi, 2002).

Nous présentons ici très succinctement quelques approches théoriques autour de l'information et de la communication.

A- Théorie de l'information et de la communication

Le modèle quantitatif de communication a été formulé en 1949 par C-E. Shannon et W. Weaver. Il est illustré par la *figure 14* ci-dessous.

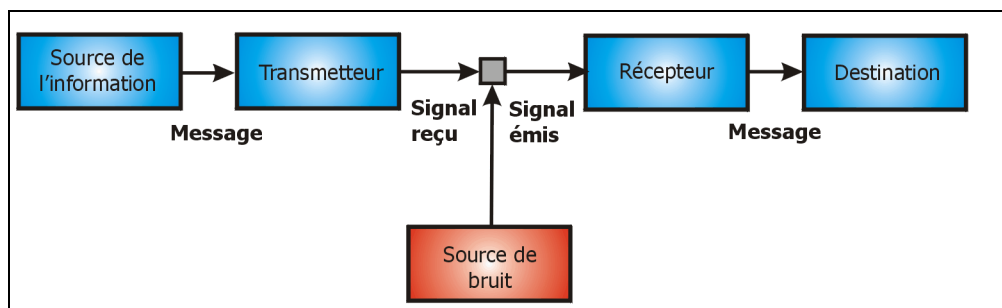


figure 14 Modèle quantitatif de communication¹

Ce modèle de communication comprend quatre éléments :

- une source d'information qui envoie des messages,
- un transmetteur -ou émetteur- capable de transformer le message en un signal,
- un récepteur qui décode le signal afin de retrouver le message initial,
- une destination : personne ou support physique auquel le message est censé s'adresser.

Des phénomènes peuvent perturber les transmissions d'information (source de bruit).

B- Modèles d'inspiration psychosociologique

On doit à H. Lasswell le découpage, avec précision, des éléments constitutifs de l'information. Selon ce théoricien, on ne peut décrire convenablement une action de communication que si l'on répond aux questions suivantes : qui dit quoi, par quel canal, à qui et avec quels effets ?

La description des émetteurs, l'analyse du contenu des messages, l'étude des canaux de transmission, l'identification des audiences et l'évaluation des effets : tels sont les principaux pôles autour desquels doivent alors s'ordonner les études sur les communications. Il est possible de représenter le modèle de Lasswell avec le schéma représenté ci-dessous.

¹ Source : SHANNON Claude Elwood, WEAVER Warren. 1949. *The Mathematical Theory of Communication*. Chicago : Illinois Press, 125 p. Repris dans (Masmoudi, 2002).

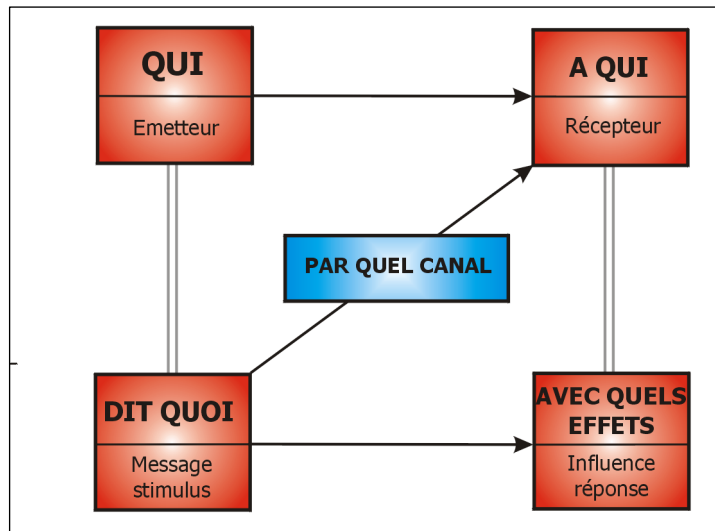


figure 15 *Modèle de Lasswell¹*

Dans notre cas, la question des effets de l'information pose la problématique de la manipulation des voyageurs. En effet, si un opérateur cherche des effets particuliers (ex : réorientations), il peut adopter une stratégie de diffusion d'information pour atteindre ses objectifs (lesquels, de niveau macroscopique, ne sont pas nécessairement compatibles avec ceux des voyageurs).

C- Modèles d'inspiration culturaliste ou anthropologique

M. Mc Luhan renverse la perspective habituelle dans son livre « Pour comprendre les médias »² publié en 1964, en affirmant que « le message, c'est le médium ». Ce qui importe, ce n'est pas, selon lui, le contenu des messages, mais la façon dont ceux-ci sont transmis. Autrement dit, le mode de transmission d'une culture influe sur celle-ci et la transforme. L'important est le « message » exercé par les médias sur les modes d'appréhension et de perception du monde et de ses réalités.

De ces quelques références théoriques, nous retenons notamment l'importance du média de diffusion et des effets de l'information sur le récepteur. L'enjeu final est bien que l'information ait des effets et il faut pour ce faire trouver les canaux de diffusion adéquats.

D- Notion d'information appliquée aux transports en commun

Il convient de préciser de façon claire ce que nous entendons par information des voyageurs dans les transports en commun.

L'information constitue une aide au voyageur pour réduire son incertitude. Informer un voyageur signifie lui fournir volontairement tous les renseignements relatifs à son

¹ Source : (Masmoudi, 2002).

² Mc Luhan M., « Pour comprendre les médias : les prolongements technologiques de l'homme », Ed. du Seuil, Paris, 1964, 390p.

déplacement (horaires, tarifs, services) et tout ce qui s'y rapporte. Il s'agit d'aider le voyageur à se repérer sur le réseau et sur le mode d'utilisation de ce dernier. Ceci suppose une mise en forme dans la mesure où la chaîne de l'information est encore très liée à la production et à son langage technique.

En cas de perturbation, l'information doit permettre au voyageur d'adapter son comportement à l'évolution de la situation. On peut distinguer ici deux manières de considérer l'information :

- l'information des voyageurs : qui consiste à aider les voyageurs en leur donnant tous les renseignements possibles, pour leur bien propre (intérêt individuel) ;
- l'information diffusée aux voyageurs : qui peut supposer une stratégie de diffusion de l'information pour le bien de l'exploitant (et de l'Intérêt Général ?). Ceci peut par exemple consister à ne pas diffuser d'information sur une desserte de substitution routière pour éviter les problèmes de capacité.

Le travail de communication consiste quant à lui à retravailler l'information de manière à délivrer des messages correspondant à la politique de l'entreprise et revêt donc un caractère commercial et institutionnel. Information des voyageurs et communication sont liés car la présentation de l'information a une influence sur l'image des opérateurs.

Section 3 - Approche typologique

De multiples supports ou équipements existent et sont développés pour rendre plus efficace l'information : information papier, téléaffichage, annonces sonores, téléphone, Internet, etc. Ils sont plus ou moins adaptés selon le lieu de diffusion, le type d'information et le voyageur concerné.

Les moyens d'information sont « spontanés » (ex : alerte par SMS) ou à la demande (ex : appel d'un serveur vocal). De plus, l'information diffusée est de nature différente selon qu'elle correspond à des données théoriques générales ou qu'elle concerne des situations conjoncturelles, perturbées. Plusieurs classifications peuvent ainsi être effectuées pour caractériser l'information dans les transports en commun.

A- Informations monomodales et multimodales

L'information monomodale ne concerne qu'un seul mode de transport.

A contrario, l'information multimodale peut être définie comme la « *mise à disposition de toute information utile et pertinente pour la préparation et l'accomplissement d'un déplacement pouvant être réalisé en utilisant différents modes de transport de type individuel et collectif* » (Boullier et alii, 2004). Par rapport à cette définition, nous choisissons d'exclure ici l'information sur les modes de transport individuels.

Les systèmes d'information multimodale fournissent des informations sur les itinéraires à suivre, les périodes et les modes à choisir. Ils constituent une véritable aide au déplacement.

Ils nécessitent, pour être performants, des coopérations entre tous les acteurs impliqués. La loi SRU identifie l'information multimodale comme une compétence des Régions.

Cette information est de plus en plus ressentie comme « normale », naturelle pour le voyageur qui souhaite pouvoir organiser son déplacement sans avoir à multiplier les recherches d'information. Ceci suppose des échanges d'informations entre opérateurs, qui sont dans la pratique plus faciles à mettre en place pour des informations théoriques que conjoncturelles.

B- Informations théoriques et conjoncturelles

1 - Informations théoriques

Les informations théoriques correspondent à des renseignements de base : horaires théoriques, tarifs, etc. Le voyageur souhaite obtenir une information complète et précise, afin de maximiser la rationalité de son choix (avant le départ) et voyager paisiblement, avec une information riche au cours de son déplacement.

2 - Informations conjoncturelles

Les informations conjoncturelles correspondent la plupart du temps à des situations perturbées¹. Deux types de situation perturbée peuvent être envisagés : les situations prévues (travaux, grèves principalement) et non prévues (suite à un incident).

Le voyageur souhaite avoir accès à une information évolutive et réactive pour comprendre ce qui se passe en cas de problème de circulation et connaître les causes de la perturbation : « *le client souhaite être renseigné sur l'évolution de la situation, et de façon claire sur les itinéraires éventuels de substitution, les retards prévisibles, les modifications de la desserte* » (Sevel, 2000). Le voyageur admet les défaillances mais beaucoup moins de ne pas être informé. Face au manque d'information, notamment en situation perturbée, il a le sentiment d'être abandonné à son sort.

Un traitement adapté de l'information lors de perturbations du trafic est très important dans la mesure où « *le voyageur confronté à une situation nouvelle prendra beaucoup plus souvent conscience de la mauvaise organisation de la présentation des informations : panneaux peu lisibles, confus, informations inaudibles* » (Ignazi et Keravel, 2000).

La Loi sur le service minimum dans les transports stipule qu' « *en cas de perturbation du trafic, tout usager a le droit de disposer d'une information gratuite, précise et fiable sur le service assuré, dans des conditions prévues par le plan d'information des usagers. En cas de perturbation prévisible, l'information aux usagers doit être délivrée par l'entreprise de transport au plus tard 24h avant le début de la perturbation* » (article 7). Ainsi, l'information en situation perturbée prévue n'est plus une obligation commerciale que se donne l'entreprise à elle-même : elle lui est imposée. Il s'agit d'une obligation légale, d'un droit du voyageur,

¹ Mais pas uniquement. Il peut également y avoir des bonnes nouvelles. Exemple : gratuité d'un réseau pendant un week-end, mises en place de dessertes supplémentaires les nuits festives...

avec sanction pour l'entreprise en cas de défaillance (s'ajoutant à des remboursements des voyageurs). Le Droit au Transport et à l'Information est également valable en situation perturbée.

En cas de situation perturbée non prévue, une information fiable est plus difficile à diffuser. Les agents en charge de l'information doivent parfois gérer simultanément l'information et la prise en charge des voyageurs, les modifications de desserte éventuelles, les contacts avec les agents sur le terrain. Ils n'ont donc pas toujours la possibilité de diffuser une information complète et surtout de la modifier en fonction de l'évolution de la situation (Sevel, 2000).

De plus, il est difficile de diffuser une information quand les incertitudes sur l'évolution de la situation sont fortes. L'information des voyageurs demeure tributaire de l'information « transport », portant sur la connaissance de la circulation des véhicules.

Ainsi, l'information sur les perturbations du trafic est souvent un objet d'insatisfaction des voyageurs, qui reprochent aux opérateurs de ne pas diffuser assez vite en situation de perturbation des informations relatives à l'étendue et à la durée prévisible des dérangements d'exploitation.

Information en situation normale : pour les voyageurs, il s'agit de pouvoir accéder quel que soit le média utilisé aux informations (horaires, prix, itinéraires, etc.) pour préparer et/ou effectuer un déplacement sans qu'il y ait de perturbation notable sur le réseau.

Information en situation perturbée prévue : connaissant les perturbations (travaux, grèves...), les voyageurs doivent être informés à l'avance de l'ampleur et des conséquences des perturbations sur leur déplacement.

Information en situation perturbée non prévue : lorsqu'un incident se produit, les voyageurs doivent être informés rapidement et régulièrement de la nature de la perturbation, des mesures prises ou en cours, des itinéraires de substitution possibles ainsi que des conséquences sur leur déplacement.

encadré 1 Les besoins d'information en fonction de la situation

C- Nature de l'information diffusée

Les éléments d'information diffusés au voyageur peuvent concerner :

- l'offre de transport proprement dite : plan de réseau, circulations, horaires, y compris lors de perturbations ;
- les tarifs ;
- les services annexes proposés (transport de bagages ou de bicyclettes, objets trouvés) ;
- des renseignements divers sur l'environnement dans lequel se situe le réseau (lieux remarquables accessibles, évènements...).

Les évolutions en matière de mobilité se traduisent par une diversification des motifs de déplacement. En effet, si les déplacements domicile/travail demeurent prépondérants, les

déplacements liés aux loisirs prennent une place croissante et les transporteurs essaient de s'adapter en proposant un service de mobilité plutôt qu'une simple offre de transport¹.

D- Lieux de diffusion

Tout au long de la chaîne de transport et en amont de celle-ci, le voyageur doit être informé.

Tout d'abord, l'**information à emporter** est de nature particulière car elle est destinée à être consultée en tout lieu. Elle correspond la plupart du temps à des informations théoriques, à des situations perturbées prévues ou à des documents d'information générale (renseignements sur les produits, moyens de paiement, équipements mis en place). Les supports écrits sont donc une source difficilement remplaçable car ils permettent de transporter en permanence l'information sur soi.

L'**information dans les véhicules** peut être sonore et/ou visuelle. La sonorisation facilite la transmission rapide des informations à l'ensemble des passagers d'un véhicule donné. Beaucoup d'opérateurs ont également développé des systèmes d'affichage embarqué diffusant à l'intérieur des véhicules leur direction et le nom du prochain arrêt. Les conducteurs et les contrôleurs peuvent également répondre aux interrogations des voyageurs et les tenir informés des modifications d'itinéraire du véhicule consécutives aux difficultés d'exploitation.

L'**information au niveau des lieux d'arrêt** permet de répondre à la question suivante : « à quelle heure arrive le train (ou bus, tramway...) allant dans ma direction desservant mon lieu de destination ? ». En situation perturbée, elle renseigne les voyageurs sur les causes des dysfonctionnements, le temps d'attente prévu et éventuellement l'itinéraire de substitution. L'attente des voyageurs est forte : *« tout au long d'un parcours de transport en commun, les points d'attente sont un lieu de tension où chaque voyageur est avide d'informations. Celles-ci doivent être pertinentes, instantanées et fiables »* (Lelong et Gault, 2001).

L'**information à distance** est en plein développement. Des données horaires et tarifaires en constituent la base mais elle intègre de plus en plus la multimodalité, les informations horaires en temps réel et les informations conjoncturelles en situation perturbée. Plusieurs supports peuvent être proposés : **Internet** et **téléphone** principalement, mais également la **radio** ou la télévision dans une moindre mesure. Il est également possible de télécharger des informations (ex : fiches horaires) sur les sites Internet.

L'utilisation du **téléphone portable** facilite un accès et une diffusion en tout lieu (excepté quelques zones d'ombres) et dans presque toutes les circonstances. Les premières expérimentations dans ce domaine ont été réalisées en Suède, dans la ville de Göteborg . Ces services se développent fortement : consultations (sites Internet accessibles par téléphone), appels de numéros dédiés, réception de SMS.

¹ Pour exemple, la rubrique Citylien du site transilien.com, qui permet de trouver des événements (sportifs, culturels...) à moins de 15, 30, 45 minutes des gares en Île-de-France.

E- Informations interactives ou non

L'interactivité signifie que le système peut apporter des réponses à des questions formulées par l'utilisateur : un dialogue est possible, de façon plus ou moins riche, selon les cas. Ces services offrent désormais une vraie valeur ajoutée par rapport aux informations contenues dans un guide horaire ou sur une fiche de ligne.

Les annonces sonores, les panneaux d'information ne constituent pas des supports d'interactivité. Au contraire, les recherches d'itinéraires sur Internet, des bornes d'information voyageurs en gare, les appels téléphoniques permettent une interactivité entre le système et le voyageur. L'interactivité la plus riche est théoriquement la communication entre un voyageur et un agent d'information (au téléphone, à un lieu d'arrêt, dans un véhicule).

Une nouvelle forme d'interactivité, actuellement en émergence, est le SMS +. Le voyageur envoie un SMS pour connaître l'état du trafic ou ses prochains horaires et reçoit en retour un message.

F- Informations collectives ou personnalisées

Les informations peuvent être collectives (ex : diffusion d'annonces en gare) ou personnalisées. La dimension collective ou personnalisée d'une information est étroitement liée à l'interactivité, présentée plus haut. De nombreux projets vont dans le sens d'une personnalisation de l'information. Par exemple, il est possible de créer des alertes sur certaines lignes et de recevoir des e-mails lors de perturbations importantes sur celles-ci.

Les utilisateurs des transports en commun ont besoin de nombreuses informations, à la fois pour l'organisation et la réalisation de leur voyage. Ce besoin varie fortement suivant le moment (avant ou pendant le voyage), le type de voyageur (occasionnel ou régulier, médias d'information préférés...), la nature du déplacement et la situation (plus ou moins perturbée, avec un gradient dans la perturbation). L'information sur les situations perturbées nécessite un traitement particulier, puisqu'elle est la plupart du temps non connue longtemps à l'avance, voire totalement imprévue, et que sa durée de validité est limitée dans le temps. L'information dynamique et en temps réel est adaptée en ces circonstances.

Conclusion

L'information s'est progressivement développée dans les systèmes de transports en commun et il est de plus en plus courant de voir des opérateurs diffuser de l'information dynamique aux voyageurs, celle-ci pouvant même être personnalisée. Ainsi « *en levant certains obstacles techniques et fonctionnels au développement de l'interconnexion, de l'intermodalité et de l'interopérabilité, les TIC participent aussi à l'amélioration de la qualité de la chaîne de déplacement tant pour les clients que pour les opérateurs* » (Claisse, 2002), même si de nombreux progrès restent à faire, notamment en situation perturbée.

De ce fait, l'information des voyageurs est un domaine stratégique « *où se jouent à la fois l'image du réseau, l'amélioration du service à la clientèle et la capacité des réseaux à accroître leur part dans le marché des déplacements, à raison d'investissements dans les nouvelles technologies* » (CERTU et UTP, 1996). On peut noter une diversité tant au niveau des situations, des voyageurs, que des motifs de déplacement, impliquant des attentes très diversifiées et légitimement croissantes en raison du développement actuel des technologies de l'information. Au cours du déplacement, les attentes en matière d'information fluctuent : elles connaissent des pics d'intensité.

De même que l'intégration des TIC est un outil de régulation de l'offre pour les opérateurs (ponctualité, régularité, rapidité) grâce aux informations disponibles sur le réseau (intelligence du système), l'information des voyageurs permet potentiellement de participer aux phénomènes de régulation en augmentant la rationalité des choix de ces derniers (ils deviennent également plus « intelligents »).

Il est donc pertinent d'étudier la question de la régulation « par la demande » grâce à l'information des voyageurs et d'étudier la compatibilité entre les finalités des opérateurs (de niveau macroscopique : écoulement des flux) et celles des voyageurs (arriver le plus rapidement et dans les meilleures conditions à destination).

SYNTHESE, DEFINITION DES QUESTIONNEMENTS ET DE LA METHODE

Principales étapes de la démarche

Rappelons tout d'abord succinctement les principales étapes de la démarche fondant ce travail et aboutissant à notre problématique de recherche et à nos questionnements spécifiques.

Nous avons constaté le fort déséquilibre modal dans les transports de voyageurs, situation qualifiée d'insatisfaisante et légitimant une interrogation, dans le champ de l'Aménagement de l'Espace et Urbanisme, sur les moyens d'actions possibles. Nous avons étudié les outils à disposition de l'aménageur. Parmi les mesures possibles, nous avons souligné le rôle déterminant de l'amélioration de la qualité de service des transports en commun, facteur clé de l'évolution de cette situation.

Ainsi, nous avons approfondi la question de la performance des transports en commun et avons mis en évidence, entre autres, leurs caractéristiques propres de fonctionnement : importance stratégique des interfaces du réseau, présence d'opérateurs et de lignes. Nous avons choisi de travailler sur la performance adaptative des systèmes de transports en commun. En particulier, la prise en compte de la vulnérabilité est fondamentale. Lors de dysfonctionnements, la qualité de service est dégradée et il est nécessaire que le système puisse s'adapter de façon réactive aux perturbations. L'information est potentiellement un facteur déterminant dans la réduction de la propagation des perturbations.

Problématique générale et questionnements spécifiques de cette recherche

La problématique générale de cette recherche est l'évaluation de la performance adaptative des systèmes de transport en commun, et en particulier la mesure de leur vulnérabilité. Celle-ci est abordée dans ses aspects structurels et fonctionnels. Même si l'objectif principal est de progresser dans les mesures de la vulnérabilité fonctionnelle, l'analyse structurelle reste très utile pour étudier les caractéristiques de l'offre en situation perturbée et la comparer avec l'offre de référence. Elle nécessite par ailleurs uniquement des données sur l'offre de transport, plus faciles à obtenir ou à constituer que les données relatives à la demande.

Il nous est également possible de définir une question plus spécifique se situant dans le champ de la vulnérabilité fonctionnelle : **dans quelle mesure l'information des voyageurs contribue-t-elle à la régulation des situations perturbées grâce aux réorientations au niveau des nœuds du réseau ?**

Cette question peut être abordée de deux manières : du point de vue de l'exploitant (« top-down ») ou du voyageur (« bottom-up »). Plutôt que de choisir un de ces points de vue, nous laissons volontairement cette question ouverte afin de pouvoir discuter des liens, des (in ?)compatibilités entre les finalités des exploitants et des voyageurs.

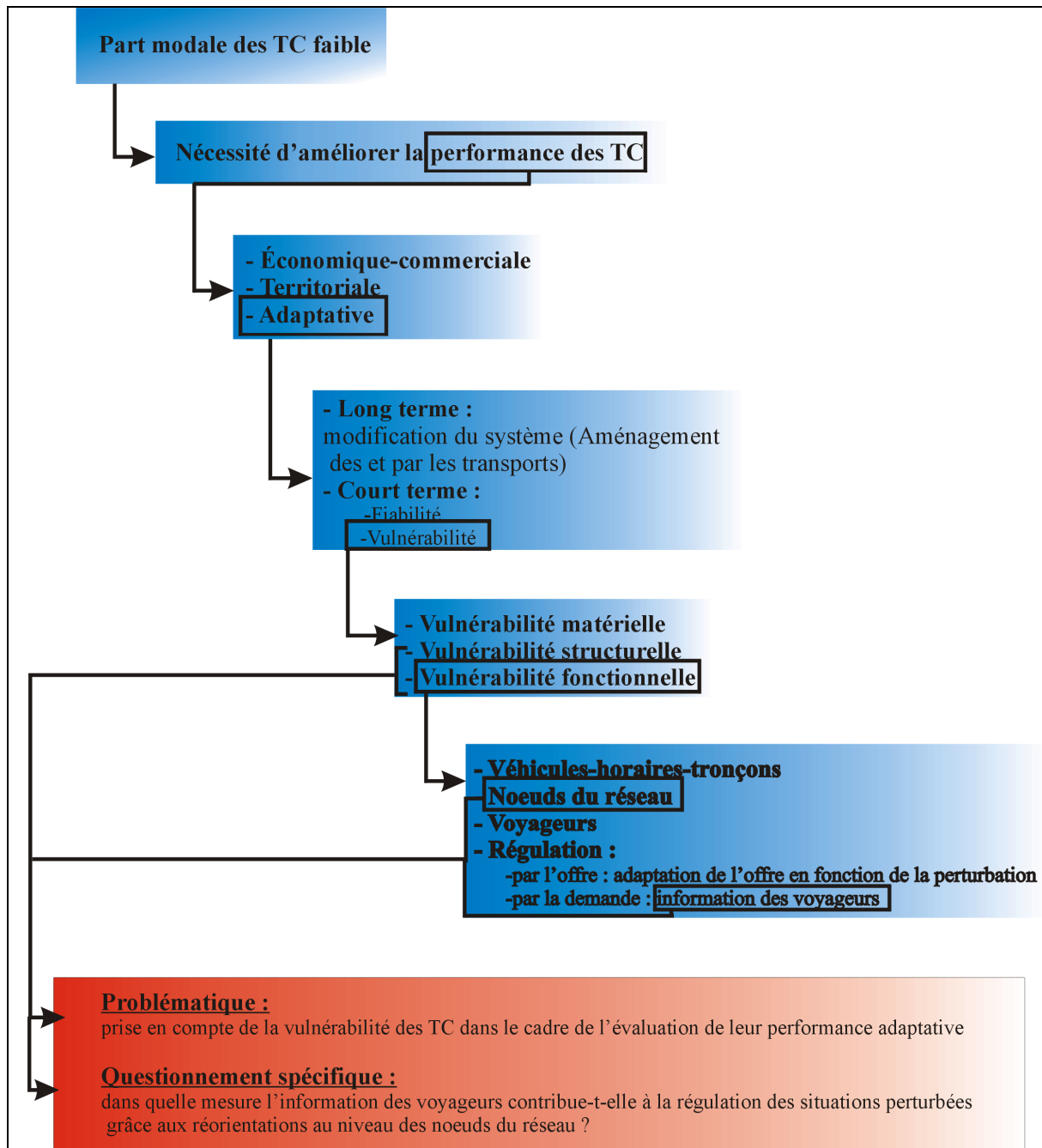


figure 16 Démarche adoptée dans le cadre de cette recherche

Nous nous intéressons en particulier au rôle de l'information dans la gestion des flux de voyageurs lors de situations perturbées, nous plaçant ainsi dans une approche voisine de celle de D. Bayart (approche exploitant) pour qui l'information des voyageurs est « *une activité qui vise entre autres à gérer la foule* » (Bayart,1995). L'information des voyageurs ne se limite pas à transmettre des données sur la situation en cours mais constitue un outil pouvant participer à une bonne gestion des flux (approche « top-down »).

Mais cette foule est constituée d'individus présentant des caractéristiques variées (comportement, lieu de destination, connaissance du réseau...). L'information est donc également un moyen d'augmenter la rationalité des choix des voyageurs (approche voyageur « bottom-up »). Ainsi, au niveau des nœuds du réseau, l'information permet aux voyageurs de se réorienter ou d'optimiser leur temps disponible.

Notre travail se focalise sur les effets potentiels de l'information, liés aux changements de comportements induits des voyageurs, et notamment leur réorientation lors de situations perturbées grâce à des itinéraires de substitution. L'objectif d'augmentation de la fréquentation des transports collectifs rend d'autant plus importante une bonne gestion des flux, en particulier lors de situations perturbées.

De nombreux travaux de recherches portent sur les choix faits avant le déplacement (mode, heure de départ, itinéraire...) mais peu d'entre eux portent sur les choix au cours de la séquence de déplacement¹. Or, le développement des technologies contribuant à une meilleure diffusion de l'information a pour conséquence la nécessité de mieux connaître leurs effets.

Certaines études et recherches traitent de la manière dont les voyageurs perçoivent l'information et préconisent des solutions afin de disposer d'un système d'informations performant en différentes situations : (Borzeix, 1995), (Begag et Claisse, 1989), (Boullier et alii, 2004), (Harzo et alii, 2001), etc.

Il existe de nombreux supports de diffusion de l'information, de plus en plus variés en raison du développement des nouvelles technologies et de leur application au domaine des transports (Systèmes de Transports Intelligents). Dans la mesure où cette thèse s'inscrit dans le champ de l'Aménagement de l'Espace et Urbanisme, nous étudions plus ici les effets spatiaux et temporels potentiels de l'information que les aspects cognitifs liés à la perception, l'interprétation, l'ergonomie (fortement dépendants du mode de diffusion).

Nous ne traitons pas la régulation par l'offre (adaptation du Plan de Transport, mise en place de dessertes routières de substitution...). Néanmoins, les mesures des conséquences liées à une perturbation donnent quelques indications sur l'ampleur des modifications à effectuer en matière d'offre de transport, afin d'assurer un service performant aux voyageurs.

¹ On pourrait à ce sujet plus parler de mouvement que de déplacement en suivant les remarques de G. Amar notamment en raison du fait que nous considérons l'espace de transport comme un espace urbain, avec des réorientations possibles en fonction des dysfonctionnements et de l'information utilisée. Les flux de voyageurs sont liés à des mouvements au sein de l'espace de transport (Amar, 1999).

Au-delà de la question spécifique de recherche évoquée, il est possible de s'interroger sur les liens entre les choix faits en matière de transport à travers des politiques d'Aménagement (maillage, cadencement...) et la performance adaptative des réseaux.

Il est ainsi possible de dépasser les analyses effectuées sur l'offre théorique en matière de transport (classique en Aménagement) en intégrant quelques caractéristiques de son fonctionnement (et ses dysfonctionnements).

Par exemple, les interfaces du réseau ont à la fois une dimension fonctionnelle et territoriale. Des choix territoriaux (ex : volonté de promouvoir une accessibilité équitable) ont des conséquences au niveau fonctionnel (gestion des flux, réorientations ...). La volonté actuelle de développer des pôles d'échanges (dans une perspective d'intermodalité) a nécessairement des conséquences sur les réorientations des voyageurs lors de situations perturbées car ces lieux, au croisement de plusieurs lignes de transport, sont susceptibles de faciliter les réorientations sur des itinéraires de substitution.

L'*encadré 2* présente les hypothèses définies afin de structurer nos questionnements. Celles-ci ne doivent pas être considérées comme des affirmations où une réponse binaire de confirmation ou infirmation est attendue. Il s'agit plus de mesurer, d'évaluer à travers des indicateurs, des éléments se rapportant à celles-ci. Elles se situent dans les champs de la vulnérabilité structurelle et fonctionnelle.

Les hypothèses

➤ Champ de la vulnérabilité structurelle :

H1. Une augmentation du maillage permet de diminuer la vulnérabilité structurelle à des perturbations.

H2. Les conséquences des perturbations varient fortement en fonction de la situation des nœuds du réseau : localisation par rapport à la perturbation, nombre de lignes les desservant.

H3. Les conséquences structurelles des perturbations varient dans le temps.

H4. Les conséquences d'un mouvement social sont très variables en fonction des ressources disponibles, des priorités de circulation retenues.

➤ Champ de la vulnérabilité fonctionnelle :

H5. Les conséquences de la diffusion d'information aux voyageurs sont fortement liées au maillage et à la structure horaire des axes constitutifs du réseau.

H6. L'information des voyageurs leur permet d'optimiser leurs trajets grâce à une connaissance des dysfonctionnements du réseau et une adaptation de leur comportement.

H7. Les problèmes de capacité des itinéraires de substitution peuvent fortement diminuer le rôle de la diffusion d'information, voire annuler les effets positifs.

encadré 2 Hypothèses à discuter

Nous abordons les questions de capacité uniquement au niveau de la vulnérabilité fonctionnelle. Il serait possible de les intégrer au niveau structurel en mesurant par exemple les diminutions de capacité du réseau. Mais seules les caractéristiques temporelles sont prises en compte ici au niveau des mesures de vulnérabilité structurelle.

Les questionnements relatifs aux hypothèses H5, H6 et H7 abordent la problématique de la compatibilité des finalités des voyageurs et des exploitants. L'hypothèse H7 intègre les contraintes de capacité.

Méthode

Nous avons déterminé les questionnements scientifiques de ce travail de thèse en l'inscrivant dans des problématiques plus générales. Il serait possible de traiter ces questions de diverses manières, selon les disciplines mobilisées, la place donnée aux éléments d'ordre qualitatif ou quantitatif notamment.

Modélisation

Nous faisons le choix explicite de privilégier les éléments d'ordre quantitatif.

Comment mesurer la vulnérabilité du système de transport ? Plus spécifiquement, comment mesurer les effets de l'information diffusée lors de situations perturbées et évaluer les liens entre l'offre de transport et les possibilités de régulation grâce à l'information des voyageurs ?

Quantifier le rôle de l'information (à travers les temps de parcours) est fondamental car l'information est généralement abordée à travers ses aspects qualitatifs dans le service proposé (ex : confort du voyageur, image du transporteur) alors que des réorientations facilitées des voyageurs peuvent avoir des influences non négligeables sur les temps de parcours (critère quantitatif).

C'est pourquoi nous choisissons de procéder à une modélisation afin d'effectuer des calculs et simulations.

Nous modélisons le système de transport par un graphe temporel (afin de traiter des lignes de transports en commun avec horaires), mobilisant ainsi la théorie des graphes. L'élaboration ou l'adaptation de divers algorithmes nous permet ensuite de travailler sur ce graphe. Nous prenons en compte ou non les voyageurs sur le réseau, notre analyse se situant à la fois dans le champ de la vulnérabilité structurelle et fonctionnelle.

Dans le second cas, il conviendrait bien évidemment de prendre en considération les perceptions et les caractéristiques comportementales des personnes face aux informations diffusées. Celles-ci varient d'un individu à l'autre. Néanmoins, nous développons peu cet aspect car il est tout d'abord préférable de bien comprendre comment les paramètres interagissent dans le modèle.

Mais afin de pouvoir à terme tenir compte de ces variétés de comportements, le choix est fait de se baser sur un système multi-agents où chaque agent informatique représente un individu, défini par un certain nombre de caractéristiques.

Trois champs théoriques principaux sont mobilisés pour la réalisation du modèle PERTURB :

- la théorie des systèmes qui fournit les clés méthodologiques facilitant l'identification des éléments importants du système et les relations internes et externes à celui-ci (niveau = système de transport) ;
- la théorie des graphes pour modéliser le réseau de transport (niveau = offre de transport) ;
- Les systèmes multi-agents, afin de représenter les voyageurs par des agents possédant diverses caractéristiques et règles de comportement (niveau = individu dans le système de transport).

Après avoir modélisé le système de transport (grâce à des hypothèses de travail), il nous est possible d'effectuer des simulations en faisant varier plusieurs paramètres :

- 1-l'offre de transport (initiale et liée à des dysfonctionnements du système) ;
- 2-les caractéristiques des agents (origine, destination, heure de départ...) ;
- 3-l'information diffusée (sur le plan spatial et temporel)...

...dans le but de produire des indicateurs de vulnérabilité permettant de mieux appréhender le phénomène et d'être en mesure par la suite de discuter les hypothèses et d'effectuer des préconisations.

Notre approche, par des scénarii de perturbation, est basée sur une logique déductive¹. Il s'agit plus d'une démarche prospective (dégager un niveau de vulnérabilité a priori à partir de la connaissance des sources de danger, des entités menacées et des facteurs aggravant les enjeux) que d'une démarche factuelle (quantifier a posteriori les dommages enregistrés à la suite de la catastrophe). Elle aborde la mesure de la vulnérabilité d'un point de vue comparatif. L'approche est plus descriptive qu'explicative.

En pratique, l'analyse se fait toujours sur un nombre limité de simulations. Nous prenons en compte les aléas ayant comme conséquence une interruption du trafic sur des tronçons du réseau pendant une durée définie, quelle que soit la cause. En effet, c'est dans de telles situations que les itinéraires de contournement ont une utilité. Nous effectuons également un travail spécifique sur des programmes de grève.

Une grande attention est accordée aux caractéristiques de l'offre de transport (et en particulier le maillage) dans la régulation des situations perturbées grâce aux réorientations des voyageurs. L'utilisation de systèmes de transport théoriques a pour but de faire varier facilement les paramètres.

Le langage de programmation du modèle développé dans le cadre de cette thèse est le C++ pour que les calculs soient rapides. La visualisation des données de base ainsi que des résultats nécessite également la présence d'une interface accessible (développée ici en Visual

¹ Voir le chapitre IV consacré à la vulnérabilité.

Basic) pour que toute personne¹ puisse aisément utiliser le modèle réalisé et effectuer ses propres scénarii.

Terrain d'étude

Bien que le but de la démarche de modélisation soit de pouvoir effectuer des calculs et simulations sur tout type de système de transport, il est intéressant de tester notre approche sur un terrain d'étude déterminé. La principale caractéristique à prendre en compte est le maillage car nous accordons une place importante dans notre approche aux réorientations des voyageurs grâce à des itinéraires de substitution. Si le réseau est fortement maillé, les voyageurs peuvent modifier leur itinéraire et à un niveau plus global, une gestion des flux est facilitée.

Ainsi, nous travaillons sur la région Île-de-France qui offre des degrés de maillage variable. Cela nous est facilité par une intégration professionnelle, au cours de la thèse, à Transilien, Activité Île-de-France de la SNCF.

Nous travaillons par ailleurs sur des systèmes théoriques de transport afin de faire varier les paramètres d'entrée du modèle PERTURB et montrer l'adaptabilité de l'outil à différents cas.

Travail réalisé avec Transilien SNCF

Dans le cadre d'une intégration professionnelle progressive à Transilien depuis 2005, nous avons été amené à travailler sur divers projets d'information des voyageurs et à mieux comprendre le fonctionnement de la chaîne de l'information interne à l'entreprise, les liens avec les autres opérateurs et l'Autorité Organisatrice². Ceci a permis l'acquisition d'une connaissance pratique du domaine de l'information des voyageurs et la position d'une entreprise comme la SNCF sur ce sujet.

Associer la vision de l'aménageur (dans le cadre du Laboratoire du CESA) et celle de l'exploitant (SNCF) est cohérent avec la volonté d'étudier les répercussions des choix en matière d'Aménagement des transports sur l'exploitation et notamment sur la gestion des situations perturbées grâce à l'information des voyageurs.

Nous avons travaillé sur un projet portant notamment sur le calcul d'itinéraires de substitutions lors de situations perturbées (projet OGESPER : Outil de GEstion des Situations PERTurbées), à destination des agents chargés de l'information des voyageurs et alimentant différents médias. La recherche présentée ici est donc d'actualité car l'un des objectifs est d'évaluer le rôle potentiel de systèmes en développement, dont on pressent bien l'intérêt. Une démonstration de la version actuelle d'OGESPER est proposée sur le CD accompagnant ce document.

¹ Le terme « toute personne » doit être nuancé. Il est utile pour l'utilisation du modèle de comprendre la manière dont il est construit, les choix de conception...afin de l'utiliser à bon escient et ne pas faire d'interprétations abusives. Mais même pour le concepteur, il est très pratique de disposer d'une interface simple d'utilisation.

² STIF : Syndicat des Transports d'Île-de-France.

Le développement d'un modèle pour effectuer des calculs et simulations correspond au cœur de cette recherche car il permet de donner des éléments de réponse quantitatifs aux questions de recherche posées. La deuxième partie est ainsi consacrée à sa présentation : des champs théoriques mobilisés jusqu'à son implémentation informatique. Elle présente également la plate-forme de simulation mise en place, intégrant la génération de systèmes de transport théoriques et la visualisation des résultats.

**PARTIE II : DE LA
FORMALISATION DES
QUESTIONNEMENTS A DES
OUTILS INFORMATIQUES**

INTRODUCTION

Au cours de cette partie, nous formalisons tout d'abord nos questionnements en rapport avec la méthode retenue : la modélisation. Nous présentons les principes de modélisation et justifions le choix du développement d'un modèle spécifiquement dédié à nos interrogations (chapitre I).

Ensuite, nous abordons les champs théoriques mobilisés : théorie des systèmes, théorie des graphes et systèmes multi-agents (chapitre II). Ce choix est lié aux travaux développés au sein du Laboratoire, notre recherche se positionnant dans la continuité de ceux-ci. La présentation est orientée en fonction de nos questionnements.

Le troisième chapitre est consacré au modèle PERTURB, développé pour fournir des éléments de réponse à nos interrogations. Il contient 5 modules pouvant être utilisés pour des mesures de vulnérabilité (structurelle ou fonctionnelle). Il convient d'explicitier les principes sur lesquels il a été construit afin d'être en mesure de bien interpréter les résultats par la suite.

Enfin, le quatrième et dernier chapitre a pour but de présenter la plate-forme de simulation, permettant de générer des systèmes de transports collectifs théoriques et de faire varier facilement les paramètres relatifs à l'offre et à la demande de transport. La plate-forme inclut également PERTURB et un module de visualisation dynamique des résultats.

Cette partie pose les bases conceptuelles et les outils développés pour effectuer des calculs et simulations et mesurer ainsi la vulnérabilité.

CHAPITRE I APPROCHE DU PROBLEME DE MODELISATION

Introduction

Des modèles sont communément utilisés dans le domaine de l'Aménagement et plus spécifiquement dans le secteur des transports. Ils ont une vocation d'aide à la décision : *« mobilisée par les autorités organisatrices de transport, la fonction de l'aménageur consiste à développer des infrastructures pour faire face aux besoins de mobilité des personnes, surtout aux heures de pointe. Cette profession s'est dotée très tôt d'outils de prévision de la demande, fondés essentiellement sur les principes de l'économie néoclassique »* (Thévenin, 2002). Ces outils sont pour la plupart basés sur des modèles agrégés fonctionnant selon une logique gravitaire pour les interactions entre nœuds du réseau (principe des modèles à 4 étapes : génération, distribution, choix modal, affectation). Mais des modèles désagrégés se développent de plus en plus.

Le but de notre modélisation est de faciliter la production de mesures utiles pour discuter les hypothèses définies en lien avec notre problématique (évaluation de la vulnérabilité des transports collectifs) et notre questionnement spécifique sur le rôle de l'information en situation perturbée. La section 1 commence par une formalisation de ce questionnement spécifique. La deuxième section aborde les problématiques générales autour de la modélisation et de la simulation de phénomènes. Enfin, la troisième section est consacrée à des applications proches de notre problématique.

Nous nous concentrons dans ce chapitre sur les aspects les plus exploratoires de cette recherche et sur nos questionnements spécifiques.

Section 1 - Formalisation du questionnement spécifique

Notre questionnement spécifique est relatif aux cheminements des voyageurs au sein du réseau et plus particulièrement à leurs réorientations lors de situations perturbées en fonction de l'information diffusée. Ces réorientations sont possibles si le maillage permet des redondances (partielles car les itinéraires de contournement sont en général moins performants que les itinéraires « théoriques »).

A un niveau global (niveau de l'exploitant), les réorientations sont susceptibles de faciliter une gestion des flux « par la demande », complémentaire à une régulation « par l'offre » (modification des dessertes, mise en place de moyens de substitution supplémentaires, etc.).

La notion de labyrinthe fournit un outil conceptuel intéressant pour la compréhension du phénomène, même s'il doit être manié avec précautions, en raison des images qui lui sont associées. En effet, le réseau de transports en commun peut être envisagé comme un labyrinthe spatio-temporel (L3T : trois dimensions de l'espace + le temps) dans lequel les voyageurs se déplacent (Lefèvre, 2001). Le labyrinthe introduit la notion de degré de transparence cognitive, fondamentale dans notre approche du réseau. L'information, si elle est diffusée à bon escient et dans ce but, augmente cette transparence et donc la rationalité des choix car le voyageur définit son itinéraire en fonction de l'information dont il dispose. Citons à ce sujet C. Lefèvre : « *un certain apprentissage de labyrinthes opaques, la disposition d'un plan, la présence d'un fléchage, rendent en quelque sorte, par l'information qu'ils apportent, les parois quelque peu « transparentes » en donnant à l'esprit une certaine conscience de ce qu'il y a au delà de la paroi opaque* » (Lefèvre, 2001).

Dans la mesure où cette thèse est liée à des applications de la théorie des graphes, la notion de labyrinthe fournit une bonne manière d'appréhender un réseau de transports en commun, modélisé par un graphe¹.

Un aspect important de notre travail consiste à prendre en compte les réorientations des voyageurs au sein même du trajet et à ne pas raisonner uniquement à partir de couples origine-destination (intégration des changements d'itinéraires au sein même du déplacement), ce qui revient à considérer les nœuds du réseau en tant que supports physiques décisionnels au sein d'un labyrinthe : « *ce monde virtuel maillé depuis ses origines, ce monde en réseaux est donc dans son essence un monde où la mobilité se trouve contrainte, obligée par des couloirs plus ou moins larges, plus ou moins « flexibles » (d'où l'aspect topologique du labyrinthe), avec des embranchements, des nœuds décisionnels² (d'autant plus fréquents que le maillage est plus resserré), obligeant de temps à autre à des choix avec un nombre d'alternatives limité* » (Lefèvre, 2001).

¹ Voir dans le chapitre II consacré aux champs théoriques mobilisés la section consacrée à la théorie des graphes.

² Pour être tout à fait précis, signalons tout de même que la décision (ex : réorientation) peut être prise avant d'arriver au nœud, même si c'est au niveau de celui-ci qu'elle se concrétise.

Les quelques citations suivantes mettent en évidence le fait que des auteurs ont déjà décrit le cheminement au sein du réseau de transports en commun, comme étant « labyrinthe » :

▪ « Cette dernière décennie, les sciences cognitives ont témoigné de l'essor de nouvelles démarches théoriques, qui élargissent la notion du sujet cognitif pour prendre en compte de nouveaux rapports entre cognition, perception, action et "outils". Nous pouvons citer les travaux sur la cognition située de Lave et Suchman, la cognition distribuée de Hutchins, la théorie des réseaux socio-techniques de Callon et Latour... **Notre analyse sur les comportements des voyageurs en train de réaliser un parcours et en quête d'informations pour s'orienter dans les dédales du réseau**¹ s'inspire de ces courants de pensée » (Boullier et alii, 2004).

▪ « Annonce aux voyageurs égarés : aucun labyrinthe fini n'est un piège ! Et contre toutes les croyances, sachez que pour en sortir, la règle d'or est de ne jamais parcourir deux fois un même couloir dans le même sens. Nous voici partiellement rassurés : la règle salutaire prescrit au voyageur de ne jamais tourner en rond : mais le conduit-elle au point désiré ? »².

▪ « Parce que « c'est le voyageur et sa myopie qui font le labyrinthe, et non pas l'architecte et ses perspectives »³, parce que la performance se mesure à l'aune des utilisateurs et de leurs usages, une entrée par les yeux des voyageurs, dans l'acte même de leur déplacement, dans la richesse et la diversité de leurs expériences était essentielle. En effet, le voyageur ne fait pas que regarder le monde : il se déplace, et c'est dans la confrontation avec les petits événements quotidiens, dans sa façon d'y réagir ou de les subir que se construit progressivement son évaluation » (Lévy, 1999a).

Dans un système de transports en commun, l'offre de transport est l'élément fondamental et le souhait du voyageur est avant tout de pouvoir rejoindre rapidement sa destination finale. **Nous raisonnons dans le cadre de cette recherche uniquement sur l'optimisation des temps de parcours et sur des trajets simples origine-destination. Chaque agent cherche à minimiser la durée de son trajet.**

Section 2 - Principes de la modélisation et de la simulation : applications à notre recherche

Les résultats de cette recherche sont fortement liés aux choix de modélisation. Celle-ci mobilise ici trois champs théoriques principaux : théorie des systèmes, théorie des graphes et systèmes multi-agents⁴. Ces derniers pourraient être complétés par d'autres méthodes par la suite. Tout travail de recherche est par définition tributaire des choix méthodologiques effectués, nécessaires afin de bien circonscrire le champ d'investigation.

¹ Mis en gras par nous.

² P. Rosentiehl, cité dans (Lévy et Lacoste, 1995).

³ Rosentiehl P. 1980. Les mots du labyrinthe. In *Cartes et figures de la terre*. Paris : Centre Georges Pompidou, p. 94-103.

⁴ Voir le chapitre suivant.

Le phénomène est simplifié¹ dans le but d'effectuer des simulations représentant la réalité et de donner des éléments de réponse à nos questionnements.

L'intérêt réside dans le fait de pouvoir simuler le fonctionnement de l'élément représenté pour le valider en effectuant des essais et des vérifications, sans subir les conséquences techniques et économiques d'une réalisation complète ou les dangers d'une expérimentation réelle (Desfray, 1996). Ceci est fondamental en raison de la dimension spatiale de notre approche. En effet, « *comme c'est le cas pour la plupart des sciences humaines, et quelques sciences de la matière, l'analyse spatiale peut difficilement s'appuyer sur des expériences, du type de celles des physiciens ou des biologistes* » (Durand-Dastès, 2001).

Avant de poursuivre, précisons que nous envisageons ici la modélisation comme une démarche aboutissant à la création d'un modèle et de données en entrée compatibles avec celui-ci². Il est ensuite possible d'utiliser le modèle en faisant intervenir plusieurs paramètres : réalisation de simulations.

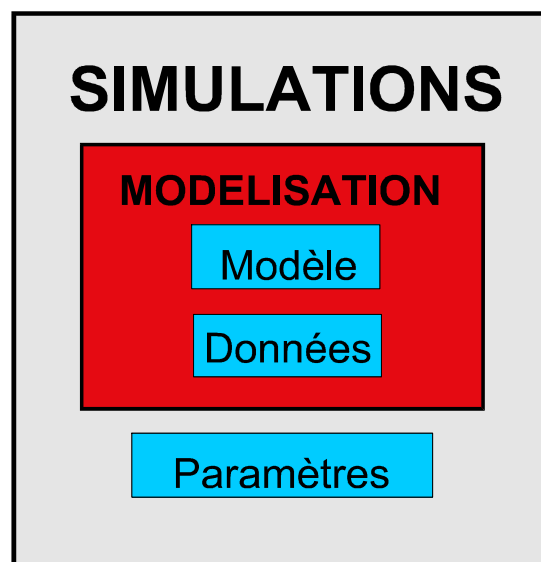


figure 17 Modélisation et simulations

Certaines applications de PERTURB correspondent plus à des calculs qu'à de véritables simulations. Il s'agit des mesures de vulnérabilité structurelle, uniquement basées sur l'offre de transport. Le terme simulation est véritablement approprié lorsque nous simulons le déplacement des véhicules, des individus, leurs réorientations, etc.

La simulation numérique (ou informatique) désigne un procédé selon lequel on exécute un programme informatique sur un ordinateur (ou plusieurs dans le cas d'une parallélisation) en vue de simuler un phénomène. Elle est une représentation du réel construite sur le modèle théorique sous-jacent.

¹ Voir dans le chapitre III les hypothèses de travail pour la construction du modèle.

² Nous intégrons ici les données dans la modélisation car de nombreux choix sont faits à ce niveau, notamment au niveau de leur précision, des tolérances d'erreur.

A- Une représentation abstraite

La modélisation peut être définie comme « *une représentation abstraite d'un élément (problème, phénomène, idée), nous permettant de raisonner sur cet élément, pour le comprendre, pouvoir le construire ou le mettre en œuvre* » (Desfray, 1996). Cette représentation intellectuelle est nécessairement simplifiée car la complexité du modèle doit demeurer inférieure à la réalité, afin qu'il puisse être opérationnel. Dans cette perspective, le modèle constitue l'outil définissant cette abstraction du monde réel, le représentant sans qu'il coïncide totalement avec celui-ci.

Cette représentation fait appel à un langage dont le niveau d'abstraction est plus ou moins élevé selon la nature du modèle : physique, iconique, mathématique, informatique. Comme nous l'avons indiqué, le choix est fait dans ce travail de recherche de privilégier une modélisation faisant appel au langage informatique. Cette approche est particulièrement adaptée à l'étude de phénomènes spatialisés et en particulier lorsque l'on raisonne sur des individus.

L'outil informatique est à la fois utilisé pour construire le modèle (programmation) et le faire fonctionner (simulations). Des allers-retours et des enrichissements du modèle sont possibles au fur et à mesure de son utilisation. La démarche est à la fois interactive et itérative. Par ailleurs, la construction du modèle structure la réflexion et peut donc l'influencer, au-delà des questionnements soulevés suite à son utilisation.

B- Une approche nécessairement pluridisciplinaire

Modéliser implique l'adoption d'une approche pluridisciplinaire. Selon L. Sanders, « *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). Ceci est particulièrement vrai dans le domaine de l'Aménagement-Urbanisme.

C- Etapes de la modélisation

L'utilisation de modèles offre la possibilité d'utiliser des méthodes hypothético-déductives, fonctionnant selon un processus classique (Durand-Dastès, 2001) :

- l'observation de la réalité, les comparaisons et les analogies, combinées à des raisonnements logiques *a priori*, permettent de formuler des hypothèses quant au fonctionnement d'une réalité géographique ;
- cet ensemble d'hypothèses¹ peut alors être formalisé dans un modèle, dont l'élaboration est le premier temps proprement déductif ;
- le modèle est ensuite utilisé pour mettre en œuvre des simulations qui constituent un deuxième temps de la déduction. Ces simulations peuvent incorporer des données plus

¹ A ne pas confondre avec les 7 hypothèses que nous les avons définies plus haut. Il s'agit plus ici de ce que nous appellerons hypothèses de travail pour la réalisation du modèle.

ou moins largement issues d'observations ; elles aboutissent à des résultats concrets, qui expriment alors ce à quoi pourrait ressembler la réalité si elle fonctionnait conformément aux hypothèses de base du modèle ;

- la confrontation de ces résultats de la simulation avec des observations empiriques permet de tester la validité de ces hypothèses : un degré jugé « suffisant » de ressemblance entre simulation et observation peut être considéré comme une confirmation, avec un degré de probabilité qui dépend largement des critères d'appréciation de la significativité de l'ajustement entre simulation et réalité ;
- la même confrontation met, généralement, en évidence des écarts entre la simulation et l'observation, nécessitant des ajustements du modèle.

Chacune de ces étapes est plus ou moins développée en fonction des objectifs du modélisateur. Malgré les ajustements, des écarts persistent toujours, lesquels peuvent être considérés comme incompressibles dans le cadre où l'on s'est placé. Ces résidus finaux ont une importance réelle : *« ces résidus de l'explication théorique sont en quelque sorte, par soustraction, l'exacte reconnaissance de nos particularismes locaux, de nos identités territoriales, de nos contextes d'actions particuliers. Qu'il est donc heureux, finalement, que tout cela ne marche pas si bien ! »* (Larribe, 1999). Le terme « résidus » est surtout utilisé pour les modèles agrégés.

D- Différents types de modélisation

Différents types de modélisation sont utilisés, en fonction des applications souhaitées. En effet, *« si les chercheurs de différents domaines peuvent s'accorder sur une définition relativement générale de la notion de « modèle » comme « représentation simplifiée de la réalité en vue de la comprendre et de la faire comprendre », le référent diffère considérablement suivant les disciplines »* (Sanders, 2001).

Un modèle peut avoir une vocation descriptive, explicative, prospective, exploratoire, ou encore heuristique. Il est possible de combiner ces approches au cours d'une même modélisation. F. Durand-Dastès propose également une grille de classification des modèles fonctionnant de manière binaire : agrégé/désagrégé, statique/dynamique, déterministe/probabiliste (Durand-Dastès, 2001). Nous y ajoutons la distinction continu/discret. Néanmoins, *« les frontières entre ces approches ne sont pas toujours nettes et dépendent davantage de la façon dont le chercheur met en place son dispositif méthodologique que des méthodes elles-mêmes »* (Sanders, 2001). Il est souvent davantage question de gradation que d'opposition rigoureuse.

Par ailleurs, on peut distinguer les modèles selon leur application : stratégique ou tactique. Au niveau stratégique, les décideurs ont besoin d'outils de prévisions de la demande et des comportements afin par exemple d'analyser les conséquences de modifications importantes de l'offre de transport. Le but recherché étant l'adéquation entre l'offre et la demande, que ce soit pour le long, le moyen ou le court terme (Bhourri et Scemama, 2002). Au niveau tactique, il s'agit davantage de considérations à court terme : *« les modèles de simulation de trafic ont pour but de reproduire le plus fidèlement possible des situations que l'on ne peut pas tester en*

temps réel. Que ce soit parce que leur application en temps réel est trop coûteuse, trop risquée ou tout simplement non réalisable. Ces modèles permettent de tester les réponses des systèmes à certaines modifications que l'on souhaite introduire, telles que des opérations de régulation ou de guidage » (Bhourri et Scemama, 2002).

E- Positionnement de notre modèle

1 - Vocation

Notre modèle a pour but de mieux comprendre un phénomène en utilisant des outils conceptuels relativement récents (systèmes multi-agents). En cela, il est de nature exploratoire. Sa vocation principale est descriptive. Il s'agit plus d'un outil d'aide à la compréhension que d'aide à la décision même si les deux aspects sont étroitement liés. Il a également une dimension prospective puisqu'il est par exemple possible de mesurer certaines conséquences de modifications de l'offre de transport.

2 - Dimension stratégique ou tactique

Le modèle se situe au niveau stratégique. Il s'agit avant tout d'étudier le fonctionnement d'un système de transport (possédant différents paramètres au niveau de l'offre et de la demande) lors de situations perturbées. Nous pouvons également apporter des éléments sur les conséquences de modification de l'offre (ex : ajout d'une nouvelle ligne).

3 - Niveaux d'observation

Tout modèle est intimement lié au niveau d'observation. Quel est le niveau d'observation pertinent dans notre approche ? Nous répondrons à cette question en insistant sur la nécessité d'une observation multi-niveaux du phénomène : *« dans un certain nombre de cas, il ne s'agit pas d'opérer un choix mais, au contraire, d'utiliser simultanément plusieurs niveaux dans une perspective heuristique. Ainsi le sens même à la fois des attributs et des questions posées peut varier lorsque l'on parcourt les différents niveaux de l'échelle géographique »* (Sanders, 2001). Ainsi, nous devons être en mesure de produire des indicateurs correspondant à différents niveaux d'observation : réseau, lignes, liens, nœuds, agent(s), véhicules.

4 - Niveau macro ou microscopique ?

On observe parfois une opposition entre les modélisateurs préconisant une approche macroscopique d'un phénomène et ceux dont les travaux reposent plus sur des expériences de microsimulation. Cette deuxième voie est plus récente en modélisation des transports et son essor est facilité par l'augmentation de la puissance de calcul des ordinateurs. D'un point de vue méthodologique, le terme le plus souvent utilisé pour désigner les formalisations développées au niveau des entités élémentaires est « individu-centré ».

Le choix à effectuer est très important, notamment lorsque le phénomène étudié s'inscrit dans l'espace. Faut-il simuler directement les entités concernées (les individus dans notre cas) ou

privilégier une approche plus mésoscopique ou macroscopique en considérant des agrégats d'individus ?

La réponse dépend bien évidemment des objectifs du modélisateur et du phénomène considéré. Dans notre cas, un argument de poids plaide en faveur d'une orientation vers une démarche de micro-simulation : chaque individu présente des caractéristiques propres : comportement, lieu de départ et d'arrivée, traitement de l'information, etc. De plus, dans la mesure où les voyageurs sont susceptibles de se réorienter, il est impossible de raisonner uniquement à un niveau macroscopique sur la base d'émetteurs et d'attracteurs de flux.

Chaque trajectoire (individu) s'inscrit dans l'espace et le temps, est potentiellement unique et participe à sa manière à la plus ou moins bonne circulation des flux (niveau global) sur le réseau. Nous cherchons notamment à identifier les conséquences à une échelle plus globale de la multiplicité des changements de trajectoires possibles grâce à une information diffusée de manière réactive et pertinente, avec notamment la proposition d'itinéraires de substitution. Ceci nous conduit à évoquer la notion d'émergence : « *une hypothèse fondamentale relevant du cadre théorique des systèmes complexes est que le jeu des interactions entre les entités d'un niveau inférieur se traduit par l'émergence et le maintien de formes ayant du sens à un niveau supérieur* » (Holm, 2001).

Dans notre cas, le choix de l'individu comme niveau de base de la modélisation est donc à peine à discuter. Il découle très naturellement des décisions se prenant à ce niveau¹.

5 - Modèle déterministe ou probabiliste ?

Traduit en termes de modélisation, le principe déterministe suppose qu'à partir des variables, des règles et des relations du modèle, nous pouvons déduire une seule situation résultante, entièrement régie par ces variables, ces règles et ces relations. La complexité du réel échappe parfois aux modèles déterministes et il est nécessaire d'introduire des éléments aléatoires, opération qui revêt des formes assez différentes (Durand-Dastès, 2001). Ainsi, l'introduction de la dimension individuelle dans les modèles (ce qui est notre cas) implique presque obligatoirement le recours à la notion de probabilité.

Néanmoins, notre modèle est de nature déterministe car nous considérons qu'il est tout d'abord préférable de bien comprendre les liens entre les paramètres. Ceci n'exclut toutefois nullement d'intégrer ensuite des composantes probabilistes. Des paramètres identiques conduisent pour le moment aux mêmes résultats en sortie du modèle.

6 - Modèle discret ou continu ?

Le modèle est discret : le système est soumis à une succession d'évènements qui le modifient. Le pas de temps est la minute.

¹ Dans le cas d'une étude sur le logement, cela serait plus délicat, le ménage pouvant constituer le « micro-objet » de base du système.

F- Limites inhérentes à cette approche

Nos choix méthodologiques sont à l'origine de limites au travail effectué. Nous devons les souligner dans la mesure où l'analyse des résultats doit nécessairement être nuancée.

Toute modélisation implique des simplifications de la réalité, lesquelles peuvent avoir des répercussions non négligeables sur la qualité des résultats obtenus. C'est pourquoi nous présentons (voir chapitre III) les hypothèses de travail retenues afin que le lecteur puisse comprendre le fonctionnement du modèle et les liens existants entre les variables.

Nous ne nous fixons par comme objectif une représentation totalement fidèle des phénomènes étudiés, qui sont éminemment compliqués (par le nombre d'éléments présents) et complexes (en raison de la densité des interactions). La pertinence se situe davantage au niveau de la possibilité de comprendre les liens entre les variables constitutives.

Nous rejoignons ici la réflexion de S. Larribe : « *nous savons bien que le modèle éclaire la réalité mais n'a surtout pas pour objectif de s'y substituer, nous savons bien que la mesure ne crée pas l'objet en le décrivant* » (Larribe, 1999). Ceci nous a conduit à ne pas produire certains résultats lorsque nous estimions que le degré d'erreur n'était pas maîtrisé et que les résultats produits auraient pu s'éloigner de façon trop importante de la réalité¹.

L'objectif est de constituer un modèle afin de discuter les sept hypothèses définies à la fin de la Partie I.

Section 3 - Applications proches de nos questionnements

Après avoir défini la problématique de recherche et formalisé nos questionnements, il convient de s'interroger sur l'opportunité de développer notre propre modèle : pourquoi ne pas réutiliser des applications existantes ?

De nombreux modèles ont été développés dans le domaine des transports et certains éléments de ces derniers seraient susceptibles d'être utiles dans notre approche. Cette section a ainsi pour ambition de présenter quelques applications, modèles, relativement proches dans leurs finalités à nos questionnements. Nous les avons classés selon leur thématique dominante. Ainsi, sont successivement abordés des modèles traitant :

- de la vulnérabilité des réseaux de transport,
- des parcours pédestres, des flux de voyageurs.

Cet exposé ne prétend aucunement à une quelconque exhaustivité, tant le foisonnement intellectuel en matière de modélisation des transports est important². Cette présentation positionne notre recherche dans le cadre de travaux déjà réalisés, afin de montrer ses apports spécifiques.

¹ Voir dans la troisième partie : aucune simulation avec prise en compte des contraintes de capacité n'a été effectuée sur notre terrain d'étude (Île-de-France).

² De plus, nous renvoyons aux textes originaux des auteurs des modèles présentés ici.

A- Analyse de la vulnérabilité¹

1 - Thèse de S. Bulteau²

Au cours de sa thèse de Doctorat, S. Bulteau développe une mesure de la vulnérabilité d'un réseau sur le plan topologique, de nature vectorielle, en considérant pour chaque entier i le nombre de coupes minimales composées exactement de i arêtes (une coupe correspond à un ensemble d'arêtes dont la suppression entraîne une déconnexion du graphe). Même si une mesure basée sur des critères de connexité peut sembler trop limitée, elle est utile dans le cadre de l'étude de réseaux de communication pour lesquels l'important est la réalisation des relations et non les chemins utilisés.

Selon lui, les méthodes basées sur la vulnérabilité peuvent traiter des problèmes où la fiabilité classique n'est plus adaptée. Elles permettent d'évaluer la capacité d'un réseau de communication à supporter l'éventuelle défaillance de certains de ses composants en l'absence de toute donnée statistique sur le comportement de ces derniers (cadre déterministe). Le réseau est modélisé par un graphe où seules les arêtes peuvent être défaillantes. Le problème est alors d'évaluer la « solidité » de la topologie, c'est-à-dire sa capacité à rester connexe après destruction ou défaillance d'arêtes. « *Intuitivement, un réseau est vulnérable s'il est facile de déconnecter deux nœuds s et t . C'est-à-dire si la défaillance de peu de composants entraîne la défaillance de tout chemin entre s et t* » (Bulteau, 1997).

La mesure de vulnérabilité proposée par S. Bulteau satisfait notamment plusieurs propriétés élémentaires :

- **la globalité** : la mesure est assez globale pour pouvoir distinguer deux réseaux possédant des caractéristiques très différentes et reconnaître quel est le plus vulnérable ;
- **l'ordre** : il est possible de comparer la vulnérabilité de deux topologies afin de pouvoir classer les graphes ;
- **la monotonie** : si on note $G+e$ le réseau obtenu en ajoutant l'arête e au réseau G et si $V(G)$ est la mesure de vulnérabilité considérée, on doit avoir $V(G+e) < V(G)$.

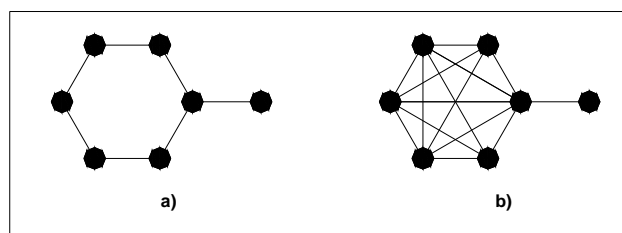


figure 18 Graphe test pour la propriété de globalité³

¹ Certains termes utilisés ici peuvent nécessiter une certaine connaissance de la théorie des graphes, dont certains concepts sont présentés au cours du chapitre suivant.

² BULTEAU Stéphane. 1997. *Etude topologique des réseaux de communication : fiabilité et vulnérabilité*. Thèse de Doctorat : Informatique : Université de Rennes 1.

³ Source : (Bulteau, 1997).

Sur la *figure 18*, même si les deux réseaux ont une « faiblesse » similaire au niveau d'une arête, d'après la propriété de monotonie, la mesure indique que le réseau b est moins vulnérable que le réseau a. La vulnérabilité est envisagée ici de manière globale car on peut remarquer que les deux réseaux présentent une faiblesse similaire sur une liaison.

La mesure de vulnérabilité proposée par S. Bulteau implique que la centralisation d'un réseau entraîne une augmentation de sa vulnérabilité car le nombre d'arcs est plus faible que dans le cadre d'un réseau fortement maillé.

2 - Thèse de J-F. Gleyze¹

Nous avons déjà évoqué la thèse de J-F. Gleyze portant sur la vulnérabilité structurelle des réseaux de transports². Le but de cette recherche est d'étudier les caractéristiques de la trame des réseaux pouvant expliquer leur vulnérabilité, à travers leurs potentialités relationnelles. Les résultats, obtenus grâce à la réalisation d'un outil informatique et sur la base d'indicateurs classiques en analyse des réseaux (accessibilité unipolaire, multipolaire³, nombre de chemins par arc et sommet), concernent ainsi plusieurs points :

- la définition de la vulnérabilité structurelle d'un réseau,
- l'évaluation de cette vulnérabilité à travers les pénalités temporelles induites par son endommagement localisé,
- la compréhension de cette vulnérabilité à travers des indicateurs qui évaluent le rôle joué par les composantes au sein du réseau en temps normal et qualifient la capacité des composantes à être facilement contournées ou à venir en aide aux autres composantes du réseau en cas d'endommagement.

L'utilisation du réseau par les voyageurs, les flux résultant ne sont pas pris en compte dans cette approche.

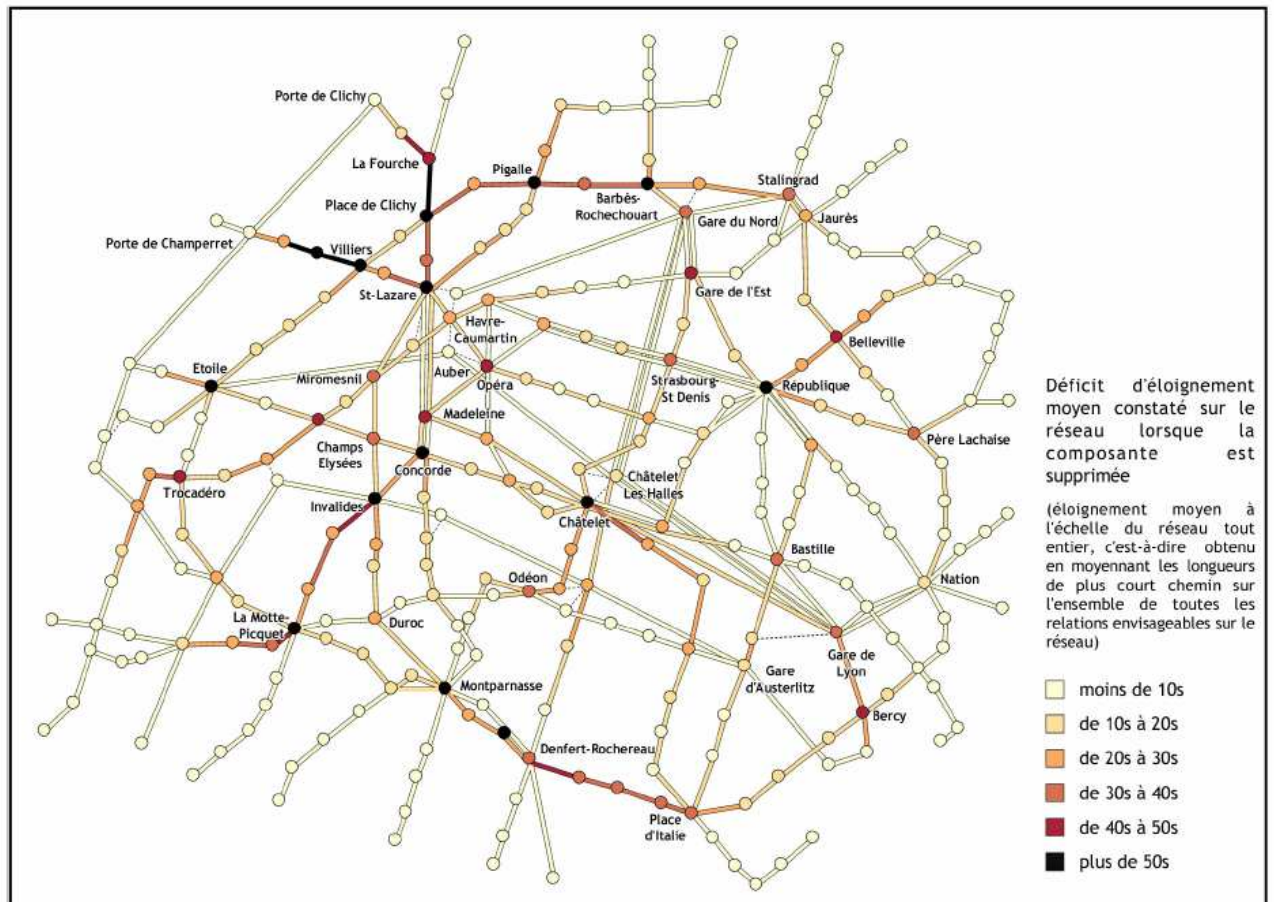
Nous présentons ici quelques exemples de résultats. Nous renvoyons également le lecteur à la thèse proprement dite pour les aspects les plus exploratoires de cette recherche concernant la caractérisation des facteurs de vulnérabilité structurelle d'un réseau de transport.

¹ GLEYZE Jean-François. 2005. *La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risques*. Thèse de Doctorat : Géographie : Université Paris 7, 539 p.

² Voir le chapitre IV de la première partie, consacré à la vulnérabilité des transports en commun.

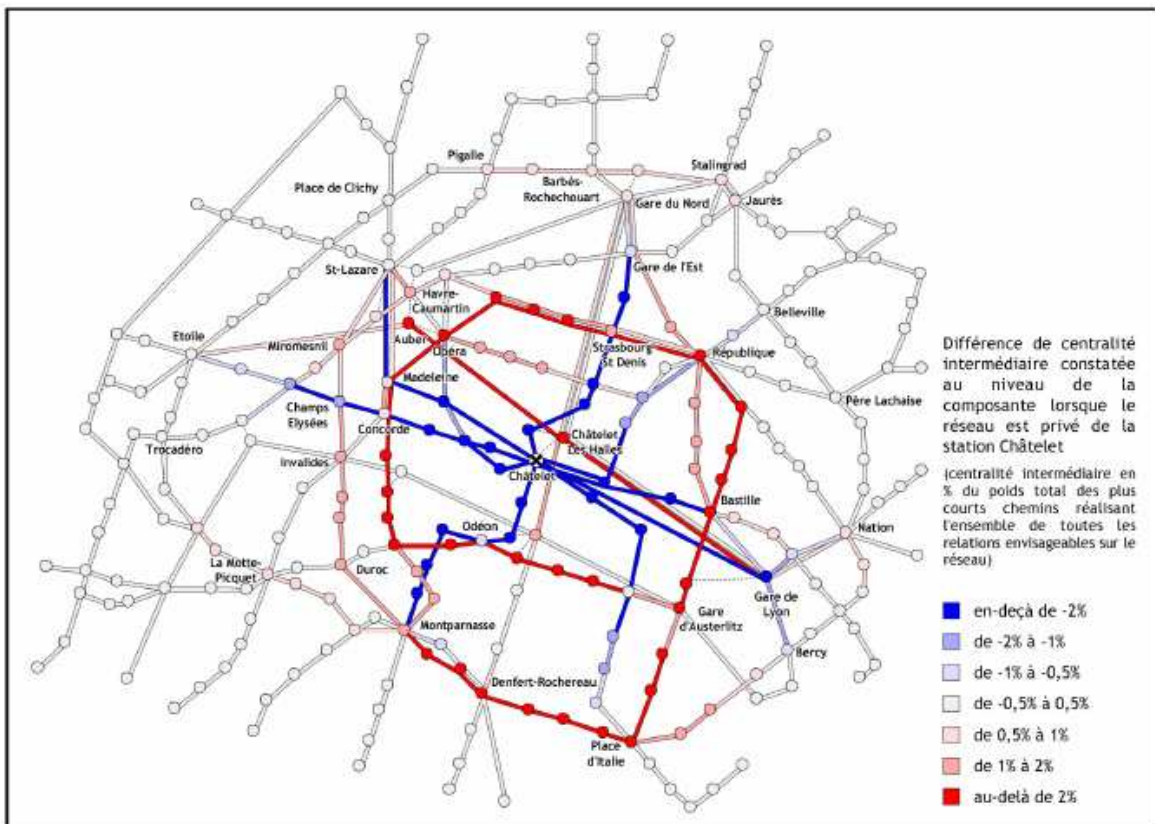
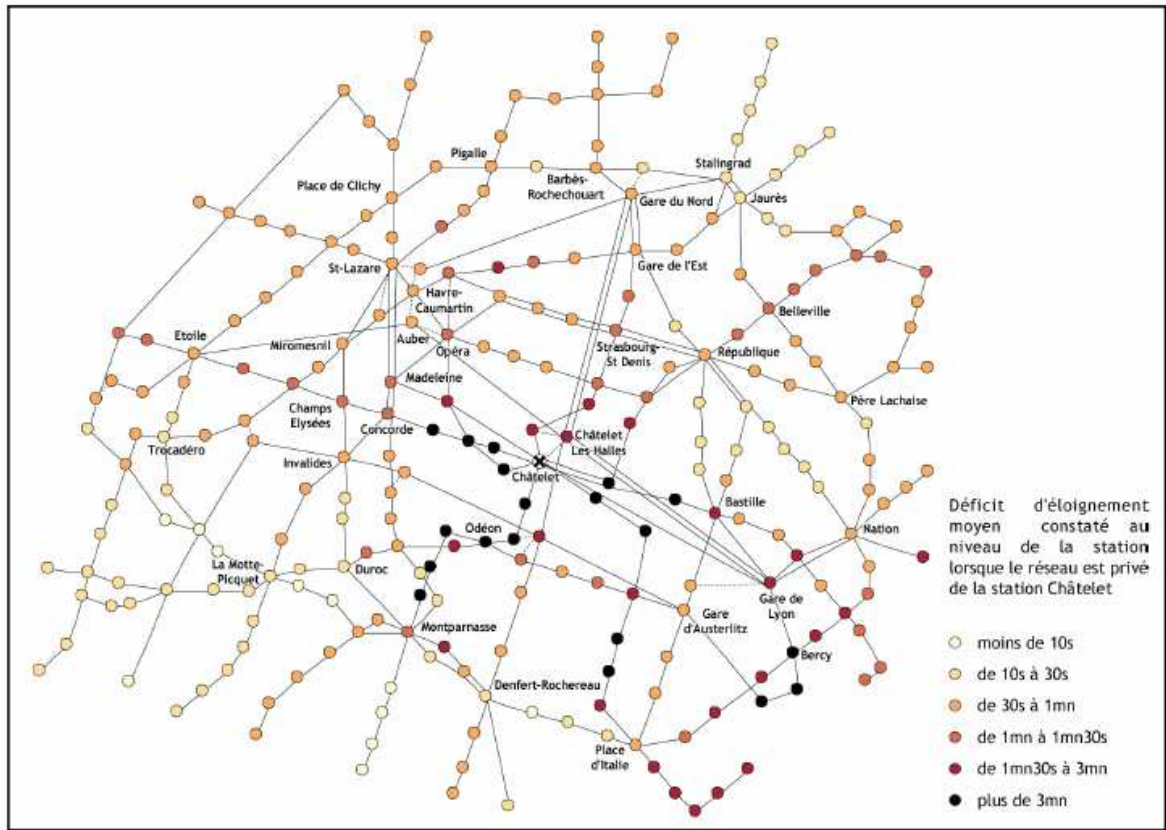
³ L'accessibilité unipolaire renvoie aux plus courts chemins : entre un sommet origine et chacun des autres sommets du graphe, ou entre chacun des différents sommets du graphe et un sommet destination donné. L'accessibilité multipolaire renvoie aux plus courts chemins entre tous les couples de sommets du graphe. Elle traduit le degré de centralité des sommets. Voir (Chapelon, 1997) pour un approfondissement théorique.

La *carte 1* montre les temps supplémentaires moyens (que J-F. Gleyze appelle « déficit d'éloignement moyen ») induits par la suppression de composantes (nœuds ou liens) du réseau. Il met ainsi en évidence les composantes dont la suppression entraîne les détours les plus importants. Les valeurs correspondent à des moyennes et sont donc faibles (lorsqu'une composante est supprimée, de nombreuses relations ne sont pas touchées).



carte 1 Vulnérabilité du réseau de métro parisien à la rupture individuelle de ses stations et de ses tronçons ferrés

Les cartes ci-dessous montrent les conséquences de la suppression de la station Châtelet : allongements des temps de parcours moyens (en haut) et reports des flux sur les nœuds et liens du réseau (que J-F. Gleyze nomme « reports de centralité intermédiaire »).



carte 2 Impact de la rupture de la station Châtelet : vulnérabilité des stations (partie supérieure) et reports de centralité intermédiaire (partie inférieure)

3 - Travaux menés au Laboratoire dans le cadre d'ESPON 1.2.1¹

Dans le cadre de l'observatoire ESPON (European Spatial Planning Observation Network), le Laboratoire du CESA était « Leadpartner » pour le Projet 1.2.1 : « Transport services and networks : territorial trends and basic supply on infrastructure for territorial cohesion »².

Dans ce cadre, des applications ont été réalisées dans le domaine de la vulnérabilité des transports, au niveau routier, en développant des outils informatiques utilisant des applications de la théorie des graphes. Le réseau de transport européen était modélisé par un graphe et une base des flux origine-destination avait été constituée pour les flux de marchandises. Par la prise en compte des flux, ces applications se situaient déjà dans le cadre de la vulnérabilité fonctionnelle, même si la modélisation effectuée n'était pas encore assez fine pour représenter fidèlement les flux (ex : jours et heures de déplacement, contraintes de capacité).

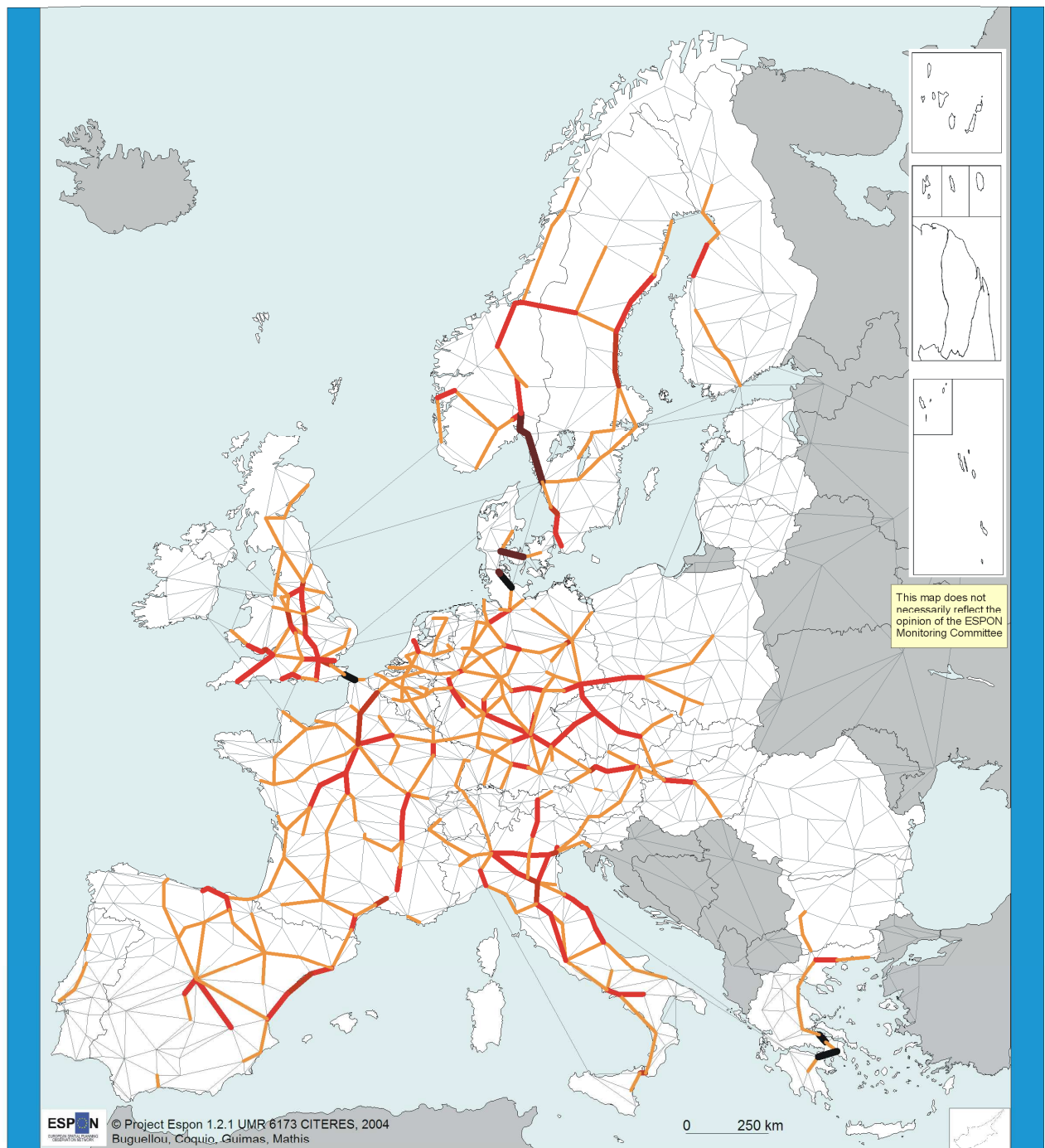
Les premières analyses ont consisté à évaluer le rôle de chaque nœud et liaison du réseau en mesurant les conséquences de leur suppression sur les flux de marchandises (fonction des flux et de l'importance des détours à réaliser). Le programme développé permettait de supprimer un à un tous les arcs ou sommets du graphe afin de calculer les temps.tonnes supplémentaires induits³.

¹ Voir (ESPON 1.2.1, 2004), rapport disponible en ligne (www.espon.lu).

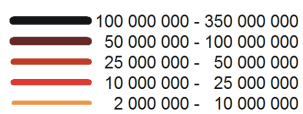
² Qui pourrait être traduit par : « Services de transport et réseaux : tendances territoriales et infrastructure de base pour la cohésion territoriale ».

³ Ce type de procédure avait déjà utilisée par L. Chapelon (Chapelon Laurent. 2001. Analyse de réseau par destruction / hiérarchisation des liens, Groupe de travail : « Dynamiques spatiales méditerranéennes et systèmes territoriaux émergents »).

Network road vulnerability for truck transportation (1)



Total report after the suppression of the edge :
(expressed in thousand of tons.minutes)

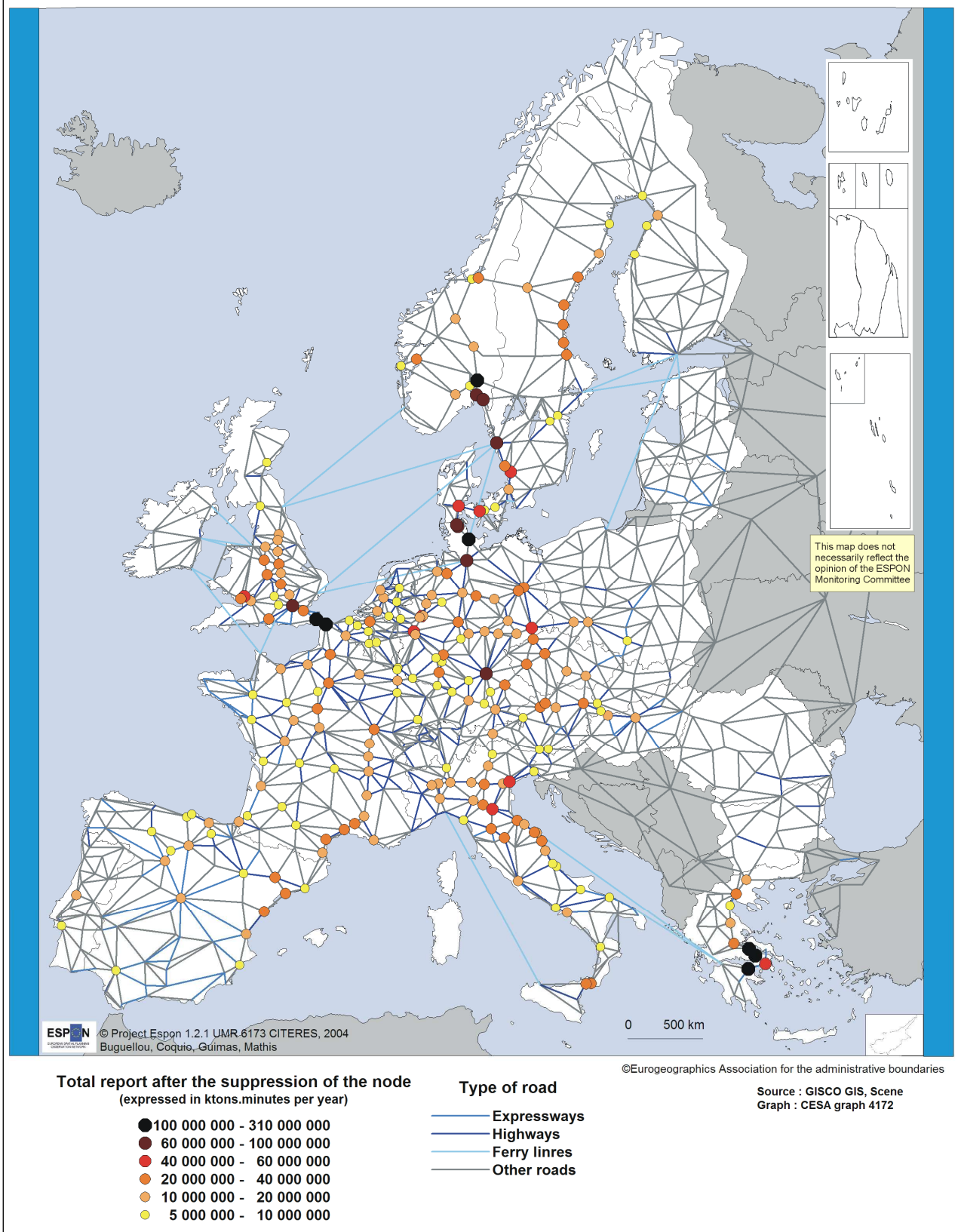


© Eurogeographics Association for the administrative boundaries

Source : GISCO GIS, Scene
Graph : CESA graph 765

carte 3 *Vulnérabilité du réseau routier pour le transport de marchandises :
suppression des arcs*

Network road vulnerability for truck transportation (2)



carte 4 *Vulnérabilité du réseau routier pour le transport de marchandises : suppression des nœuds*

4 - Thèse de F. Demoraes¹

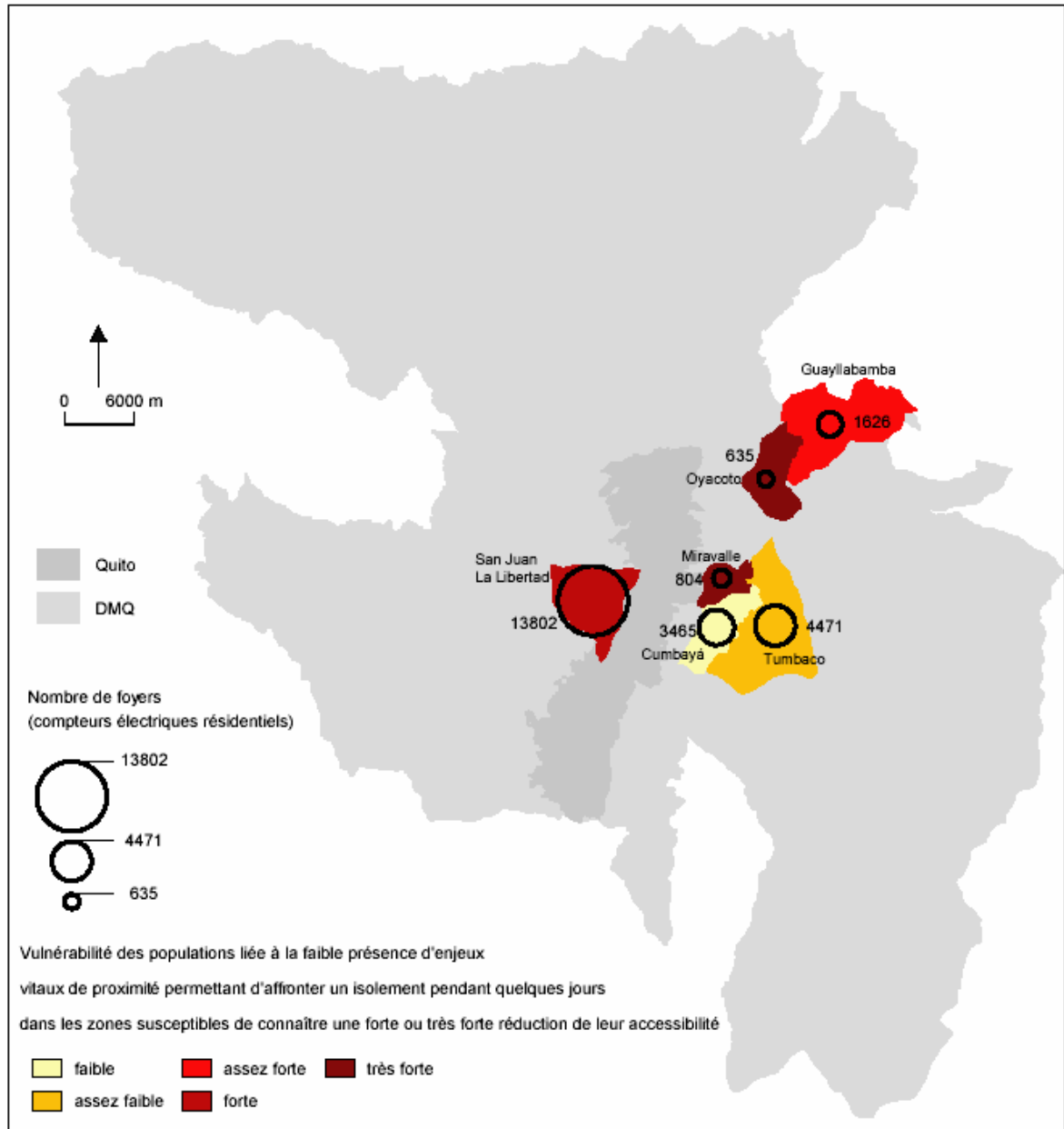
L'objectif de la thèse en géographie de F. Demoraes est de proposer une réflexion sur les risques encourus par le District Métropolitain de Quito (Equateur) à partir de la question de la mobilité des personnes et de ses vulnérabilités en partie attribuables aux aléas en présence (séisme, éruption volcanique, inondation...).

Cette recherche, basée sur les enjeux et utilisant des techniques issues des Systèmes d'Information Géographique, propose une base de réflexion aux acteurs urbains dans une perspective de planification préventive. Elle fournit des pistes pour la réduction des vulnérabilités et apporte des orientations pour la gestion de crise. Elle est également une réflexion conceptuelle sur l'articulation des thématiques de la mobilité et des risques à partir des concepts de vulnérabilité et d'accessibilité.

Elle n'est pas, contrairement à nous, focalisée uniquement sur les dysfonctionnements du système de transport (vulnérabilité interne) mais intègre les conséquences des perturbations sur le système urbain et les populations (vulnérabilité aval). Elle tient compte également de l'exposition aux aléas (vulnérabilité amont).

La *carte 5* montre par exemple des zones susceptibles de se trouver isolées et vulnérables car dépourvues d'enjeux de proximité vitaux.

¹ DEMORAES Florent. 2004. *Mobilité, enjeux et risques dans le District Métropolitain de Quito*. Thèse de Doctorat : Géographie, Université de Savoie, 351 p.



carte 5 *Vulnérabilités des populations compte tenu de la faible présence d'enjeux de proximité vitaux (eau, nourriture, soins, prise en charge des sinistrés) dans les zones susceptibles de se retrouver isolées¹*

Ces applications abordent la question de la vulnérabilité des réseaux de transport mais ne prennent pas en compte les horaires des véhicules, les lignes... et donc les spécificités des transports en commun. Elles sont surtout basées sur la trame du réseau. Il est par ailleurs important pour nous de prendre en compte les individus utilisant le réseau, l'information qui leur est diffusée afin de véritablement progresser dans le champ de la vulnérabilité fonctionnelle. Notre analyse intègre l'ensemble du système de transport (offre et demande).

¹ Source : (Demoraes, 2004).

B- Modèles de flux de piétons

1 - Modèles développés à l'Université de Delft¹

L'expérience présentée ici est issue du travail réalisé par une équipe de chercheurs de l'Université de Delft. Plusieurs modèles ont été réalisés dans le but d'aider les décideurs dans la conception des gares et la programmation des horaires. Nous présentons ici l'entre eux (Simped). Celui-ci permet de simuler la configuration des flux à l'intérieur de la gare, le niveau de confort ressenti par les voyageurs et de calculer les temps de transfert.

Il a la particularité de prendre en compte les caractéristiques spécifiques relatives à un déplacement dans une gare :

- les différentes activités des passagers : aller acheter un ticket, faire des courses dans les commerces situés dans la gare, etc.;
- la pression du temps : les passagers peuvent être très pressés par peur de rater leur train ou très relaxés dans le cas contraire ;
- la configuration des départs et arrivées de trains : elle détermine fortement les caractéristiques des flux (une zone vide peut rapidement se retrouver très animée après l'arrivée d'un train). Il est à signaler que le modèle peut simuler les retards des trains.

De plus, le modèle est sensible à :

- des variations dans l'architecture des lieux ;
- des véhicules différents, induisant des temps de sortie et d'entrée variables ;
- différents types de passagers (ex : touristes, travailleurs) possédant des comportements variables et devant effectuer divers trajets dans la gare.

Les interactions entre les passagers sont modélisées et le modèle prend également en compte la configuration générale des flux (niveau macroscopique). Les vitesses de marche à pied des piétons sont liées aux densités d'occupation de l'espace. Le modèle peut prendre en compte 100 000 personnes simultanément.

Il est possible de le coupler avec d'autres modules pour modéliser un pôle d'échanges.

¹ Source : (Daamen, Bovy et Hoogendoorn, 2001).

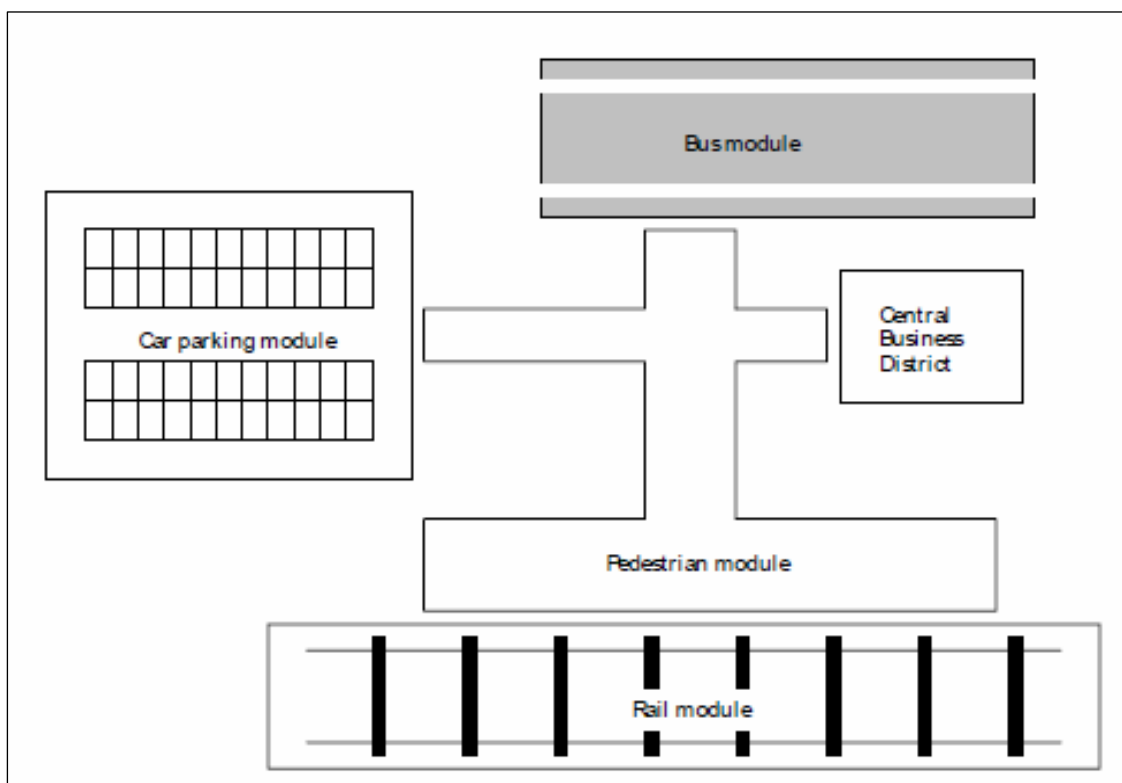


figure 19 Exemple de structure du modèle¹

2 - Modèles développés à l'Université de Rennes (équipe SIAMES)²

L'équipe SIAMES³ de l'Université de Rennes travaille sur des modèles de flux de piétons. En adéquation avec la théorie de Gibson⁴, ils informent l'environnement urbain en caractérisant les espaces d'évolution, en prenant en compte leur configuration et les objets qu'ils contiennent (Thomas, 2000). L'environnement contient alors les informations nécessaires aux prises de décision du piéton. Le modèle d'environnement urbain est alors adapté à la simulation de piétons ayant les activités suivantes :

- navigation : la planification d'itinéraire est guidée par des paramètres exprimant le « tempérament » du piéton : prudence, paresse et curiosité ;
- circulation : le mode de circulation du piéton dépend du lieu traversé (flâner dans un parc, suivre un trottoir, traverser sur un passage piéton). Les piétons prudents réalisent ces actions dans le respect de règles sociales et du code de la route ;
- évitement d'obstacles : les interactions entre acteurs sont fondées sur des règles sociales.

¹ Source : (Daamen, Bovy et Hoogendorn, 2001).

² Source : (Thomas, 2000).

³ Synthèse d'Images, Animation, Modélisation Et Simulation. Le nom de l'équipe-projet a maintenant changé : BUNRAKU.

⁴ Gibson James. 1986. *The ecological approach to visual perception*. Hillsdale (N.J) : L. Erlbaum, 332 p.

Ces deux modèles présentent l'avantage de simuler de manière très fine les piétons¹. Néanmoins, notre approche se place au niveau de l'ensemble du réseau et pas uniquement au niveau de la circulation des piétons au sein des lieux de transport.

La prise en compte de ces applications est utile dans notre approche. Néanmoins, aucune d'entre elles ne pourrait être utilisée pour répondre à nos questionnements car ces derniers sont spécifiques. Or, il est indispensable que la portée de nos questionnements ne soit pas limitée par les possibilités des outils, tout du moins dans une certaine mesure.

C'est pourquoi nous avons fait le choix de développer notre propre modèle, en utilisant toutefois certains des outils informatiques du Laboratoire du CESA ou issus de coopérations avec le Département Informatique de l'École Polytechnique Universitaire de Tours, et donc facilement accessibles. Ainsi, notre outil n'est pas réalisé ex-nihilo mais l'appropriation (entendue du point de vue de la compréhension), l'intégration d'outils existants et disponibles, permet de développer notre approche en conservant une souplesse pour des modifications éventuelles.

¹ On peut également citer la thèse de A. Piombini (Piombini Arnaud. 2006. *Modélisation des choix d'itinéraires en milieu urbain : approche géographique et paysagère*. Thèse de Doctorat : Géographie : Université de Franche-Comté, 299 p.)

Conclusion

Après avoir explicité notre questionnement spécifique grâce à la notion de labyrinthe, cette partie a tout d'abord consisté à présenter notre choix méthodologique majeur, à savoir la réalisation d'un modèle permettant d'effectuer des mesures de vulnérabilité structurelle et fonctionnelle d'un système de transports collectifs.

La modélisation fait appel au langage informatique, ce qui suppose la réalisation ou l'adaptation d'algorithmes pour établir des règles logiques de fonctionnement, susceptibles de se rapprocher de la réalité. Parmi les types de modélisation informatique possibles, l'utilisation d'un système multi-agents (micro-simulation avec règles de comportement) est particulièrement adaptée lorsque les voyageurs sont pris en compte (approche fonctionnelle).

En dépit de l'intérêt de cette approche, des limites subsistent et celles-ci ne doivent pas être oubliées tant dans l'utilisation du modèle que dans l'interprétation des résultats.

La démarche est multi-niveaux car le phénomène spatio-temporel simulé peut être envisagé à plusieurs échelles d'observation, tant sur le plan spatial que temporel.

Il convient d'ajouter à ceci la spécificité liée à l'introduction de l'espace comme composante essentielle du modèle qui nécessite la capacité de celui-ci à mettre en oeuvre un principe fondateur, celui de l'interaction spatiale, principe selon lequel « *tout ce qui se trouve ou se passe dans un lieu donné est en partie au moins déterminé par tout ce qui se passe ou se trouve dans un ensemble de lieux en relation avec le lieu considéré* » (Durand-Dastès, 2001).

La réalisation du modèle nécessite la mobilisation de plusieurs champs théoriques, lesquels sont présentés dans le chapitre suivant...

CHAPITRE II CHAMPS THEORIQUES

MOBILISES

Introduction

La démarche de modélisation nécessite l'utilisation de champs théoriques. Leur présentation est faite en fonction de nos objectifs et reste donc partielle et orientée, dans le but de ne pas alourdir le discours et de les intégrer au maximum dans la démonstration. Les concepts sont ainsi directement placés dans le cadre de notre recherche.

Tout d'abord, l'approche systémique (section 1) a pour but d'identifier les éléments des systèmes de transports en commun pertinents pour la modélisation. Est ensuite présentée la théorie des graphes, souvent utilisée dans le domaine des transports en raison de sa relative simplicité d'utilisation et des nombreuses applications possibles (section 2). Elle est complétée par une approche « multi-agents » (section 3) dans la mesure où les individus se déplaçant sur le réseau sont pris en compte.

Les questions liées aux aspects cognitifs de perception et de prise de décision ne sont pas abordées ici dans la mesure où cette recherche embrasse un champ d'investigation plus large. Nous avons été amenés (voir chapitre suivant) à définir des règles de comportement très simples, ce qui n'exclut pas la possibilité d'enrichir ensuite le modèle.

Nous progressons ainsi dans la démarche de modélisation et inscrivons celle-ci dans un ensemble de théories, fondamental pour tout travail scientifique.

Section 1 - Théorie des systèmes

Nous travaillons sur un système de transports en commun. Quels sont les éléments constitutifs de ce système importants dans notre approche ? Quelles sont les interactions au sein de celui-ci et avec l'extérieur ?

Une approche systémique facilite l'identification des éléments-clé et leurs relations¹ dans une perspective de modélisation². Nous avons déjà fait quelques références aux systèmes dans la première partie de ce document. L'approche systémique est utile pour appréhender des ensembles complexes. Nous présentons tout d'abord quelques concepts de la théorie des systèmes avant de l'appliquer aux transports collectifs.

A- Approche systémique

Le concept moderne de système date des années 1940. Il est notamment dû à l'apport de trois personnages principaux : L. von Bertalanffy, N. Wiener et C. Shannon. De manière générale, il fait référence à un assemblage d'éléments fonctionnant de manière unitaire et étant en interaction. Il peut être défini comme un « *complexe d'éléments en interaction* » (Bertalanffy, 1973) ou un « *ensemble d'éléments liés par un ensemble de relations. De telle sorte que toute modification d'un élément va entraîner une modification de certains autres* » (Lesourne, 1976).

1 - Concepts fondamentaux

Quatre concepts sont fondamentaux pour comprendre ce qu'est un système :

- L'interaction (ou l'interrelation) renvoie à l'idée d'une causalité non linéaire. Une forme particulière d'interaction est la rétroaction (ou feed-back dont l'étude est au centre des travaux de la cybernétique³).
- La totalité (ou la globalité). Si un système est d'abord un ensemble d'éléments, il ne s'y réduit pas : « *l'expression un peu ésotérique « un tout est plus que la somme de ses parties » signifie simplement que les caractéristiques constitutives ne peuvent s'expliquer à partir des caractéristiques des parties prises isolément. Les propriétés du complexe paraissent donc, par rapport à celles des éléments, comme nouvelles ou émergentes* » (Bertalanffy, 1973).

¹ Contrairement à la procédure analytique qui nécessite que « *les interactions entre les « parties » soient inexistantes ou assez faibles pour être négligées* » et que « *les relations qui décrivent le comportement des parties soient linéaires* » (Bertalanffy, 1973).

² Cette approche systémique est utile dans cette démarche de recherche mais elle est utile de manière générale lorsque l'on travaille sur les transports en commun, et plus généralement dans de nombreux domaines. Le CERTU préconise par exemple une approche système à tous les stades de vie d'un projet de transport collectif : recherche et développement, définition des objectifs, commande, réalisation, exploitation (CERTU, 2004).

³ Voir plus bas.

- L'organisation correspond à l'agencement d'une totalité en fonction de la répartition de ses éléments. De manière générale, la notion d'organisation recouvre un aspect structurel (comment est construit la totalité) et un aspect fonctionnel (ce que la structure lui permet de faire). Ceci est à rapprocher des notions de vulnérabilité structurelle et fonctionnelle introduites au chapitre IV de la Partie I.
- La complexité d'un système tient au moins à plusieurs facteurs : le degré élevé d'organisation, l'incertitude de son environnement, la difficulté, sinon l'impossibilité d'identifier tous les éléments et de comprendre toutes les relations en jeu.

2 - Description d'un système

Sous son aspect **structurel**, un système comprend plusieurs composants :

- les éléments constitutifs : on peut en évaluer le nombre et la nature (même approximativement) ;
- une limite (ou frontière) qui sépare la totalité des éléments de son environnement : cette limite est toujours plus ou moins perméable et constitue une interface avec le milieu extérieur ;
- des réseaux de relations : les éléments sont en effet interreliés ;
- des stocks (ou réservoirs) où sont entreposés les matériaux, l'énergie ou l'information constituant les ressources du système qui doivent être transmises ou réceptionnées.

Sous son aspect **fonctionnel**, un système est principalement composé :

- de flux de matériaux, d'énergie ou d'informations, qui empruntent les réseaux de relations et transitent par les stocks ;
- de centres de décision qui organisent les réseaux de relations, c'est-à-dire coordonnent les flux et gèrent les stocks ;
- de boucles de régulation.

On peut distinguer les systèmes ouverts et les systèmes fermés. Les systèmes ouverts ont des échanges avec leur environnement contrairement aux systèmes fermés.

Sur cette base, il est possible d'aborder le système de transports en commun à travers une approche systémique. Ceci implique nécessairement une simplification du réel.

B- Eléments constitutifs de l'offre de transport

M. Chesnais distingue quatre éléments en interaction directe au sein d'un système de transport : les **infrastructures**, les **véhicules**, les **agents commerciaux** et les **agents techniques** chargés de l'organisation du mouvement. Tous ces éléments sont « *soumis conjointement à une fonction de régulation qui traite l'information, tant de l'extérieur que de l'intérieur du système de transport, et ajuste les décisions* » (Chesnais, 1980). **Nous y ajoutons les voyageurs.**

Il est également possible, comme le fait H. Laichour (Laichour, 2002) de distinguer les configurations physiques et horaires du réseau. Au niveau physique, plusieurs éléments peuvent être mis en évidence :

- les nœuds du réseau, constituant des points d'arrêt des véhicules ;
- les liens entre ces nœuds, correspondant à des tronçons de lignes de transport en commun¹.

Pour la modélisation du système et donc l'identification des éléments constitutifs, nous pouvons également nous appuyer sur les propos de J-L. Le Moigne pour qui « *tout modèle systémique s'organise par la mise en correspondance d'un système opérant (SO) et d'un système de décision (SD) par l'intermédiaire d'un système d'information (SI)* » (Le Moigne, 1977). Il est ainsi possible de distinguer trois sous-systèmes au sein de notre système.

- Le **système opérant**, qui a la charge des opérations réelles, est tout d'abord composé des infrastructures nodales et linéaires constitutives du réseau : infrastructures ferroviaires, divers équipements dans les gares, voirie en milieu urbain, équipements divers aux points d'arrêt, équipements d'alimentation en énergie, etc. Les véhicules introduisent une dimension fonctionnelle. Ils sont techniquement adaptés à l'utilisation des réseaux et suivent certaines règles (ex : circulation routière, horaires de départ et d'arrivée, vitesse maximale, etc). Lorsque les véhicules ne sont pas utilisés, ils sont stockés dans des « réservoirs » correspondant à des parcs de stationnement. Le personnel d'exploitation et de maintenance fait également partie intégrante du système opérant. Celui-ci doit s'adapter en permanence pour répondre aux aléas de la demande, des ressources (ex : pannes matérielles) et de l'environnement (conditions météorologiques, conditions de circulation). Ceci est possible grâce aux systèmes de décision et d'information.
- Le **système de décision** coordonne le système par des actions de régulation². Les décisions se font par l'expérience antérieure mais également grâce aux informations disponibles sur la situation en cours. Il y a des adaptations par rapport à l'environnement et des anticipations sur des évolutions prévisibles.
- Le **système d'information** capitalise des données provenant du système opérant (ex : trafic à différents moments de la journée) pouvant ensuite être réutilisées par le système de décision (rôle de mémoire). Il joue également un rôle en temps réel en fournissant par exemple au système de décision des renseignements sur la situation des véhicules. Il effectue une fonction d'interface entre le système opérant et le système de décision : il transmet des « informations-représentations » au système de décision qui peut ensuite délivrer des « informations-décisions » au système opérant. Dans notre cas, un enjeu important est relatif aux informations diffusées aux voyageurs et échangées avec les autres opérateurs.

¹ Auxquelles on peut rajouter des arcs permanents, représentant par exemple des couloirs de correspondance.

² On peut ici inclure la régulation à long terme (voir dans le chapitre V de la Partie I).

Dans la mesure où plusieurs opérateurs co-existent (plusieurs SI, SD et SO), le système peut être qualifié de complexe (ou à décideurs multiples) selon la classification de J. Lesourne (Lesourne, 1976). Sa typologie distingue en effet 4 types de systèmes de complexité croissante :

- les systèmes à états (transformations entrées/sorties, sans régulation interne),
- les systèmes à buts (régulation interne intégrée, capacité d'atteindre des objectifs),
- les systèmes à apprentissage (incluant mémoire, mécanismes de calcul, capacité de prise de décision et d'adaptation en fonction des données enregistrées et de processus par essais et erreurs),
- les systèmes à décideurs multiples (structure complexe de plusieurs systèmes à buts, s'organisant de manière spontanée (jeux) ou de façon hiérarchique (organisations). Lorsque les hiérarchies sont enchevêtrées en un système encore plus large et complexe, on parle de sociétés).

Les systèmes de transports en commun urbains et interurbains, intégrés à ce système, peuvent être envisagés comme des sous-systèmes disposant chacun de leur système opérant, de décision et d'information et poursuivant chacun leurs propres buts (le principal d'entre eux étant la circulation des voyageurs dans de bonnes conditions).

C- Flux transitant au sein du système

La principale finalité de l'opérateur est de faire circuler des passagers¹ : les flux de voyageurs sont dus à des interactions existantes entre les nœuds du réseau, à une demande de mise en relation entre ceux-ci. Les voyageurs passent successivement des infrastructures nodales aux véhicules et réciproquement. Ils entrent et sortent du système grâce à des « portes », spécialement prévues à cet effet et situées au niveau des frontières entre le système et son environnement. Ces « portes » sont situées au niveau des points d'arrêt du réseau lesquels permettent les échanges entre le système et son environnement.

Cependant, les passagers ne sont pas passifs. Ils réagissent de diverses manières et participent par leurs comportements au plus ou moins bon fonctionnement du système. Les opérateurs n'ont « *pas pour vocation de transporter des objets mais des personnes, aux caractéristiques variées* » (Lévy, 1999a). Les passagers sont en interaction réciproque et en relation avec les éléments constitutifs de l'offre de transport. Ils peuvent aggraver un employé, dégrader un véhicule ou de manière plus positive renseigner un autre voyageur.

Ceci nous conduit à combiner cette approche systémique avec une approche « multi-agents » afin de prendre en compte le fait que les voyageurs constituent des éléments actifs du système, non subordonnés. Le système de décision considère les voyageurs globalement et sa finalité consiste à gérer les flux de manière globale, alors qu'individuellement, les voyageurs poursuivent leur propre finalité. Les deux peuvent a priori être antagonistes lorsque des problèmes de capacité apparaissent.

¹ « On peut imaginer un train circulant sans aucun passager. Néanmoins, sa vocation essentielle est d'en transporter. Un système de transport sans rien à transporter n'a pas de sens » (L'Hostis, 1997).

D'autres types de flux sont présents au sein du système : les flux de véhicules, d'informations et de décisions¹. Les flux de véhicules correspondent aux moyens de transport utilisés (bus, tramway, train, etc.). Les flux d'informations représentent les informations fournies aux voyageurs par le régulateur, les informations sur l'état de la circulation fournies par le SAE². Les flux de décisions représentent les décisions prises par le régulateur pour traiter d'éventuelles perturbations (Laichour, 2002).

D- Interfaces et frontières

L'accès des voyageurs au système de transport en commun est discontinu : il se fait en certains points, au niveau des infrastructures nodales. Les nœuds sont ainsi des interfaces et constituent une articulation entre le système et son environnement et une connexion interne au système (entre plusieurs modes de transport). Les nœuds présentent des caractéristiques différentes selon leur localisation (ex : centrale ou périphérique dans une agglomération), le volume des flux qu'ils traitent et les modes de transport connectés.

Toutefois, ces lieux particuliers ne correspondent qu'à une partie des frontières du système avec son environnement. En effet, « *les frontières sont partout sur le réseau, et avec elles, se multiplient les points de vulnérabilité du bien public pour les usagers et du plan de travail commun pour les agents de base* » (Joseph, 1999). Les frontières d'un réseau sont très importantes, compte tenu de sa surface.

Ceci nous amène à évoquer les relations du système avec son environnement.

E- Relations du système avec son environnement

Le système de transports en commun est un sous-système au sein d'un système plus large : « *l'urbanisation croissante, la multiplication et la densification des réseaux, l'augmentation des déplacements, la diversité des flux d'informations, d'énergie... nous font entrevoir le système-ville comme un ensemble de sous-systèmes interconnectés et interdépendants entre eux* » (Chenier, 1996).

Ainsi, un tel système peut être considéré comme un « processeur » répondant à une demande extérieure. En effet, « *le besoin de déplacement s'exprime [...] à travers l'environnement du système de transport, notamment constitué des systèmes politique, d'activité socio-économique ou spatiale et qui constituent la raison même de ce dernier* » (Baptiste, 1999). Le système de transport doit donc s'adapter au cours du temps à des évolutions de la demande de transport. Il « *n'est pas seulement un processeur répondant « passivement » à une demande émanant du système socio-économique, mais ses caractéristiques ont la capacité d'induire « activement » des modifications au sein des autres systèmes constitutifs de son environnement* » (Baptiste, 1999). Ceci est à rapprocher de ce que nous avons appelé Aménagement par les transports³.

¹ Il existe par ailleurs d'autres flux (ex : énergie) mais leur prise en compte dépasse le cadre de ce travail.

² Système d'Aide à l'Exploitation.

³ Voir le chapitre II de la Partie I.

Le système étant ouvert, il doit avoir des processus de régulation, en raison des dysfonctionnements liés à des causes internes ou externes au système.

F- Régulation du système

La régulation au sein du système est possible grâce à des mécanismes de rétroaction déjà évoqués. Le système est dynamique : ses caractéristiques varient au cours du temps.

1 - Cybernétique.

L'invention du concept de cybernétique est en grande partie due au mathématicien américain N. Wiener qui utilisa le terme de cybernétique en 1948 pour nommer la science traitant de la commande et de la communication chez les animaux et les machines¹. La cybernétique vient du grec *kubernesis* qui signifie « l'action de manœuvrer un navire ». Les concepts fondamentaux sont la rétroaction et la mémoire. Elle étudie principalement les communications et leurs régulations dans les systèmes. O. Lange la définit comme la « science de la commande et de la régulation de systèmes constitués de divers éléments interdépendants » (Lange, 1976).

Il s'agit de poursuivre une finalité, c'est-à-dire d'évoluer vers un état à atteindre ou de maintenir un comportement malgré les perturbations dues au milieu extérieur. La rétroaction, autrement dit action en retour (feed-back) modifie le comportement du système par des mesures et des ajustements.

La régulation consiste ici à comparer les valeurs d'une grandeur réglée et d'une grandeur de référence et à obliger la grandeur réglée à se rapprocher de la valeur de consigne. Il s'agit d'un « processus circulaire dans lequel une partie de l'extrant (output) est reconduit dans l'intrant (input) en tant qu'information sur le résultat préliminaire de la réponse » (Bertalanffy, 1973).

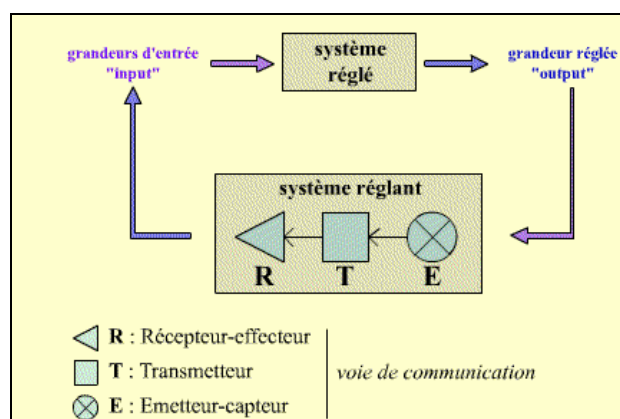


figure 20 Modélisation cybernétique d'un homéostat²

¹ WIENER Norbert. 1948. *Cybernetics : or Control and Communication in the animal and the machine*. Paris : Hermann, 194 p. (La Cybernétique ou les Communications et la Régulation dans le Monde Animal et la Machine).

² Source : (Furelaud et Calvino, 2008).

La mémoire a pour but de profiter de stratégies antérieures qui se sont révélées avantageuses. L'information joue donc un rôle central dans les processus de rétroaction cybernétiques.

L'approche cybernétique est néanmoins très mécaniste (schéma stimulus-réponse avec une boucle de régulation). Notre approche est différente dans la mesure où elle ne repose pas uniquement sur des éléments asservis au système.

2 - Régulation, adaptation et équilibration

Les concepts d'« efficacité » ou de « bon fonctionnement » d'un système de régulation recouvrent en général deux notions différentes (Lange, 1976) :

- la rapidité d'intervention d'un régulateur,
- la précision de la régulation.

Un grand nombre de phénomènes biologiques font intervenir des fonctions de régulation « *assurant la constance des caractères du milieu intérieur en dépit des variations incessantes du milieu extérieur* »¹, grâce à des mécanismes d'adaptation. L'homéostasie correspond au maintien d'un équilibre dans l'organisme vivant, dont le prototype est la thermorégulation chez les animaux à sang chaud. Elle correspond à la cybernétique mais pour des systèmes non mécanistes. Adapté à notre système, l'homéostasie correspond à une régulation par rapport à une situation normale, de référence, correspondant à l'absence de perturbations ou tout du moins à un niveau faible faisant que l'on reste dans le domaine de fiabilité ou que l'on y revient rapidement après des dysfonctionnements.

La régulation du système doit être envisagée par rapport à ses finalités, la principale étant de transporter des voyageurs. Ainsi, un système doit s'adapter aux perturbations afin de maintenir ses finalités et être ainsi en équilibration (Le Moigne, 1977). En effet, « *c'est [...] par rapport aux projets du système et non par rapport à une stabilité observable que régulation, adaptation et plus généralement équilibration peuvent être interprétables. La stabilité visible n'intéresse le modélisateur que dans la mesure où elle témoigne de la satisfaction, même fugace, de l'une au moins des finalités qu'il a attribuées à l'objet considéré. Il fera alors l'hypothèse que l'objet lui aussi définit ainsi son idéal de stabilité : non par l'invariance de la structure, mais par la satisfaction permanente de ses projets* » (Le Moigne, 1977).

On peut distinguer l'adaptabilité passive et active. Par adaptation passive, on entend par exemple la réaction à la saturation des réseaux par la construction de nouvelles infrastructures. En revanche, un système peut s'adapter de manière active : sa modification procède alors d'une anticipation liée à la notion de risque. Il s'agit alors d'une auto-adaptation.

Il est possible de raisonner uniquement à court terme et prendre comme finalité le maintien d'une situation proche de la situation de référence (absence de perturbation) et envisager la régulation dans ce cadre. C'est principalement ce que nous faisons ici. Il est également possible de traiter des adaptations à plus long terme.

¹ Encyclopédie Universelle Larousse, 2004.

La régulation, l'adaptation et l'équilibrage sont fortement dépendantes de la variété de comportements et configurations que le système peut adopter.

3 - Besoin de variété du contrôle

La variété d'un système est le nombre de configurations ou d'états qu'il peut revêtir. Lorsque l'on fusionne plusieurs systèmes, leurs variétés (ou complexités) ne s'additionnent pas, elles se multiplient entre elles. La variété du système ne doit pas excéder les capacités de contrôle de ce système, ce que le cybernéticien W.R. Ashby¹ a exprimé par la loi dite de la variété requise : pour contrôler un système donné, il faut disposer d'un contrôle dont la variété est au moins égale à la variété de ce système. Le rôle du régulateur est de bloquer la transmission de variété entre la perturbation et la sortie contrôlée.

Le système doit être doté d'une capacité de contrôle afin de s'adapter à tous les états possibles du système. Pour un opérateur de transport, si une ligne est défaillante, la possibilité de mettre en place des dessertes de substitution correspond à une régulation grâce à cette capacité de contrôle (non prise en compte ici puisque nous n'intégrons pas la régulation par l'offre). On peut également se poser la question du rôle de l'information des voyageurs dans ce processus.

4 - Importance de la redondance

La redondance est importante dans les mécanismes de régulation : « *pour pouvoir tirer parti de l'évènement (non programmé), pour transformer cette expérience en programme, et donc pour enrichir sa variété (son degré d'organisation) il importe que le système dispose d'une réserve initiale de redondances (et le cas échéant, qu'il soit en mesure de la reconstituer)* » (Le Moigne, 1977).

La redondance autorise une disponibilité d'éléments constitutifs du système. Le système étant ouvert, il est également possible de prendre des éléments hors du système le temps nécessaire (ex : bus d'un autre opérateur de transport s'ils sont disponibles et que des accords en donnent la possibilité).

Pour notre système, la redondance peut s'envisager au niveau topologique. La densité et le nombre de connexions jouent un rôle important en cas d'occurrence d'une perturbation et facilitent potentiellement la maîtrise de la diffusion de cette dernière : « *les possibilités de maîtrise de la diffusion existent et la forte connectivité, traduisant des possibilités de relations alternatives, est [...] un moyen de réduire les vulnérabilités* » (Blancher, 1998). Les conséquences sont ainsi potentiellement moins importantes comme nous l'avons déjà évoqué que sur un réseau peu maillé où la défaillance d'une seule liaison est susceptible d'entraîner des perturbations de grande ampleur sur le réseau. La redondance est ici partielle : il s'agit de la possibilité de relier des nœuds en utilisant des liaisons différentes, certaines étant moins performantes (temps de parcours, nombre de correspondances...).

¹ ASHBY William Ross. 1958. *Une introduction à la cybernétique*. Traduit par PILLON Marcel. Paris : Dunod, 354 p.

Cependant, ceci est dépendant de la capacité des autres liaisons à absorber les flux supplémentaires induits. Par conséquent, la solution peut être de « *concevoir un réseau constitué de nombreux éléments, avec une interconnexion des différents composants du réseau permettant que la défaillance d'un seul élément soit facilement compensée par une légère surcharge des éléments restants* » (Blancher, 1998). Nous revenons dans nos applications sur ces aspects (voir dans la Partie III).

La redondance en ressources techniques et humaines a également un caractère stratégique. Ainsi, dans un système de transports en commun, on prévoit en règle générale, pour faciliter l'exploitation en temps réel, des ressources complémentaires à celles nécessaires à l'exploitation, pour faire face à des indisponibilités du personnel ou du matériel. Il est en effet fondamental que les ressources disponibles du système soient supérieures à celles effectivement utilisées en temps réel. Un agent de conduite absent, un véhicule en panne sont des problèmes devant être résolus rapidement. Ceci n'est possible que par la disponibilité de ressources complémentaires nécessaires pour l'adaptation du système.

L'approche systémique permet d'appréhender notre système et ses relations avec son environnement. Au niveau du système opérant, nous avons notamment mis en évidence les éléments suivants : les nœuds du réseau, les liens entre ceux-ci, les horaires, les véhicules, les lignes. Ceux-ci correspondent à l'offre de transport de notre système. Le système opérant est régulé grâce à un système d'information et un système de décision. Dans la mesure où nous considérons les flux de voyageurs circulant sur un réseau et leurs réorientations lors de situations perturbées, cette approche systémique est complétée par l'utilisation de la théorie des graphes et une approche multi-agents. Le système est modélisé en prenant en compte à la fois l'offre et la demande de transport.

Section 2 - Théorie des graphes

La modélisation du réseau de transports en commun est basée sur la théorie des graphes. En Aménagement-Urbanisme, les applications de la théorie des graphes ont montré leur efficacité à modéliser des réseaux de transport.

A Tours, depuis la création du GAST¹ à la fin des années 1970 par Ph. Mathis, G. Landuré et E. Sanders, de nombreux travaux ont été menés au Laboratoire du CESA. En particulier, certaines thèses soutenues au Laboratoire du CESA ont consisté à :

- évaluer les impacts d'un réseau de transport sur l'espace topologique, à travers la contraction de l'espace-temps et sa représentation sous forme de chronocartes avec le logiciel MAP (L'Hostis, 1997) ;
- étudier, à l'aide du logiciel NOD, l'accessibilité des nœuds et le fonctionnement d'un réseau de transport (Chapelon, 1997) ;

¹ Groupe d'Analyse Spatio-Temporelle.

- modéliser (avec le modèle RES-DYNAM) l'évolution d'une offre de transport en considérant un réseau dynamique, évolutif dans le temps (Baptiste, 1999) ;
- construire un modèle (FRED) pour simuler les répartitions probables des visiteurs sur un espace naturel (accès et diffusion) (Decoupigny, 2000) ;
- développer un modèle d'aide à la décision (3D-IMA) pour éclairer la question de l'impact visuel par des mesures précises des aires ou degrés de visibilité de l'aménagement considéré dans son espace immédiat (Serrhini, 2000).

Dans un domaine autre que celui des transports, S. Larribe, toujours en utilisant la théorie des graphes, a réalisé un modèle (MARIO) afin de représenter les jeux d'acteurs (sociographes « auto-centrés ») dans lesquels s'insèrent les interventions de l'aménageur (Larribe, 1999).

Par la suite, des travaux ont également porté sur des réseaux de transports en commun, avec des binômes à fonctionnalité temporaire¹.

Plus récemment, les travaux ont intégré la micro-simulation en associant les systèmes multi-agents à la théorie des graphes :

- O. Khaddour a utilisé les Systèmes d'Information Géographique et une approche individu-centrée pour modéliser les espaces phatiques² dans la ville de Lattaquié, Syrie (Khaddour, 2005) ;
- grâce à une modélisation du réseau par un graphe cellulaire et en utilisant les systèmes multi-agents, Ch. Decoupigny a développé le modèle TUREP pour modéliser de manière fine les émissions de polluants issues du trafic routier en milieu urbain (Decoupigny, 2006) ;
- dans la continuité, J-B. Buguellou (thèse en cours) développe une approche multi-niveaux pour simuler les déplacements de personnes avec un système multi-agents. Le modèle tient compte de l'apprentissage de la congestion routière par les agents.

Notre recherche s'inscrit dans la continuité de ces travaux.

A- Présentation générale de la théorie des graphes³

1 - Quelques définitions

Comme le signale Ph. Mathis, « *les définitions de la théorie des graphes sont communément admises et ne laissent que peu de place à l'ambiguïté* » (Mathis, 2003). Nous ne présentons donc ici que quelques éléments de cette théorie, les plus utiles dans cette restitution de notre recherche.

Un graphe peut se définir comme un ensemble fini de points appelés sommets et un ensemble de relations entre ces points appelés arcs. La théorie des graphes porte essentiellement sur l'existence des relations entre les sommets. Dans la figure qui représente le graphe, la

¹ voir par exemple (Baptiste et L'Hostis, 2002) ou (Chapelon (dir.), 2005).

² Lieux d'échanges d'informations et de rencontres entre individus.

³ Pour une description plus complète que celle proposée ici, on peut se référer à (Mathis (dir.), 2003). Voir également la présentation dans (Gleyze, 2005), très bien illustrée.

localisation des sommets est indifférente sauf spécification contraire. Seule compte l'existence d'une relation entre deux sommets.

Formellement, le graphe $G = (V, E)$ est un couple constitué :

- d'un ensemble $V = \{1, 2, \dots, n\}$ de sommets,
- d'un ensemble E d'arcs,
- d'une fonction f de E dans $\{\{u, v\} \mid u, v \in V, u \neq v\}$.

Un élément (u, v) de $V \times V$ peut apparaître plusieurs fois : les arcs e_1 et e_2 s'ils existent sont appelés arcs multiples si $f(e_1) = f(e_2)$. Le graphe est alors un *multigraphe* ou *p-graphe*, la valeur de p étant celle du plus grand nombre d'apparitions d'une même relation (u, v) , c'est-à-dire du nombre d'arcs entre u et v .

Si les arcs sont orientés on parle alors de *graphe orienté* ou de *digraphe*. Si les arcs ne sont pas orientés, on est en présence d'un *graphe simple* qui peut être un *multigraphe*. On utilise communément les termes *arc* pour des relations orientées et *arête* pour des relations non orientées entre deux sommets.

Le graphe G est de même caractérisé par le nombre de sommets, appelé *ordre* du graphe.

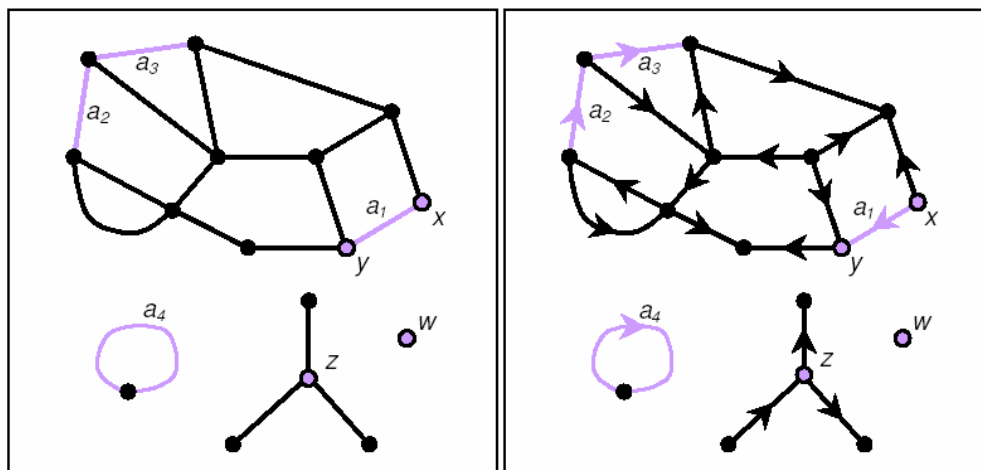


figure 21 Exemples de graphes non orientés (à gauche) et orientés (à droite)¹

2 - Intérêt pour notre recherche

Les graphes constituent pour nous un moyen de modéliser des réseaux de transport. La *figure 22* montre un exemple de graphe représentant un réseau de transport². Il s'agit d'un zoom sur le graphe représentant le réseau de transport routier européen constitué au Laboratoire du CESA dans le cadre du projet ESPON 1.2.1³. Ce graphe comporte 4 172 sommets et 9 350 arcs.

¹ Schémas issus de (Gleyze, 2005).

² Voir plus bas les modalités de représentation d'un graphe.

³ Voir dans le chapitre précédent quelques exemples de résultats concernant la vulnérabilité des transports issus de ce travail. Signalons que les résultats présentés plus haut avaient été obtenus avec un graphe simplifié de 765 sommets.

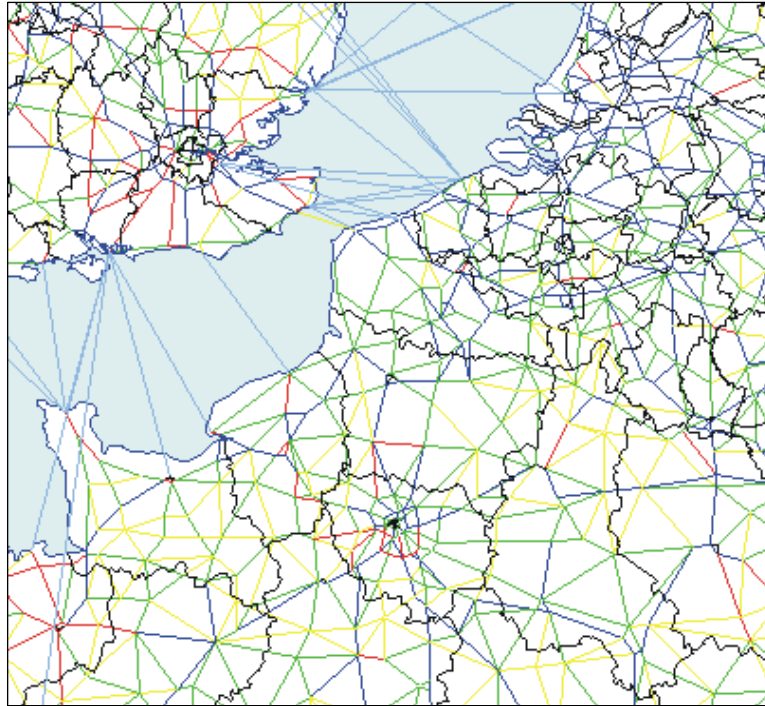


figure 22 Zoom sur le graphe européen du Laboratoire du CESA

Le concept de graphe et celui de réseau de transport sont deux outils méthodologiques que nous utilisons pour décrire le même objet.

Réseau de transport	Nœud	Liaison
Graphe	Sommet	Arc

tableau 9 Terminologie des graphes et des réseaux¹

La puissance de la méthode s'est considérablement accrue depuis quelques années avec le développement rapide des possibilités offertes par les micro-ordinateurs. Il est désormais possible d'effectuer des calculs et simulations complexes sur des graphes représentant des réseaux très importants. Ceci est rendu possible à la fois par la puissance de calcul mais également par l'augmentation de l'espace disponible en mémoire vive autorisant le chargement en mémoire de bases de données très volumineuses. Toutefois, un travail d'optimisation des algorithmes reste nécessaire, notamment lorsque les systèmes multi-agents sont utilisés avec la théorie des graphes.

La théorie des graphes est également pour nous « *un outil de cartographie automatique permettant la réalisation d'images de synthèses vérifiables et reproductibles* » (Mathis, 2003).

¹ Source : (L'Hostis, 1997).

3 - Précisions pour le traitement des sommets

Initialement, la théorie des graphes ne prend en compte que le nombre de sommets et les relations entre ceux-ci mais ne traite pas les sommets eux-mêmes.

Mais la seule prise en considération de l'existence des sommets, de leur nombre et des relations entre eux, est insuffisante pour la modélisation des réseaux. Une meilleure description individuelle des nœuds du réseau est nécessaire pour prendre en compte les orientations à l'intérieur des carrefours du réseau¹ et leur capacité.

Une possibilité est de mettre en place des zooms au niveau des nœuds afin de travailler à différentes échelles, selon la technique du zoom nodal développé par L. Chapelon (Chapelon, 1997)². Il devient alors par exemple possible d'évaluer plus précisément les conséquences au niveau des nœuds des réorientations ayant eu lieu sur le réseau.

B- Le réseau de transports en commun modélisé par un graphe

Un graphe représentant un réseau de transports en commun nécessite des contraintes supplémentaires par rapport à un graphe permanent (représentant par exemple un réseau routier). En effet, il s'agit de considérer des binômes à fonctionnalité temporaire³, par un couplage d'infrastructures permanentes (rails, routes) avec des modes de transport fonctionnant ponctuellement dans la durée (trains, autobus...), d'où l'appellation de graphe temporisé (doté d'une temporisation fonctionnelle).

1 - Prise en compte des horaires

Les sommets du graphe sont reliés entre eux par des arcs. Les relations entre les nœuds dans un réseau de transports en commun sont fortement dépendantes de l'instant considéré. Par conséquent, les arcs sont ici des arcs horaires, c'est-à-dire des arcs dont l'utilisation n'est possible qu'à une heure précise. Toutefois, il est possible d'intégrer des arcs à fonctionnalité permanente afin de tenir compte des déplacements initiaux et terminaux, ainsi que des déplacements pédestres au sein des pôles d'échanges.

En fonction des horaires, les itinéraires calculés entre deux nœuds peuvent varier au cours du temps. Nous en donnerons quelques exemples. Même dans le cas de lignes fonctionnant en fréquence (ex : lignes de métros), nous raisonnons en horaires car le fonctionnement non permanent de ces axes a des répercussions sur la circulation des flux de voyageurs. L'écoulement ne peut être continu.

¹ Voir à ce sujet (Decoupigny, 2006) et plus récemment la thèse de J-B. Buguellou (thèse en cours).

² Pour le graphe représentant le réseau de transports en Île-de-France, les pôles d'échanges ont été modélisés de cette manière en considérant plusieurs nœuds reliés par des arcs (voir dans la Partie III).

³ Pour la notion de binôme fonctionnel, voir (Chapelon, 1997).

2 - Lignes et véhicules

Un réseau de transports en commun est la plupart du temps, comme nous l'avons déjà souligné, structuré par des lignes. Ceci doit être pris en compte dans notre approche car cela induit des contraintes de déplacement, notamment au niveau des correspondances sur le réseau (temps de correspondance, nombre de correspondances autorisé). Dans notre cas, nous sommes également amenés à définir des véhicules circulant sur ces lignes.

3 - L'itinéraire : un chemin dans un graphe

Les deux définitions ci-dessous (chaîne et chemin) permettent de formaliser la notion d'itinéraire dans un réseau de transports en commun à travers la théorie des graphes.

Tout d'abord, une chaîne est communément définie comme « *une séquence d'arcs telle que chaque arc ait une extrémité commune avec l'arc précédent et l'autre extrémité commune avec le suivant. Le cardinal de l'ensemble considéré d'arcs définit la longueur de la chaîne* » (Mathis, 2003).

En particulier, un chemin est « *une chaîne dont tous les arcs sont orientés dans le même sens, c'est-à-dire que l'extrémité terminale d'un arc coïncide avec l'extrémité initiale du suivant* » (Mathis, 2003). Ainsi, un itinéraire dans un réseau de transports en commun correspond à un chemin dans la théorie des graphes dans la mesure où l'itinéraire choisi par un agent est nécessairement constitué d'arcs orientés dans le même sens.

Cette remarque est valable si l'on prend en compte uniquement un trajet aller car si l'on prend en compte le retour, l'itinéraire devient alors un circuit, lequel peut être défini comme « *un chemin dont l'origine coïncide avec l'extrémité finale* » (Mathis, 2003). Dans le cas d'un graphe non orienté, on parle de cycle. Néanmoins, nous ne considérons pas ici les trajets retours ni des boucles de déplacement et raisonnons uniquement sur des séquences de déplacement origine-destination. Par conséquent, les itinéraires correspondent à des chemins au sens de la théorie des graphes. Dans la mesure où certains arcs sont des arcs à fonctionnalité temporaire, les chemins peuvent être qualifiés de « chemins horaires ».

C- Représentation du réseau

« *La théorie des graphes doit une bonne part de son succès aux représentations graphiques qu'elle permet* » (L'Hostis, 1997). La représentation graphique d'un graphe G est extrêmement simple : « *seul importe de savoir comment les sommets sont reliés* »¹. La localisation des sommets sur la figure, c'est-à-dire implicitement sur le plan, la représentation ou réalisation du graphe ne comptent pas, ni même le fait que celle-ci soit à deux, trois ou n dimensions.

Ceci procure une grande liberté pour représenter un graphe sur une surface (réalisation du graphe) : « *il existe une infinité de réalisations d'un même graphe* » (L'Hostis, 1997).

¹ BERGE Claude. 1970. *Graphes et hypergraphes*. Paris : 502 p.

En contrepartie, pour la reproduction d'un réseau de transport par exemple et si l'on souhaite que le résultat « ressemble » à l'observation, il est nécessaire de préciser cette représentation. Ceci peut être fait en adjoignant au graphe des propriétés ou contraintes supplémentaires.

La propriété de planarité d'un graphe facilite sa représentation. Considérons la réalisation d'un graphe sur une surface. Si les arcs ne se coupent qu'en leurs extrémités, le graphe est dit planaire. Selon A. L'Hostis, « *la planarité s'avère indispensable pour pouvoir représenter les graphes sans intersections intempestives des arcs entre eux sur un plan et ce, dans le but d'établir une carte des réseaux de transport claire et lisible* » (L'Hostis, 1997). Nous nuancions ces propos en indiquant que la représentation est facilitée s'il existe peu d'intersections des arcs (permanents ou horaires) en dehors des nœuds¹.

La condition nécessaire et suffisante pour que la réalisation d'un graphe corresponde à un réseau de transport représenté sur une carte, un plan, est qu'il existe une bijection² entre la représentation plan et le réseau lui-même et que le nombre de sommets soit égal au nombre de nœuds. Il faut que les coordonnées des sommets soient identiques à celles des nœuds à une constante d'échelle près.

Les Systèmes d'Information Géographique font le lien entre la théorie des graphes et la représentation cartographique du réseau et des résultats issus de calculs et simulations. De plus, nous avons développé un module de visualisation dynamique du graphe afin de représenter l'évolution des caractéristiques de celui-ci dans le temps³.

D- Quelques propriétés et indices de caractérisation des graphes

Le réseau de transport étant modélisé par un graphe, il est ensuite possible de caractériser ce graphe (et donc l'offre qu'il représente) à l'aide d'indicateurs.

1 - Complétude

Un *1-graphe non orienté et complet* est un graphe où tous les sommets sont liés deux à deux, ce qui correspond à la définition d'un réseau virtuel. Ainsi, d'un point de vue topologique, le graphe complet correspond à la référence sur laquelle peuvent être comparés différents indicateurs. Toutefois, dans le cas d'un graphe représentant un réseau de transport, la complétude n'existe pas.

2 - Connexité

Un graphe est connexe si et seulement si toute paire de sommets distincts est reliée par une chaîne. Un graphe est fortement connexe si et seulement s'il existe au moins un chemin entre tout couple de sommets distincts du graphe. Cette deuxième définition est utile pour

¹ Pour notre travail sur l'Île-de-France, nous sommes amenés à travailler sur un graphe non planaire. On peut également remarquer que le graphe européen du Laboratoire du CESA présenté plus haut n'est pas planaire.

² Une fonction $f: X \rightarrow Y$ est dite bijective ou est une bijection si pour tout y dans l'ensemble d'arrivée Y il existe un et un seul x dans l'ensemble de définition X tel que $f(x) = y$. On dit encore dans ce cas que tout élément y de Y admet un unique antécédent x (par f).

³ Voir le chapitre IV de cette partie.

caractériser les graphes orientés, alors que la première est plus souple, notamment dans le cas des graphes non orientés (L'Hostis, 1997). La connexité traduit donc simplement le fait que tous les sommets sont reliés par le graphe.

Cette propriété est une condition d'existence pour les graphes de réseaux de transport. Dans le cas de graphes orientés, on a besoin de la forte connexité en plus de la connexité, car il est indispensable de pouvoir non seulement atteindre n'importe quel point du réseau, mais encore d'être en mesure de revenir à son point de départ. En fonction du maillage et de la structure horaire, il est plus ou moins aisé de se déplacer entre certains nœuds du réseau.

Deux concepts spécifiques sont liés à la connexité : point d'articulation (au niveau d'un sommet) et isthme (au niveau d'un arc). La suppression d'un isthme ou d'un point d'articulation a pour conséquence de rendre le graphe non connexe. A un niveau plus général, un ensemble d'articulation est un ensemble d'arcs et sommets dont la suppression rend le graphe non connexe. Si lors d'une perturbation, le graphe représentant le réseau est non connexe, il s'agit d'une preuve de sa vulnérabilité.

La k-connexité complète ces concepts. Un graphe est dit K-arête-connexe s'il ne peut être déconnecté que par l'élimination de K arêtes. Un graphe est dit K-sommet-connexe s'il ne peut être déconnecté que par l'élimination de K sommets. Un multigraphe est ainsi au moins 2-arête-connexe si et seulement s'il est connexe et n'admet pas d'isthme.

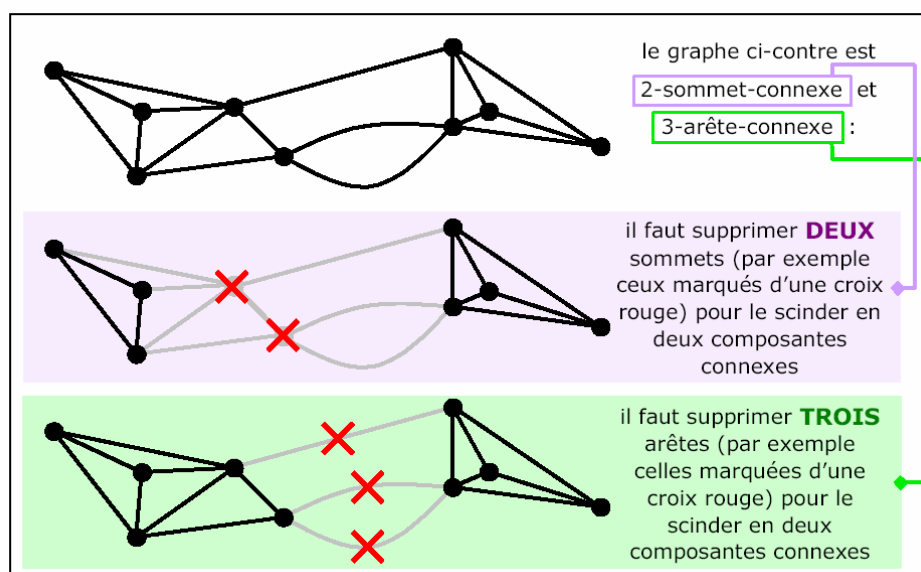


figure 23 Explication schématique de la k-connexité¹

¹ Source : (Gleyze, 2005).

3 - Indices de maillage

Au delà de la connexité simple ou forte, il peut être utile de décrire un réseau qui est caractérisé par des liaisons directes entre les nœuds, mais aussi par des liaisons alternatives. Dans notre approche, les caractéristiques du maillage du graphe représentant le réseau de transports ont potentiellement une influence sur les possibilités de régulation lors de situations perturbées et sur l'adaptabilité en général du réseau.

Deux indicateurs mesurent le degré de maillage du graphe : Alpha et Gamma. Alpha et Gamma sont des indicateurs de maillage (le premier en termes de cycles donc d'alternatives et le deuxième en termes de liaisons directes) dont les valeurs sont comprises entre 0 et 1. Ils mesurent l'écart entre un réseau réel et le réseau virtuel correspondant du point de vue du maillage¹. Nous n'utilisons pas ces indicateurs dans cette recherche, préférant nous focaliser sur des indicateurs prenant en compte la dimension horaire du réseau. De plus, « *les indices exprimant un rapport entre les sommets et les arêtes présentent l'inconvénient de traduire parfois une idée de similitude, entre des réseaux de configuration pourtant très différente* » (Chesnais, 1991).

Dans le cas d'un graphe représentant un réseau de transports en commun, il faut également tenir compte des lignes. En effet, des points qui ne sont pas en liaison directe par une arête comme dans le réseau virtuel, sont néanmoins connectés directement, à condition qu'ils appartiennent à la même ligne.

Des indicateurs décrivent à une échelle plus ou moins fine le réseau grâce à des calculs avec le graphe le représentant : accessibilité unipolaire multipolaire, lien entre deux nœuds (Chapelon, 1997). Nous les utiliserons largement ici en intégrant la structure horaire de l'offre dans les calculs.

De cette présentation, nous retenons les éléments suivants :

- **les graphes sur lesquels nous travaillons n'ont pas la propriété de complétude,**
- **ils sont orientés, la plupart des arcs sont des arcs « horaires » et constituent des lignes,**
- **les nœuds du réseau peuvent être décomposés en plusieurs sommets sur le graphe (zoom nodal),**
- **les graphes des réseaux de transports sont connexes mais peuvent être rendus non connexes lors de dysfonctionnements,**
- **ils sont caractérisés par un maillage plus ou moins important.**

Au cours de notre analyse, nous associons des indicateurs décrivant de manière générale les graphes et les conséquences de perturbations et des indicateurs permettant une description plus fine afin d'avoir une approche multi-niveaux, intégrant la dimension horaire.

¹ Pour leur formule, voir par exemple (Stathopoulos, 1997).

Section 3 - Systèmes multi-agents¹

La modélisation SMA est utile pour effectuer des simulations au niveau microscopique, prenant en compte les agents individuellement. Cela « *permet et nécessite de changer complètement le type d'hypothèses substituant à une nécessaire rationalité totale de l'optimisation, qui est une hypothèse très lourde et pas toujours réaliste, la rationalité limitée au niveau de l'agent* » (Mathis, 2003).

La rationalité peut être limitée par plusieurs facteurs. En particulier, les individus ont des connaissances diverses de l'environnement² et celles-ci peuvent être remises à jour selon un processus d'apprentissage « *qui permet à l'agent de se rapprocher d'une optimisation pour un critère ou une combinaison de critères qu'il choisit* » (Mathis, 2003). Dans notre cas, la rationalité est conditionnée par l'information dont disposent les agents, notamment lors de situations perturbées. Nous ne prenons pas en compte l'information issue de mécanismes d'apprentissage mais l'information relative à la situation (connaissance ou non des perturbations en cours).

A- Principes

Comme nous l'avons signalé plus en amont, des voyageurs se déplacent sur le réseau et doivent être envisagés en tant qu'éléments actifs du système étudié, possédant des règles comportementales propres et poursuivant leurs propres objectifs (ici : arriver le plus rapidement à destination principalement).

Les SMA offrent l'opportunité de représenter directement les individus, leurs comportements et leurs interactions. Il est ainsi possible de considérer à la fois des paramètres quantitatifs (ex : nombre de personnes à un instant sur une partie du réseau) et des paramètres qualitatifs (ex : comportements individuels faisant appel à des raisonnements stratégiques). Un SMA constitue un « laboratoire miniature », permettant à son utilisateur/concepteur de changer le comportement des agents, de modifier les conditions environnementales.

D'après J. Ferber (Ferber, 1995), un SMA est composé des éléments suivants :

- Un environnement **E**, c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique.
- Un ensemble d'objets **O**. Ces objets sont situés, c'est-à-dire que pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E. Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents.
- Un ensemble **A** d'agents qui sont des objets particuliers (A inclus dans O), lesquels représentent les entités actives du système.
- Un ensemble de relations **R** qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux.
- Un ensemble d'opérations **Op** permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de O.

¹ Pour un approfondissement théorique, voir (Ferber, 1995).

² Ainsi, certains individus peuvent avoir une connaissance très précise d'une zone de réseau et très mal connaître le reste, ou alors connaître les caractéristiques de l'offre seulement à une période donnée (ex : heure de pointe).

- Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appelle les lois de l'univers.

Un agent est une entité physique ou virtuelle :

- qui est capable d'agir dans un environnement ;
- qui peut communiquer directement avec d'autres agents ;
- qui est mue 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 cet environnement (et éventuellement aucune) ;
- qui possède des compétences et offre des services ;
- qui peut éventuellement se reproduire ;
- dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, en fonction de sa perception, de ses représentations et communications.

Pour le concepteur d'un SMA, l'agent est caractérisé par ce qu'il peut faire. Il s'agit alors d'identifier ce que l'on doit considérer comme un agent par rapport à un problème considéré.

B- Application à notre recherche

Les agents que nous créons pour représenter les voyageurs sont-ils des agents, tels que définis par Ferber ? Cela n'est pas évident a priori. De cette approche, nous utilisons principalement le fait que la modélisation est basée sur des agents dotés de stratégies, de raisonnement¹, dont les actions influent sur les caractéristiques du système (approche « bottom-up ») et qui sont en interaction.

Les agents perçoivent de l'information, lui donnent une signification et décident alors de réaliser une action, qui aura pour conséquence de modifier leur comportement, l'état du système ou l'élément du système dans lequel ils évoluent. Dans notre cas, l'action consiste pour les agents à mettre en pratique les décisions prises : marcher, monter dans un véhicule, changer de véhicule à un arrêt donné... Les agents, représentant les voyageurs, circulent sur les éléments mis en évidence plus haut (sommets et arcs) en fonction des horaires des véhicules circulant (dimension fonctionnelle du réseau).

C- Difficultés inhérentes à ce type d'approche

Selon L. Sanders, l'utilisation des SMA pose quelques difficultés : « *la modélisation informatique, notamment l'usage des systèmes multi-agents, offre une souplesse plus grande pour gérer les interactions entre des objets de différents niveaux, cette souplesse se payant néanmoins par des difficultés plus importantes de validation* » (Sanders, 2001). Nous ne pouvons que souscrire à cette remarque. Néanmoins, des travaux récents au Laboratoire ont

¹ Sachant que les agents peuvent être plus ou moins réactifs ou cognitifs.

montré que l'on pouvait, à partir de règles de comportement pour les individus et selon une approche bottom-up, retrouver des résultats comparables à ceux obtenus avec des modèles classiques¹.

Il demeure toutefois très délicat de simuler des agents représentant des voyageurs, de prétendre reproduire des comportements de nature humaine. L'influence de l'information sur le voyageur est fortement dépendante de la situation dans laquelle il se trouve, où il souhaite se rendre : « *la signification d'un message n'est pas portée uniquement par ce message mais élaborée par l'auditeur à partir d'indices tirés à la fois du message et du contexte dans lequel il se trouve* » (Bayart, 1996a). De plus, chaque voyageur peut réagir de façon différente : « *il faut admettre que les effets de chaque innovation technologique varieront d'un groupe d'utilisateurs de transports à d'autres*² » (Nijkamp et Pepping, 1995).

Il est très difficile, voire impossible, de connaître le taux de personnes qui vont par exemple se réorienter suite à une information sur des itinéraires de substitution : « *il est difficile d'obtenir des conclusions quantitatives de manière générale quant à la réaction des voyageurs face à l'information. L'état de connaissance actuel ne permet pas encore le développement d'un modèle général capable de prédire que, pour un réseau donné, X% de conducteurs changeront pour l'itinéraire Y s'ils reçoivent le message Z pendant qu'ils conduisent. Malheureusement, on ne dispose pas à ce jour de suffisamment d'expérience et de données sur ces systèmes*³ » (Lappin et Bottom, 2001). Cette affirmation est relative au transport individuel mais on peut faire le parallèle avec ce que nous étudions au niveau des transports collectifs. Néanmoins, il semble qu'une information prescriptive entraîne des taux de réaction par rapport à la situation plus élevés qu'une information uniquement descriptive (Lappin et Bottom, 2001). Néanmoins, dans notre cas, tous les agents ont au départ les mêmes caractéristiques⁴. A chaque voyageur sont associées une origine, une destination, une heure de départ et des modalités de réception de l'information. Les prises de décision des agents sont supposées « rationnelles » et subordonnées à leurs objectifs (arriver dans les meilleurs délais à leur lieu de destination). La rationalité peut être limitée par la méconnaissance de perturbations en cours.

Dans notre démarche de modélisation, la variété des individus circulant sur le réseau suppose la possibilité pour les agents d'avoir des modes de décision et d'action variables. Grâce à l'approche SMA, nous posons les bases pour traiter cette variété mais nous ne la prenons pas en compte dans le cadre de cette recherche. L'objectif est ici d'évaluer les liens entre les paramètres (demande et offre de transport, perturbations, diffusion de l'information, etc.), sans prendre en compte toute la complexité des voyageurs.

¹ Au cours de sa thèse, J-B. Buguellou retrouve la courbe débit-vitesse en effectuant une affectation de trafic routier où chaque agent représente un conducteur.

² « *it has to be recognized that the effects of respective technological innovations will vary between various groups of transport users.* »

³ « *it is difficult to extract generally applicable quantitative conclusions regarding traveler response to information. The state of knowledge does not yet allow the development of a general model capable of predicting that, on a given network, X% of drivers will divert to route Y if they receive message Z while driving. Unfortunately, sufficient experience with and data about these systems is still lacking.* »

⁴ Il sera possible par la suite de les différencier (voir les perspectives dans la conclusion générale).

Conclusion

Les questionnements à l'origine de notre démarche de modélisation ont nécessité la mobilisation de trois champs théoriques, complémentaires dans notre approche. Pour la description du système de transports en commun, nous utilisons des concepts issus de la théorie des systèmes, de la théorie des graphes et des systèmes multi-agents.

Se pose ensuite la question de leur formalisation dans un modèle informatique. Ainsi, des choix doivent être effectués pour la conception du modèle et son implémentation informatique.

Notre démarche étant exploratoire, le but est de proposer une modélisation pouvant ensuite facilement s'adapter et évoluer en fonction des éléments à prendre en compte. Ces trois champs théoriques constituent le socle, les fondations de notre modélisation mais pourront par la suite être enrichis par d'autres apports méthodologiques.

Sur cette base, il est maintenant possible de présenter le modèle informatique développé : PERTURB (chapitre III). Le chapitre IV est consacré à la présentation de la plate-forme de simulation.

CHAPITRE III **MODELE PERTURB**

Introduction

Ce chapitre a pour objet la présentation du modèle PERTURB conçu dans le cadre de cette recherche. Son développement a nécessité un lourd investissement (programmation informatique) mais se justifiait par la production d'indicateurs quantitatifs permettant de progresser dans l'analyse de la vulnérabilité structurelle et fonctionnelle des transports en commun. En incluant les commentaires au code proprement dit, le texte du programme est du même ordre de grandeur que le présent document. Une partie du travail a consisté à réutiliser du code préexistant grâce à un travail préalable : (Botquélen, 2004).

Nous rappelons tout d'abord les objectifs de la modélisation effectuée (section 1). Le modèle est construit sur la base d'hypothèses de travail, détaillées dans la section 2. Les choix effectués pour la simplification de la réalité sont ainsi exprimés de manière explicite.

La démarche de modélisation par objets nous oriente progressivement vers la réalisation de l'application informatique, développée en langage C ++. Il s'agit notamment de faire le lien entre les référents théoriques présentés au cours du chapitre II et l'implémentation informatique nécessaire à la réalisation de calculs et simulations (section 3).

Nous abordons ensuite dans la section 4 le fonctionnement de PERTURB en décrivant de manière simple les entrées et sorties de celui-ci ainsi que son fonctionnement. Les principaux algorithmes développés ou adaptés sont présentés, ainsi que l'interface de l'application. En effet, le modèle doit pouvoir être utilisé par un utilisateur grâce à une interface conviviale.

Le code a été réalisé avec un souci d'optimisation des traitements. Des éléments concernant la performance de l'application sont fournis dans la section 5.

Vient après ceci une discussion sur la validité du modèle (section 6). En effet, si les algorithmes de l'application fonctionnent correctement, cela ne suffit pas à s'assurer de la validité et de la pertinence du modèle et en particulier son adéquation avec les questions de recherche.

Le CD de la thèse contient les codes sources du programme.

Section 1 - Précision des objectifs du modèle

La modélisation réalisée et le programme informatique qui lui est lié ont pour ambition de simuler des situations de perturbations dans les systèmes de transports en commun. La vocation du modèle est avant tout descriptive : il s'agit de produire des indicateurs décrivant les conséquences de perturbations en fonction des paramètres en entrée du modèle. Cette modélisation constitue une étape dans la compréhension de phénomènes complexes qu'il serait illusoire de tenter d'aborder de manière exhaustive dans le cadre de cette recherche.

L'objectif général est l'étude quantitative de la vulnérabilité (structurelle et fonctionnelle) de systèmes de transports en commun.

- Au niveau structurel, l'enjeu considéré est la dégradation de la mise en relation des nœuds du réseau. Il n'y a pas de prise en compte des voyageurs.
- Au niveau fonctionnel, il s'agit d'étudier les pertes de temps des voyageurs (approche voyageur) et à un niveau plus global la perte globale de temps sur le réseau (approche exploitant). Un objectif spécifique est d'évaluer la contribution de l'information diffusée aux voyageurs dans la régulation de situations perturbées.

Il convient ici de bien présenter la façon dont nous abordons le rôle potentiel de l'information. Nous considérons une situation où les voyageurs se réorientent grâce à la diffusion d'une information. Ils choisissent à un instant t un autre itinéraire car ils ont pris connaissance des dysfonctionnements d'une partie du réseau qu'ils utilisent.

Ainsi, nous supposons qu'une information peut les faire changer de trajectoire. On trouve ici tout l'intérêt d'une approche par système multi-agents, permettant de conférer aux agents une rationalité plus ou moins importante. Divers indicateurs doivent pouvoir être produits : pertes de temps, charge du réseau, nombre de passages et de minutes passées dans les sommets, arcs ou lignes... afin d'être en mesure d'observer le phénomène à différents niveaux.

Le modèle doit prendre en compte plusieurs paramètres :

- L'offre de transport : celle-ci peut varier au niveau de la topologie du réseau, des horaires des lignes, des capacités des véhicules.
- Les caractéristiques de la situation perturbée : en effet, de nombreuses situations peuvent se présenter allant de la paralysie généralisée du réseau suite à des mouvements de grève jusqu'à l'occurrence d'un petit retard d'un véhicule à son arrivée au point d'arrêt. Nous nous focalisons ici sur les perturbations entraînant des interruptions de circulation sur certains tronçons du réseau. Nous travaillons également sur des programmes de grève¹.

¹ Transparent pour le modèle. Il suffit, en entrée du modèle, de substituer aux données théoriques les données correspondant à un programme de grève.

- La fréquentation du réseau par les voyageurs : la fréquentation est à prendre en compte dans la mesure où nous nous intéressons ici aux voyageurs circulant sur le réseau, tout du moins dans l'approche fonctionnelle. Nous raisonnons par origine-destination sans prendre en compte les programmes d'activités.
- L'information diffusée (sur le plan spatial et temporel) : en fonction de la réactivité des opérateurs de transport, la diffusion de l'information est plus ou moins rapide et peut couvrir ou non l'ensemble du réseau. En faisant varier les caractéristiques de ce paramètre, il est possible d'évaluer l'influence des caractéristiques de la diffusion d'information sur la régulation de la situation perturbée.

Au-delà de nos objectifs spécifiques, le modèle doit satisfaire certains critères de qualités nécessaires à tout modèle. Nous pouvons nous baser sur ceux définis par B. Walliser :

- la robustesse, qui est « *la capacité à fournir des résultats qui ne divergent pas trop lorsque l'on modifie les entrées* » (néanmoins, des effets de seuil peuvent exister),
- la sensibilité, « *c'est-à-dire une précision suffisante pour que les variations des sorties en fonction des entrées soient significatives* »,
- la maniabilité et la souplesse¹,
- la transparence, qui renvoie à la « *possibilité d'être compris assez facilement par un large éventail de personnes*² » (Walliser, 2000).

Pour répondre à ces objectifs, le modèle est structuré en 5 modules, chacun intégrant un nombre plus ou moins important de paramètres.

- Le module **Prelim** permet d'effectuer des calculs basés uniquement sur l'offre de transport en l'absence de perturbation : de nœud à nœud, unipolaires et multipolaires.
- Le module **O** permet d'effectuer des calculs basés uniquement sur l'offre de transport avec prise en compte des perturbations : de nœud à nœud, unipolaires et multipolaires.
- Le module **OD** permet de simuler les déplacements des agents en cas de situation perturbée prévue (ex : travaux) ou en l'absence de perturbation. Les agents effectuent leur calcul d'itinéraire en connaissant les perturbations éventuelles.
- Le module **ODI**, plus adapté aux situations perturbées non prévues, ajoute des paramètres liés à la diffusion d'information (délai, lieux de diffusion...).
- Le module **ODIC** ajoute des contraintes liées à la capacité des véhicules, comparativement au module ODI.

Plus on augmente le nombre de paramètres pris en compte, plus on se rapproche de l'analyse de la vulnérabilité fonctionnelle, sans toutefois y parvenir à ce stade (non prise en compte de la régulation par l'offre par exemple).

¹ D'où l'importance de la mise en place d'une interface relativement conviviale.

² La transparence inclut également dans notre cas la fourniture des codes sources du programme et la présentation des hypothèses de travail structurantes pour la réalisation du modèle.

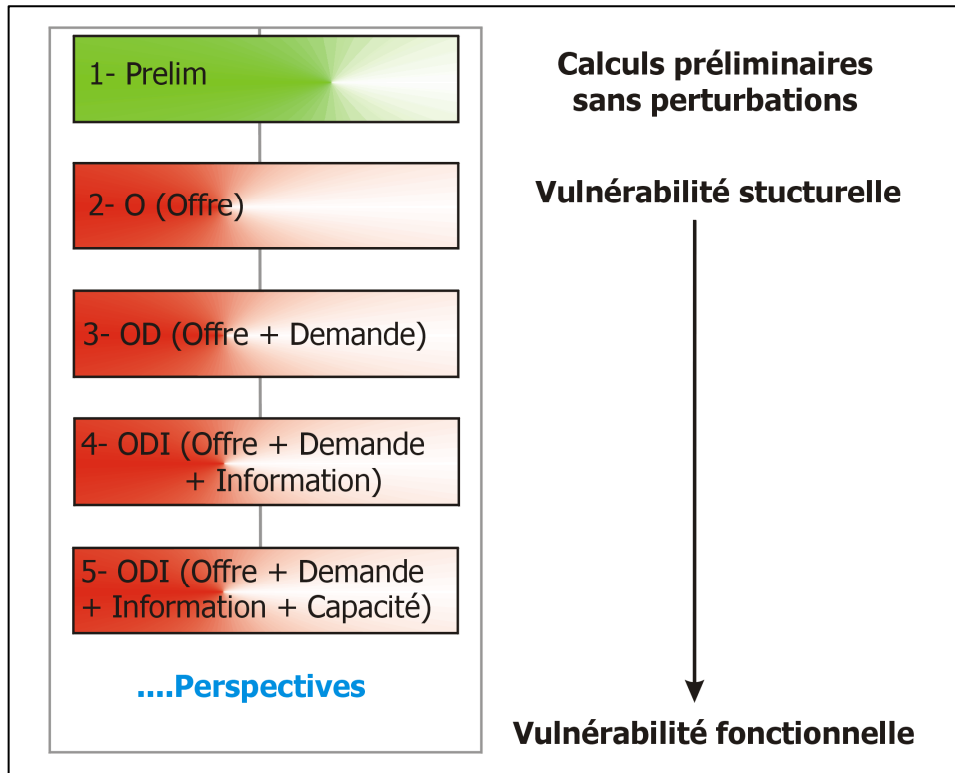


figure 24 Les 5 modules applicatifs de PERTURB

Section 2 - Hypothèses de travail

Le modèle PERTURB a été réalisé sur la base d'hypothèses de travail (HT), qu'il est nécessaire de signaler ici en raison de leur influence sur les résultats obtenus. Ces hypothèses se justifient par la nécessaire simplification de la réalité liée à tout travail de modélisation. Des enrichissements du modèle permettraient de lever certaines d'entre elles.

HT 1 : lorsque les agents disposent de l'information correcte sur l'offre de transport, ils effectuent un choix correspondant à une rationalité totale et choisissent le trajet optimal d'un point de vue strictement temporel¹. La rationalité peut toutefois être limitée par leur méconnaissance des perturbations affectant le réseau, par exemple lorsqu'ils n'ont pas eu accès à l'information diffusée. Les processus de décision se font selon la Loi du Tout ou Rien². En réalité, la rationalité des voyageurs ne peut pas être totale. Mais le considérer ici permet de mesurer directement l'influence de l'information qui leur est diffusée.

HT 2 : lorsqu'un agent est informé d'une perturbation, on considère qu'il prend celle-ci en compte dans son processus de décision et change, le cas échéant, d'itinéraire.

¹ Si le temps de parcours est identique, le choix se porte sur l'itinéraire avec le moins de correspondances. En réalité, « les critères d'efficacité peuvent varier, être multiples : plus court chemin, rapidité, confort, coût, sécurité, agrément, pollutions, etc » (Amar, 1993).

² Néanmoins, le trajet réalisé peut être différent de celui trouvé initialement (réorientations, problèmes de capacité...).

HT 3 : un agent est à la fois informé d'une perturbation et de la possibilité d'un itinéraire de contournement. Ces deux informations sont diffusées simultanément¹. Il doit être « au bon endroit, au bon moment ». Il n'a pas de démarche pro-active pour chercher ces informations.

HT 4 : on suppose que les agents ne changent pas de destination au cours du déplacement, même en cas de perturbation(s).

HT 5 : dans le cadre du module ODI, on considère que les véhicules ont une capacité illimitée. Cette hypothèse est levée dans le module ODIC, qui intègre les contraintes de capacité des véhicules.

HT 6 : les nœuds du réseau, les couloirs de correspondance ont une capacité illimitée². Des évolutions du modèle pourront consister à faire des développements pour lever cette hypothèse.

HT 7 : les interruptions de trafic sur des tronçons d'une ligne n'ont pas de conséquence sur les horaires des tronçons non perturbés. De plus, il n'y a pas de reprise progressive du trafic. La prise en compte d'un tel paramètre pourra être possible avec l'ajout à PERTURB d'un module de régulation par l'offre. Nous ne prenons pas en compte les temps de montée et descente dans les véhicules qui peuvent être plus longs lors de phénomènes de congestion sur le réseau.

Section 3 - Modélisation par objets : vers une implémentation informatique

La première étape de la modélisation consiste à identifier les objets élémentaires au niveau desquels il faut recueillir l'information.

**Quels sont les objets de notre système ? Comment les décrire dans notre modèle ?
Quelles sont leurs interactions ?**

Nous nous sommes basés au cours du chapitre précédent sur des concepts théoriques. Nous avons abordé la théorie des graphes, la théorie des systèmes et les systèmes multi-agents pour identifier quels pourraient être les éléments à prendre en compte dans notre modèle : arcs, sommets, agents, lignes et véhicules notamment. Grâce à la présentation de la démarche de modélisation par objets, il nous est possible en identifiant de façon précise ces objets de nous orienter de manière progressive vers le développement de notre application informatique.

¹ Dans la réalité, il est nettement plus difficile d'indiquer des itinéraires de contournement que de décrire simplement la perturbation en cours. Nous l'expérimentons, actuellement, dans le cadre du projet OGESPER (voir sur le CD accompagnant ce document). Néanmoins, un des intérêts ici consiste précisément à montrer l'apport de ce type d'informations pour le voyageur.

² Au niveau du trafic routier, les problèmes de capacité sont plus liés aux nœuds du réseau qu'aux tronçons. Pour les transports en commun, les problèmes sont davantage liés aux véhicules : c'est au niveau du passage du sommet au véhicule que des difficultés pour le voyageur peuvent avoir lieu si toutes les places sont occupées, d'où l'hypothèse de travail HT6 utilisée dans un souci de simplification. Des contre-exemples existent parfois. Lors des grèves de la fin de l'année 2007, les rames de la ligne de métro automatique Meteor, à Paris, étaient parfois presque vides car la congestion dans les couloirs d'accès était telle que les rames n'avaient jamais le temps de se remplir.

A- Principes de la modélisation par objets

Selon P. Desfray, « une classe d'objets est un modèle définissant une famille d'objets ayant des propriétés analogues. La classe d'objets décrit ces propriétés en termes d'attributs et de méthodes » (Desfray, 1996). Ainsi, un objet est créé par instanciation d'une classe, c'est-à-dire par création d'un élément conforme au modèle que constitue sa classe. Il possède par conséquent les propriétés et les comportements définis au niveau de sa classe.

Les objets constituent les éléments actifs du programme. Ils réagissent aux stimuli qu'ils reçoivent (messages reçus) en émettant eux-mêmes des messages vers d'autres objets. La programmation par objets consiste donc essentiellement à instancier des objets et à émettre des messages vers ces objets.

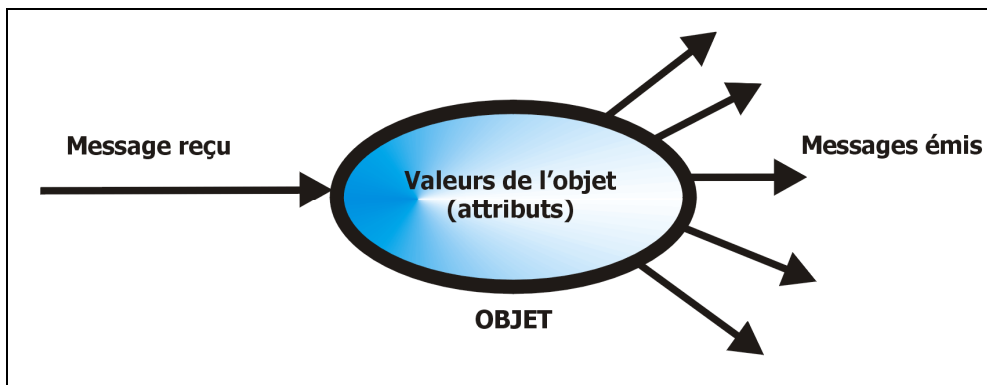


figure 25 L'objet reçoit des messages, gère ses valeurs propres et émet des messages ¹

Le **message** est la structure de contrôle de base des langages à objets. Dans la plupart des langages à objets, l'envoi d'un message correspond à un appel de fonction et le traitement est séquentiel. La définition des messages que peut traiter chaque objet est réalisée au niveau de sa classe par le biais des méthodes. Une **méthode** définit les informations nécessaires pour chacun des messages (paramètres) et décrit les traitements réalisés par les objets lors de la réception d'un message correspondant. Un message émis vers un objet adresse donc une de ses méthodes, en donnant des valeurs de paramètres. Les objets possèdent des valeurs qui leur sont propres : les **attributs**. Les objets gèrent totalement les valeurs de leurs attributs qu'eux seuls peuvent modifier directement grâce à leurs méthodes. Ceci est possible grâce au principe de l'encapsulation, règle garantissant l'autonomie et l'intégrité des objets créés au cours du programme.

Voici les définitions des méthodes et attributs des classes, ainsi que de la notion d'encapsulation (Desfray, 1996) :

- Les **méthodes** (ou fonctions) d'une classe constituent l'ensemble des services que peuvent fournir les instances de cette classe. Elles spécifient la nature des messages que pourront traiter ces instances.
- Un **attribut** caractérise une propriété d'une classe correspondant à une valeur attachée à chacune de ses instances.

¹ Source : (Desfray, 1996).

- **L'encapsulation** consiste à restreindre la visibilité de chaque terme employé dans un programme (méthodes, attributs, constante, etc) à une partie limitée du programme. Un objet ne modifie jamais un autre objet en accédant directement aux informations gérées par ce dernier.

Ainsi, nous devons identifier les classes d'objet de notre modèle, leurs méthodes et attributs. En considérant les relations entre les classes, il est alors possible de réaliser le modèle structurel de l'application et de représenter sur un schéma toutes les classes.

B- Implémentation informatique des classes

Il convient maintenant de présenter de façon plus précise les classes constitutives du modèle et leur implémentation informatique. Chacune d'entre-elles est définie dans deux fichiers (extension .hpp et .cpp). Ceci est étroitement lié à la manière dont est compilé le code en C++ lors de la création d'un fichier exécutable (d'extension .exe).

Fichier	Remarques
.cpp	Fichier source. Ce fichier texte contient le code des programmes.
.hpp	Fichier d'en tête (header). Ce fichier texte contient uniquement des déclarations. Ces fichiers sont inclus dans les fichiers sources « .cpp » qui sont de cette manière modifiés avant d'être compilés.
.obj	Fichier résultant de la compilation. Le compilateur génère un fichier avec l'extension « .obj » pour chaque fichier compilé.
.lib	Fichier librairie. Une librairie regroupe plusieurs fichiers « .obj ». Les boîtes à outils en C++ que l'on trouve dans le commerce sont souvent présentées sous cette forme. La dénomination exacte de ce fichier correspond à la notion de librairie statique.
.exe	Fichier exécutable. Programme généré par l'édition des liens.

tableau 10 Les fichiers utilisés pour des programmes réalisés en langage C++¹

La figure 26 montre le cycle de travail complet et tous les fichiers pouvant intervenir dans le cadre de la génération d'un exécutable.

¹ Source : (Dupin, 2003).

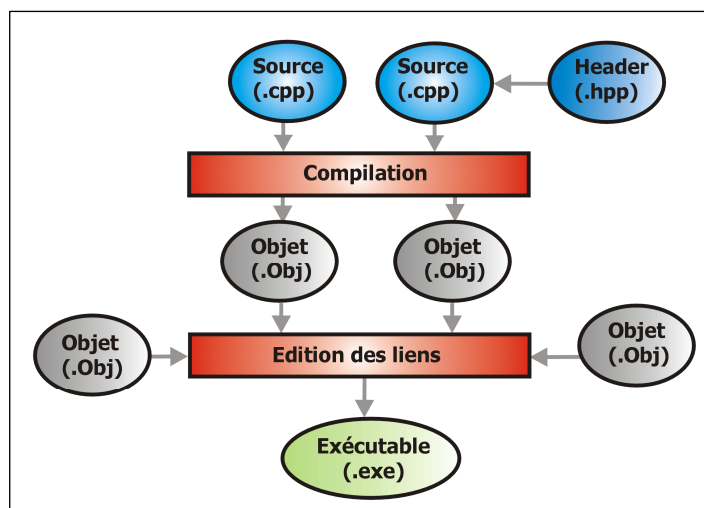


figure 26 Les fichiers utilisés lors du cycle de travail¹

C- Classes de PERTURB

Il est maintenant possible de présenter les objets constitutifs du modèle PERTURB. Néanmoins, il est tout d'abord nécessaire de replacer sa réalisation dans le contexte des travaux du Laboratoire.

Nous avons été amenés à travailler dans le cadre d'un contrat PREDIT déjà mentionné² sur une application informatique développée pour calculer les plus courts chemins dans un graphe horaire, suite à un travail réalisé par Y. Botquélen (Botquélen, 2004)³. Un algorithme a été programmé en langage C++. Il s'agit d'une version « horaire » de l'algorithme de Dijkstra.

Suite au travail initial de Y. Botquélen, la fonction de calcul des plus courts chemins a été remaniée par l'auteur de cette thèse. En effet, celle-ci faisait appel au langage SQL et les données étaient regroupées dans une base de données pour être ensuite gérées par l'utilisateur au moyen d'une interface PHP. Dans la mesure où le modèle devait être en mesure de fonctionner de manière autonome et être lancé depuis un autre programme, des modifications ont dû être opérées au programme initial. Le modèle de calcul (CHEM) réalisé dans le cadre du projet PREDIT a ensuite été réutilisé pour la réalisation de PERTURB, moyennant certaines adaptations.

C'est pourquoi les classes déjà définies par Y. Botquélen, lors de son travail initial, ont été conservées pour la réalisation de CHEM, puis de PERTURB. Nous présentons succinctement ici les classes déjà définies par Y. Botquélen⁴.

La classe **C_Graphe**, représentant un graphe, contient un tableau d'objets de la classe **C_Sommet** (sommets du graphe). Chaque objet de cette classe **C_Sommet** contient une

¹ Source : (Dupin, 2003).

² Voir dans le chapitre III de la première partie, dans le paragraphe consacré à la performance territoriale.

³ Le travail, co-encadré par Hervé Baptiste, a été mené initialement par Y. Botquélen, élève-ingénieur au Département Informatique de l'École Polytechnique de l'Université de Tours puis adapté par l'auteur de cette thèse.

⁴ Pour plus d'explications, voir (Botquélen, 2004).

référence sur la liste des **C_Arc** (arcs du graphe) à sa sortie et celle des arcs en entrée. De même, chaque objet de la classe **C_Arc** contient un tableau d'objets de la classe **C_Horaires** pour définir ses horaires disponibles.

D'autres classes ont été définies afin de réaliser le calcul des plus courts chemins. Elles peuvent être qualifiées de « mineures » par rapport aux classes présentées plus haut si l'on se place dans un cadre systémique d'évaluation des éléments importants des transports en commun. La classe **C_Candidat** représente des solutions possibles (lors du calcul des plus courts chemins) qui servent également à la construction des autres solutions lors du calcul. Chaque sommet peut être associé à un ou plusieurs objets de cette classe. Les objets de cette classe contiennent ainsi le chemin des **C_Horaires** nécessaires pour atteindre la solution en cours, en plus des critères courants d'évaluation. Une classe **C_Cellule** est ajoutée pour la conception de listes chaînées entre les objets de la classe **C_Arc** ou ceux de la classe **C_Candidat** : ces deux classes dérivent de la classe **C_Cellule**. Enfin, une classe **C_Exception** permet de gérer les exceptions éventuelles.

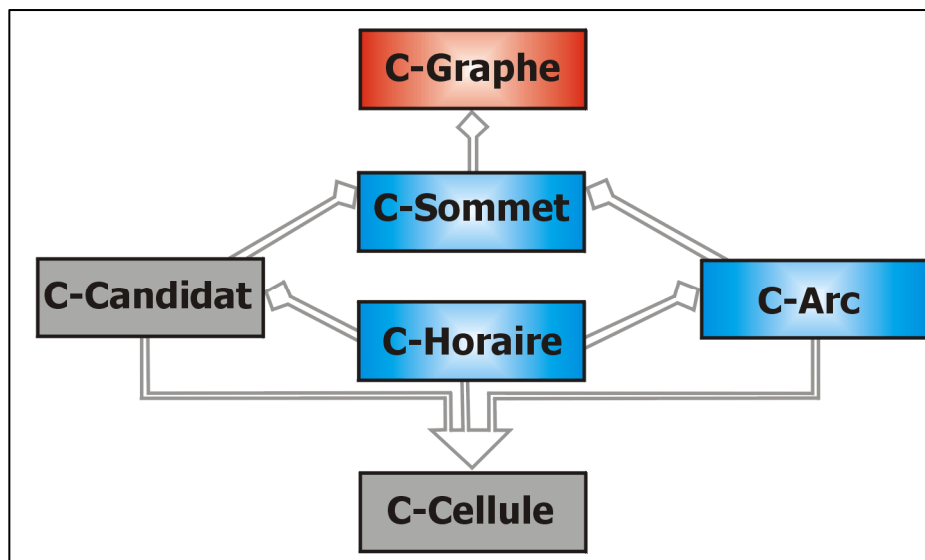


figure 27 Diagramme des classes du programme de Botquélen¹

Ces classes ont servi de support pour la réalisation de CHEM (pour le contrat PREDIT), et ensuite de PERTURB (dans le cadre de la thèse). Néanmoins, nous avons dû leur ajouter des attributs et méthodes afin d'adapter l'outil préexistant à nos besoins.

Dans le cadre de la réalisation de CHEM, une classe **TRAJET** a été ajoutée afin de regrouper les informations relatives à un trajet dans des objets, instances de cette classe.

Lors de la réalisation de PERTURB, il s'est avéré indispensable d'ajouter trois autres classes :

- **AGENT**, pour représenter les individus,
- **VEHICULE**, pour représenter les véhicules utilisant le réseau,

¹ Dans le schéma, le losange blanc signifie : « est composé de ». Par exemple, le graphe est composé de sommets. Dans la modélisation de Y. Botquélen, il n'y a pas de relation directe entre les classes représentant le graphe et les arcs.

- **LIGNE**, chaque véhicule étant affecté à une ligne (structuration de l'offre de transport).

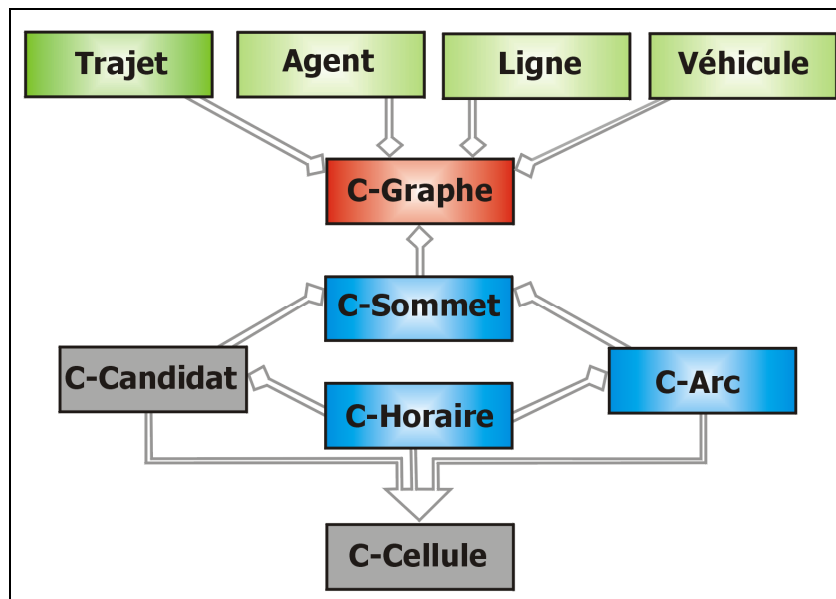


figure 28 Diagramme simplifié des classes de PERTURB

La figure 28 ne reprend pas, pour des questions de lisibilité, toutes les relations intégrant les nouvelles classes. Par exemple, la classe Véhicule fait référence à des objets de la classe C_Horaire (un véhicule utilise des horaires) et à des objets de la classe C_Sommet (pour définir la position du véhicule).

Section 4 - Fonctionnement

Après avoir présenté de façon succincte les classes constitutives de PERTURB, il est utile d'aborder la question du fonctionnement du modèle depuis la lecture des données en entrée jusqu'à la production de fichiers en sortie. La majorité des fichiers en sortie a un format compatible avec MAPNOD¹. Il est ainsi possible de visualiser rapidement les résultats obtenus. De plus, les fichiers générés ont des noms et des emplacements (sur le disque dur) permettant de savoir facilement quelles sont les informations contenues et à quel calcul ils correspondent.

Il n'est pas ici question de présenter le fonctionnement du modèle dans toute sa complexité mais d'exposer les principaux éléments, nécessaires à la compréhension du lecteur.

Rappelons tout d'abord que le programme est structuré en 5 modules.

¹ Pour être tout à fait précis, le format est compatible avec la version de MAPNOD utilisée ici, incluant nos adaptations.

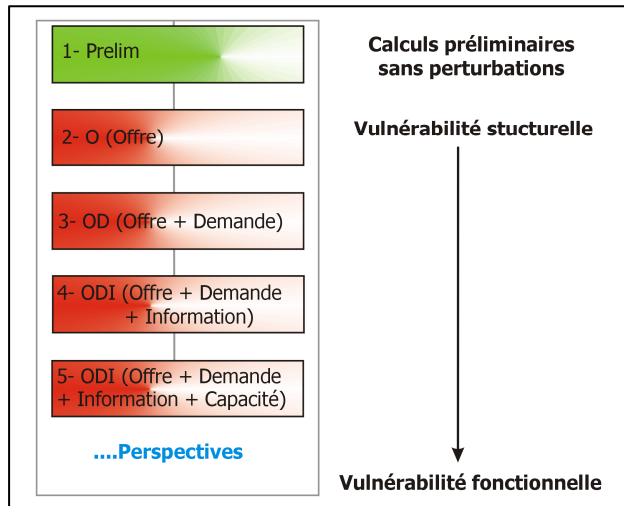


figure 29 Rappel des 5 modules applicatifs de PERTURB

PERTURB est structuré en deux programmes informatiques indépendants :

- le programme *PERTURB.exe*, développé en Visual Basic, qui constitue l'interface de l'application.
- Le programme *Graphes.exe*, développé en C++, qui est le calculateur. C'est au niveau de ce programme que l'on trouve les classes présentées. Il correspond au cœur applicatif.

Le principe est le suivant : en fonction des choix réalisés au niveau de l'interface, des fichiers au format texte présents dans un dossier spécifique (C:\\dataSIMINFO) sont alimentés¹. En fonction des valeurs contenues dans ces fichiers, le programme *Graphes.exe* effectue les traitements souhaités.

A- Parties communes à tous les modules

1 - Interface

Sur l'interface générale, une carte représentant le réseau de RER et de trains en Île-de-France peut être visualisée. Toute autre image pourrait être choisie.

¹ Il est également nécessaire pour certaines informations spécifiques d'aller modifier directement les fichiers .txt (ex : nœuds à ne pas prendre en compte lors d'un calcul unipolaire ou multipolaire). Ceci pourrait être intégré à terme à l'interface.

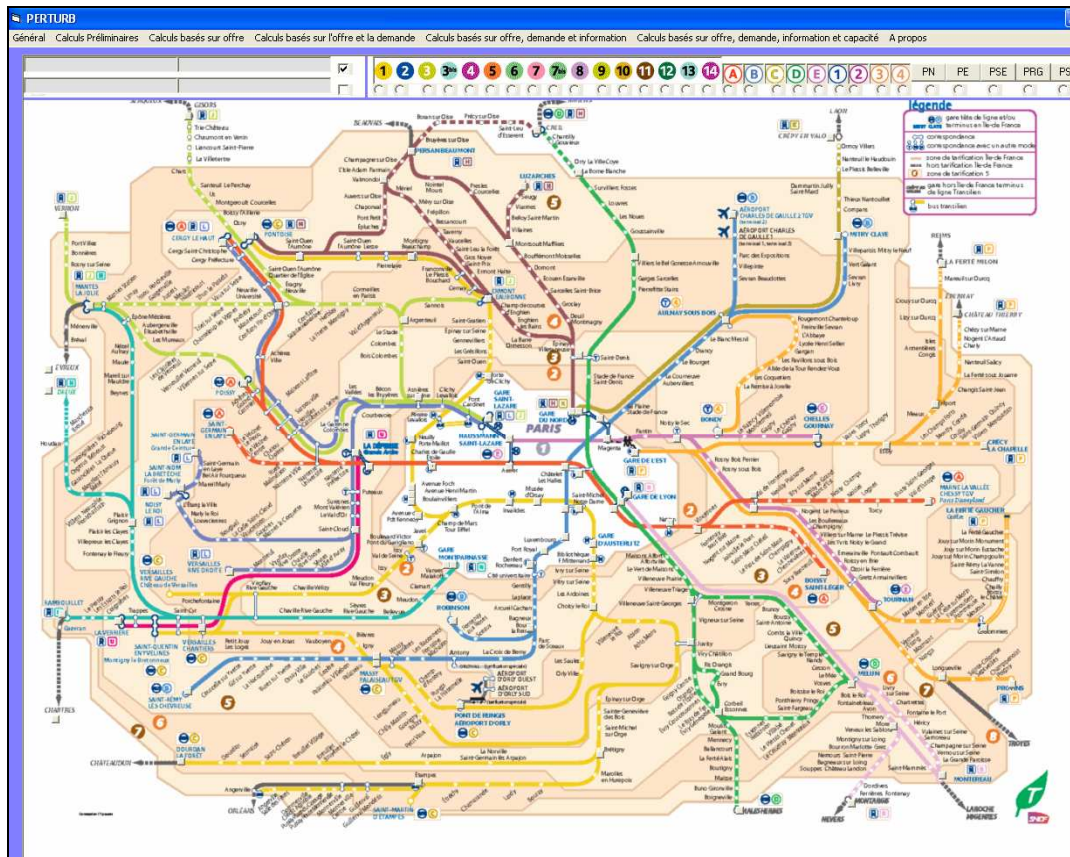


figure 30 Interface générale de PERTURB

On accède à partir de cette interface aux fonctionnalités du modèle :

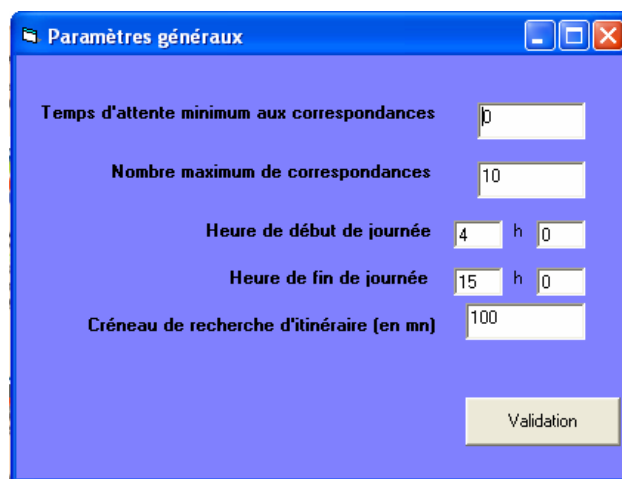
- menu général,
- calculs préliminaires (Prelim),
- calculs basés sur l'offre (O),
- simulations basées sur l'offre et la demande (OD),
- simulations basées sur l'offre, la demande et l'information (ODI),
- simulations basées sur l'offre, la demande, l'information et la capacité (ODIC).

L'interface est liée à une base au format Access reprenant les caractéristiques de l'offre de transport. C'est par des appels à cette base que l'on peut sélectionner des points d'arrêts et des lignes dans les menus. Une aide à la saisie facilite la sélection des arrêts¹.

Les paramètres généraux de la simulation peuvent être définis dans un menu général. Les heures de début et de fin de journée définissent la plage horaire nécessaire pour la réalisation des calculs et simulations. Par exemple, si l'on souhaite travailler uniquement sur la plage horaire de pointe du matin, il n'est pas utile de prendre en compte l'ensemble de l'offre de la journée (qui peut charger la mémoire vive inutilement). Le paramètre « créneau de recherche d'itinéraire » indique la profondeur de recherche d'itinéraire. Si l'utilisateur sélectionne 60 minutes, le calculateur ne tiendra compte que des horaires situés dans une plage horaire de 60 minutes pour le premier horaire du trajet. Réduire cette valeur permet de gagner du temps de

¹ Lorsque l'on tape le début du nom, seuls les arrêts dont le nom est postérieur dans l'ordre alphabétique sont proposés. Certains arrêts peuvent également être saisis directement au niveau de la carte.

traitement mais il est préférable, en cas d'une offre avec des fréquences de circulation faibles, de choisir une valeur élevée. On considère que le temps de correspondance ne peut être inférieur à y minutes (valeur paramétrable). Il s'agit dans ce cas de correspondance sans changement de nœud. Autrement, des correspondances avec marche entre deux nœuds peuvent être indiquées dans les données relatives à l'offre de transport avec un temps correspondant en définissant un arc permanent (ex : de Magenta à gare du Nord). Ce paramétrage n'est pas possible pour les modules OD, ODI et ODIC. Cela devra être traité dans le cadre d'une meilleure prise en compte des cheminements des agents au sein des nœuds (voir les perspectives en conclusion générale).



The image shows a software dialog box titled "Paramètres généraux" with a blue background. It contains the following fields and values:

- Temps d'attente minimum aux correspondances: 0
- Nombre maximum de correspondances: 10
- Heure de début de journée: 4 h 0
- Heure de fin de journée: 15 h 0
- Créneau de recherche d'itinéraire (en mn): 100

A "Validation" button is located at the bottom right of the dialog.

figure 31 Définition des paramètres généraux

La définition des paramètres de la perturbation permet d'indiquer le nombre de perturbations à prendre en compte, et pour chaque perturbation :

- les nœuds origine et fin du tronçon perturbé,
- les heures de début et de fin de la perturbation,
- le numéro de la ligne perturbée,
- si la perturbation est dans les deux sens,
- s'il faut considérer uniquement les arcs horaires (ne prendre en compte que les relations directes entre les deux nœuds).

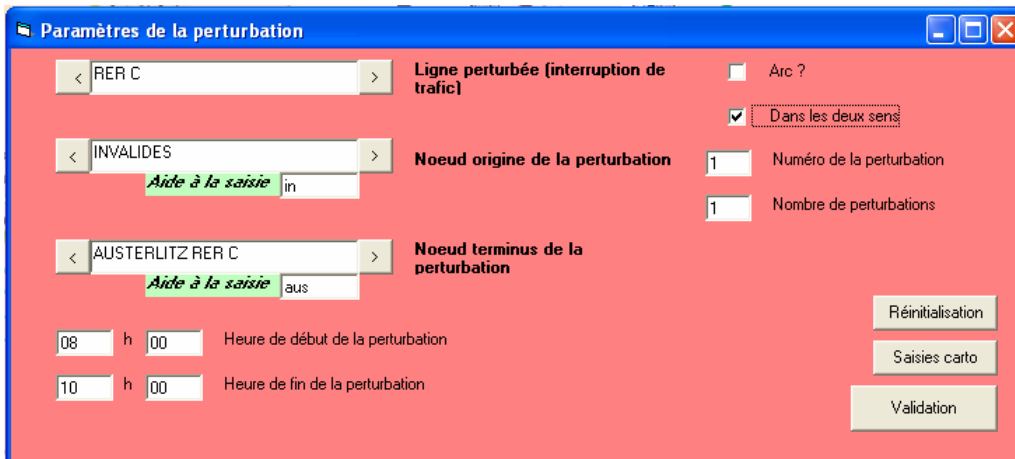


figure 32 Définition des paramètres d'une perturbation

Le lancement du calculateur correspond à l'ouverture de l'exécutable *Graphes.exe* qui lance le chargement en mémoire du graphe représentant l'offre de transport. Il est possible de sélectionner le répertoire avec le fichier contenant l'offre de transport. Le fichier est toujours appelé « offre.dat ».

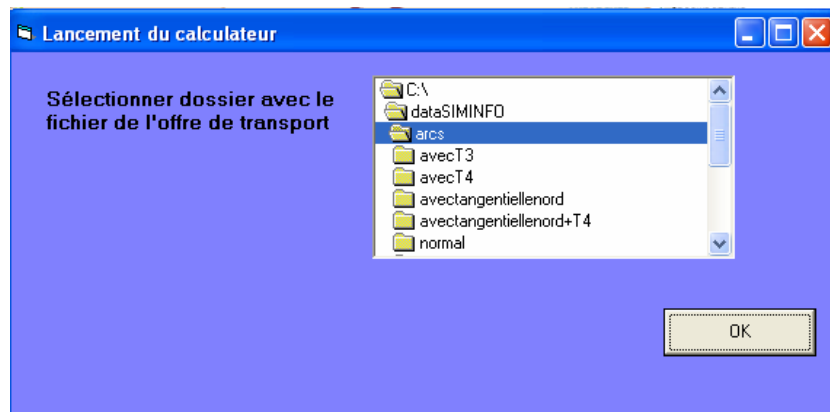


figure 33 Lancement du calculateur

2 - Calculateur

➤ Premières tâches suite au lancement

Les premières tâches réalisées par le calculateur sont la lecture de fichiers afin de déterminer les informations suivantes :

- emplacement sur le disque dur du fichier avec l'offre de transport,
- paramètres généraux (temps d'attente minimum aux correspondances, nombre maximum de correspondances, heures de début et fin de journée, créneau de recherche d'itinéraire),
- nombre d'agents (égal à 0 pour les modules Prelim et O),
- mode de fonctionnement du calculateur (autonome¹ ou non).

¹ Le mode autonome permet de travailler sans utiliser l'interface (dans un souci de portabilité de l'application). Nous ne détaillerons pas ce mode de fonctionnement.

Ensuite, le calculateur charge le graphe en deux étapes :

1- première lecture pour déterminer les paramètres : nombre de nœuds, nombre de véhicules, nombre de lignes (afin de dimensionner les tableaux).

2- chargement en mémoire.

Le fichier contenant l'offre de transport est structuré en 11 colonnes pour chaque arc horaire avec les informations suivantes :

- code du nœud origine
- code du nœud destination
- code du mode de transport
- capacité du véhicule
- durée
- heure de départ
- heure d'arrivée
- code du véhicule
- numéro de la ligne
- nom du nœud origine
- nom du nœud de destination.

Le fichier peut également contenir des arcs permanents. Il doit respecter certaines contraintes :

- ne pas avoir entre deux mêmes sommets à la fois des arcs horaires et un arc permanent,
- pour 3 sommets A, B et C : ne pas avoir $AB + BC \leq AC$ (dans le cas des arcs permanents)
- avoir les lignes correctement classées dans le fichier.

Une fois le graphe chargé en mémoire, *Graphes.exe* est en veille et attend qu'un traitement lui soit demandé par l'utilisateur, en fonction du module et de la fonctionnalité appelée. Un message signale à l'utilisateur que le graphe est chargé et que des calculs peuvent être demandés.

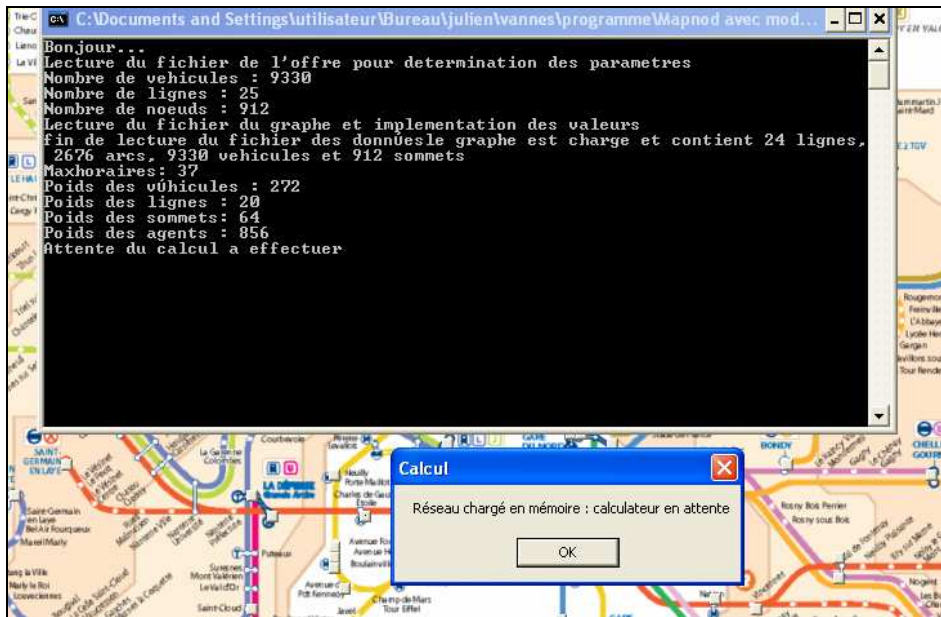


figure 34 *Graphes.exe, après le chargement du graphe*

Une fois un traitement achevé, un message est proposé à l'utilisateur, lui signalant que le calcul ou la simulation est terminée. *Graphes.exe* se met ensuite en veille en attendant qu'une autre tâche lui soit demandée.

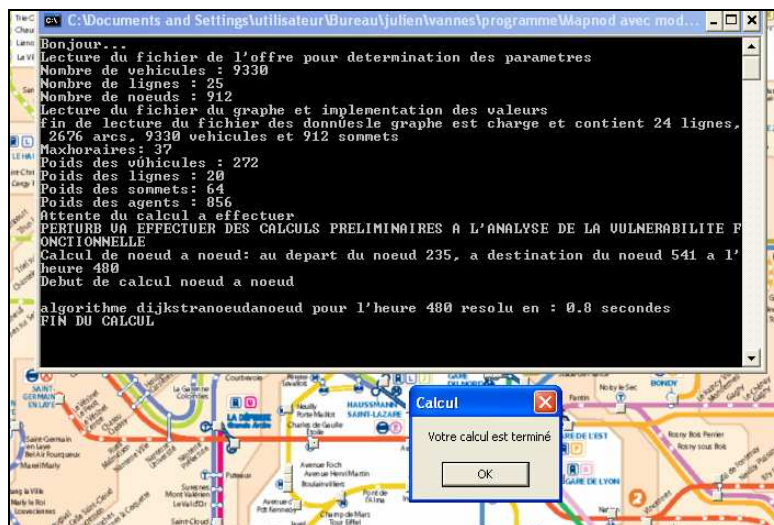


figure 35 *Graphes.exe, à la fin d'un calcul*

➤ Implémentation des paramètres des perturbations

Excepté Prelim, tous les modules de PERTURB utilisent la fonction d'implémentation des paramètres des perturbations.

La fonction *implementationparametresperturbation* permet de simuler des perturbations de l'offre du système de transports en commun. Nous simulons des perturbations affectant des

tronçons d'une ligne du réseau avec interruption de circulation et débutant et finissant à une heure précise. Pour la prise en compte des grèves, cette fonction n'est pas appelée. Un autre fichier pour l'offre de transport est utilisé.

Les paramètres de la fonction sont les suivants :

- heure de début de la perturbation,
- heure de fin de la perturbation,
- numéro de ligne perturbée,
- premier nœud du tronçon perturbé,
- dernier nœud du tronçon perturbé,
- indication s'il faut prendre en compte uniquement les arcs horaires.



figure 36 Tronçon perturbé sur une ligne de transports en commun

Cette fonction permet de « désactiver » certains horaires du graphe mais également d'indiquer les nœuds et véhicules situés sur la ligne perturbée¹, ainsi que les arcs concernés (pour la visualisation des résultats). Pour la visualisation des résultats, la valeur -1 leur est affectée pour pouvoir les mettre en évidence aisément.

¹ Ces informations permettent d'obtenir des résultats différents en fonction des caractéristiques de la diffusion d'informations (disponibles ou non sur toutes les lignes du réseau).

Etapes principales de la fonction

1-Gestion des sommets, horaires et véhicules

POUR tous les véhicules

SI numéro de ligne du véhicule = numéro de ligne perturbée

On indique que le véhicule est situé sur la ligne perturbée

Surtronçon = 0

Sommetdéparttrouvé = 0

Bonsens = 0

POUR tous les horaires du véhicule

On indique que les sommets de départ et d'arrivée de l'horaire sont sur la ligne perturbée

SI Sommetdépart de l'horaire = Sommetorigine du tronçon

Sommetdéparttrouvé = 1

FIN SI

SI Sommetarrivée de l'horaire = Sommetdestination du tronçon

ET Sommetdéparttrouvé = 1

Bonsens = 1

FIN SI

FIN POUR

SI Bonsens = 1

POUR tous les horaires du véhicule

SI Heuredépart de l'horaire \geq Heuredébutperturbation ET Heuredépart de l'horaire \leq Heurefinperturbation ET (Nœuddépart de l'horaire = Nœudorigine du tronçon OU surtronçon = 1)

On désactive l'horaire

SI Sommetarrivée de l'horaire = Sommetdestination du tronçon

Surtronçon = 0

FIN SI

FIN SI

FIN POUR

FIN SI

FIN SI

FIN POUR

2-Gestion des arcs

POUR tous les arcs

SI un horaire est désactivé

On indique que l'arc est perturbé

FIN SI

FIN POUR

encadré 3 Fonction Implementationparametresperturbation

Une procédure spécifique, non détaillée ici, permet de gérer les cas où des arcs horaires ne desservant pas tous les arrêts sont impactés par la perturbation. Dans le cas présenté plus haut (*figure 36*), il est ainsi par exemple possible de désactiver l'horaire B→H d'un véhicule¹, s'il existe. Cette procédure est appelée si le paramètre « arc horaire » est renseigné à 1.

Cette fonction gère le sens d'une interruption de trafic. Si la perturbation est dans les deux sens, la fonction est appelée deux fois, en échangeant les nœuds d'origine et de destination du tronçon. S'il existe plusieurs perturbations, la fonction est appelée autant de fois que nécessaire.

➤ Réinitialisation des perturbations à 0

La fonction *reprise_circulations* permet de réinitialiser à 0 les perturbations afin d'éviter qu'elles soient prises en compte dans les calculs suivants. Au cours d'une simulation (modules OD, ODI et ODIC), cette fonction est également appelée à la date de fin de perturbation.

Etapas principales de la fonction

1-Gestion des sommets

POUR tous les sommets

On indique que le sommet n'est pas sur la ligne perturbée

FIN POUR

2-Gestion des véhicules

POUR tous les véhicules

On indique que le véhicule n'est pas situé sur la ligne perturbée

FIN POUR

3-Gestion des arcs et horaires

POUR tous les arcs

On indique que l'arc n'est pas perturbé

POUR tous les horaires de l'arc

On réactive l'horaire

FIN POUR

FIN POUR

encadré 4 Fonction Reprise_circulations

¹ En intégrant une régulation par l'offre, il serait possible de modifier le parcours d'un véhicule. Ceci n'est pas intégré dans PERTURB.

➤ Calcul des plus courts chemins

Pour le calcul des plus courts chemins, l'algorithme principal utilisé est l'algorithme de Dijkstra¹. Une particularité consiste à prendre en compte le nombre de correspondances. Pour deux trajets ayant l'arrivée à la même heure, on privilégie celui qui a le moins de correspondances. Le passage d'une journée à l'autre à minuit n'est pas géré. En fonction du traitement demandé, des fonctions spécifiques sont utilisées.

▪ **Calculs de nœud à nœud (*Dijkstra* pour nœud à nœud) : modules Prelim et O**

Le calcul est réalisé à une date indiquée dans les paramètres. Trois fichiers sont générés par cette fonction. Ces derniers donnent les indications suivantes :

- heure de départ et d'arrivée,
- itinéraire entre les deux nœuds choisis,
- arcs subissant l'interruption de trafic.

L'itinéraire recherché est celui permettant d'arriver le plus tôt en partant le plus tard possible (ex : éviter de partir à 8h50 si on peut arriver à la même heure à destination en partant à 9h00).

▪ **Calculs unipolaires (*Dijkstra* pour unipolaire) : modules Prelim et O**

Le calcul est réalisé à une date indiquée dans les paramètres. Il est possible d'exclure du calcul certains nœuds. Ceci peut être utile pour éliminer certains nœuds très peu desservis. Sept fichiers sont générés par cette fonction. Ces derniers donnent les indications suivantes :

- durée du trajet entre le nœud d'origine et tous les autres nœuds,
- heure d'arrivée aux nœuds,
- somme des durées nécessaires pour joindre les nœuds,
- nombre de nœuds atteints,
- nœuds non atteints²,
- nombre de minutes sur chaque ligne,
- itinéraires (en orienté ou non orienté) : pour chaque arc, nombre d'itinéraires l'utilisant,
- arcs subissant l'interruption de trafic.

▪ **Calculs multipolaires (*Dijkstra* pour multipolaire) : modules Prelim et O**

Le calcul est réalisé à une date indiquée dans les paramètres. Il est possible d'exclure du calcul certains nœuds. Ceci peut être utile pour éliminer certains nœuds très peu desservis. Six fichiers sont générés par cette fonction. Ces derniers donnent les indications suivantes :

- somme des durées de nœud à nœud pour chaque nœud,
- nombre de couples de nœuds connectés,
- couples de nœuds non connectés,
- nombre de minutes sur chaque ligne,

¹ Nous ne détaillerons pas le fonctionnement de cet algorithme, classique en théorie des graphes (voir par exemple (Lacomme, Prins et Sevaux, 2004) ou (Botquélen, 2004)).

² Ce fichier peut servir à identifier les nœuds non atteints pour éventuellement relancer un calcul sans les prendre en compte.

- itinéraires (en orienté ou non orienté) : pour chaque arc, nombre d'itinéraires l'utilisant,
 - arcs subissant l'interruption de trafic.
- **Calculs d'itinéraire théorique pour les agents (*Dijkstra* itinéraire) : modules OD, ODI et ODIC**

Cette fonction permet de calculer l'itinéraire que devra suivre l'agent au cours de la simulation. Au cours de cette fonction, chaque agent calcule son itinéraire et implémente ainsi un objet de la classe Trajet qui lui est propre. Cet objet est appelé *Chemin*.

- **Calculs de nouvel itinéraire pour les agents lorsqu'ils sont informés d'une perturbation (*Dijkstra* itinéraire2) : modules ODI et ODIC.**

Lors de la simulation, les agents recalculent un itinéraire s'il y a des perturbations. Au cours de cette fonction, seuls les agents qui ont reçu l'information sur la perturbation recalculent leur itinéraire. Des procédures spécifiques sont appelées pour que les agents possèdent les informations suffisantes (mise à jour des variables) pour poursuivre leur trajet.

B- Parties spécifiques aux modules OD, ODI et ODIC

Contrairement aux modules Prelim et O, ces trois modules permettent de simuler la circulation des véhicules et le cheminement des agents sur le réseau. Ils possèdent ainsi quelques fonctions spécifiques. Le pas de temps des simulations est la minute. La plage horaire de simulation doit être encadrée par les heures de début et de fin de journée définies dans les paramètres généraux.

La bonne définition de cette plage horaire est primordiale. En effet, si on sélectionne une plage horaire débutant à 8h, tous les véhicules partant avant cette heure ne seront pas pris en compte. Par conséquent, même si l'heure de départ du premier agent est 8h, il faut choisir une plage horaire débutant avant 8h car cet agent peut utiliser au cours de son trajet un véhicule parti à 7h30.

1 - Lecture du fichier des flux

La fonction *lecturefichierOD* permet de lire le fichier contenant les informations sur les agents utilisant le réseau. Le fichier « flux.dat » est structuré en 5 colonnes avec les informations suivantes :

- nœud de départ,
- nœud d'arrivée,
- heure de départ,
- variable indiquant si les agents peuvent recevoir de l'information lorsqu'ils sont dans un véhicule,
- nombre d'agents concernés par ces caractéristiques.

Ainsi, chaque agent est implémenté avec ses paramètres. Des évolutions du modèle consisteraient à introduire des variables sur le comportement. A ce niveau, la variable

indiquant si un agent peut recevoir l'information dans un véhicule pourrait être assimilé à une attention plus ou moins forte aux messages ou à la possession d'un outil de réception d'informations type SMS pour être averti des perturbations lorsqu'il est dans un véhicule.

Le fichier « nbvoyageurs.dat » contient la valeur du nombre d'agents afin de dimensionner le tableau. En fin de simulation, le nombre d'agents arrivé est écrit dans le fichier « nbvoyageursarrives.dat » afin de vérifier que tous les agents ont pu effectuer leur trajet.

2 - Sorties fichiers des indicateurs initiaux

Trois fonctions sont appelées avant le début de la phase de simulation afin de donner des indications sur les caractéristiques des déplacements prévus, avant la phase effective de simulation.

▪ Sortieheurearriveeagentstrajetinitial

Deux fichiers sont générés par cette fonction. Ces derniers donnent les indications suivantes :

- heures d'arrivée prévues des agents,
- durées des trajets prévus.

▪ Calculnombredepassagespararcinitial

Deux fichiers sont générés par cette fonction. Ces derniers donnent les indications suivantes :

- nombre de passages par arc (en orienté),
- nombre de passages par arc (en non orienté).

▪ Calculnombredeminutespararcinitial

Deux fichiers sont générés par cette fonction. Ces derniers donnent les indications suivantes :

- nombre de minutes par arc (en orienté).
- nombre de minutes par arc (en non orienté).

3 - Avancement des véhicules, montée et descente des agents, recalcul éventuel d'itinéraires...

Ces fonctions sont appelées successivement, à chaque pas de temps, au cours de la phase de simulation.

▪ Action1véhicule

Cette fonction lance les procédures afin de gérer :

- le départ initial des véhicules¹,
- l'arrivée des véhicules aux nœuds.

▪ Actionagents (OD), Actionagentsinfo(ODI) et Actionagentsinfocapacite (ODIC)

Ces fonctions lancent les procédures afin de gérer, de manière successive :

- **a-** le départ initial des agents,
- **b-** le fait que certains agents quittent le réseau une fois arrivés à destination,

¹ Pour qu'un véhicule parte, il faut que l'heure de début de la simulation soit antérieure ou égale à son heure de départ.

- **c-** la descente de véhicule des agents,
- **d-** la marche des agents, lors d'une correspondance avec changement d'arrêt,
- **e-** la montée des agents dans les véhicules.

Pour les modules ODI (fonction *Actionagentsinfo*) et ODIC (fonction *Actionagentsinfocapacité*), il y également (entre les étapes b et c) une phase de recalcul d'itinéraire (appel de la fonction *Dijkstra puis itineraire2*), en fonction de l'heure de diffusion de l'information. Suite à ce calcul, certains agents peuvent descendre du véhicule, alors que cela n'était pas prévu.

Le module ODIC possède également, lors de la montée des agents dans le véhicule (étape e), une procédure permettant de vérifier qu'il reste au moins une place disponible. Les agents n'ayant pas pu monter à une itération sont prioritaires à l'itération suivante, selon le principe d'une file d'attente. L'étape est divisée en deux sous-étapes : tout d'abord les agents de la file d'attente et ensuite les autres agents.

- *Action2véhicule*

Cette fonction lance des procédures pour gérer le départ des véhicules des nœuds où ils se situent.

4 - Sorties fichiers en cours de simulation

A chaque pas de temps, trois fonctions sont appelées afin de fournir les informations sur l'évolution de la situation et être ainsi en mesure de la visualiser de manière dynamique.

- *Sortiepositionarcs*

Deux fichiers sont générés par cette fonction. Ces derniers donnent les indications suivantes :

- nombre d'agents sur chaque arc (en orienté et non orienté),
- arcs subissant l'interruption de trafic (pour faciliter la visualisation de cette information).

- *Sortiepositionnœuds*

Un fichier est généré par cette fonction. Celui-ci donne l'indication suivante : nombre d'agents sur chaque sommet.

- *Sortiepositionvéhicules*

Deux fichiers sont générés par cette fonction et donnent les indications suivantes :

- nombre de personnes dans chaque véhicule,
- total du nombre de personnes dans les véhicules de chaque ligne.

5 - Sorties fichiers des indicateurs en fin de simulation

Trois fonctions sont appelées à la fin de la phase de simulation afin de donner des indications sur les caractéristiques des déplacements réalisés. Il est ainsi possible de comparer les trajets réalisés avec ceux initialement prévus.

- *Sortieheurearriveeagentstrajetréel*

Trois fichiers sont générés par cette fonction. Ces derniers donnent les indications suivantes :

- heures d'arrivée réelles des agents,
- durées réelles des trajets.

Un des fichiers est spécifiquement généré pour les simulations où on a fait varier le délai de diffusion de l'information (voir plus bas le module ODI) afin de pouvoir rapidement visualiser l'influence de ce paramètre.

- *Calculnombredepassagespararcréel*

Deux fichiers sont générés par cette fonction. Ces derniers donnent les indications suivantes :

- nombre de passages par arc (en orienté),
- nombre de passages par arc (en non orienté).

- *Calculnombredeminutespararcréel*

Deux fichiers sont générés par cette fonction. Ces derniers donnent les indications suivantes :

- nombre de minutes par arc (en orienté),
- nombre de minutes par arc (en non orienté).

6 - Réinitialisation des agents et des véhicules

La fonction *réinitialisationagentsetvéhicules* est appelée à la fin d'une phase de simulation pour réinitialiser les agents et véhicules et pouvoir effectuer d'autres calculs.

Après avoir présenté les fonctions principales de PERTURB, nous pouvons maintenant exposer plus en détails les modules de l'application.

C- Calculs préliminaires (module Prelim) et calculs basés sur offre (module O)

Ces deux modules permettent d'effectuer des calculs :

- de nœud à nœud,
- unipolaires,
- multipolaires.

Il est possible de définir la plage horaire des calculs. Ainsi si on sélectionne la plage horaire de 8h à 12h, un calcul sera réalisé entre 8h et 12h en incrémentant l'heure à chaque itération avec la valeur définie.

Par ailleurs, il est également possible d'effectuer des comparaisons de calculs multipolaires avec et sans perturbation.

Contrairement au module Prelim, le module O tient compte des perturbations renseignées.

1 - Calculs de nœud à nœud

Calcul de nœud à nœud sans perturbation

< Trains PSE > Ligne du nœud de départ < RER D > Ligne du nœud de destination

< FONTAINEBLEAU AVON > Noeud de départ < STADE DE FRANCE ST DENIS > Noeud de destination

Aide à la saisie fontaineb Aide à la saisie sta

1 seul calcul Heure de départ pour le premier calcul 08 h 00

Plusieurs calculs Heure de départ pour le dernier calcul 10 h 00

Calculchemin Incrementation 1

Saisies carto

Réinitialisation

Calcul

figure 37 Interface de calcul(s) de nœud à nœud

Étapes principales des calculs de nœud à nœud

1-Lecture du fichier indiquant si un seul ou plusieurs calculs à effectuer

2-SI un seul calcul à effectuer

Lecture du fichier indiquant nœud de départ, nœud de destination, heure de départ

Implémentation des paramètres des perturbations (uniquement pour module O)

Appel de la fonction *dijkstra_pournœudanœud*

SI demande de réinitialisation des perturbations demandée

Appel de la fonction *reprisecirculations*

FIN SI

FIN SI

2'-SI plusieurs calculs à effectuer

Lecture du fichier indiquant nœud de départ, nœud de destination, heure de départ premier calcul, heure de départ dernier calcul et valeur d'incrément

Implémentation des paramètres des perturbations (uniquement pour module O)

POUR heure = heure de départ premier calcul Jusqu'à heure de départ dernier calcul

Appel de la fonction *dijkstra_pournœudanœud*

heure = heure + valeur d'incrément

FIN POUR

SI demande de réinitialisation des perturbations demandée

Appel de la fonction *reprisecirculations* (uniquement pour module O)

FIN SI

FIN SI

encadré 5 Calcul(s) de nœud à nœud

2 - Calculs unipolaires

Calcul unipolaire avec perturbation

< RER A > Ligne du nœud de départ

< NEUILLY PLAISANCE > Noeud de départ

Aide à la saisie neu

1 seul calcul

Plusieurs calculs

Réinitialisation à 0 des perturbations en cours

Heure de départ pour le premier calcul 08 h 00

Heure de départ pour le dernier calcul 10 h 00

Incrementation 1

Saisies carto

Réinitialisation

Calcul

figure 38 Interface de calcul(s) unipolaire(s)

Étapes principales des calculs unipolaires

1-Lecture du fichier indiquant si un seul ou plusieurs calculs à effectuer

2-SI un seul calcul à effectuer

Lecture du fichier indiquant nœud de départ, heure de départ

Implémentation des paramètres des perturbations (uniquement pour module O)

Appel de la fonction *dijkstra_pourunipolaire*

SI demande de réinitialisation des perturbations demandée

Appel de la fonction *reprise_circulations*

FIN SI

FIN SI

2'-SI plusieurs calculs à effectuer

Lecture du fichier indiquant nœud de départ, heure de départ premier calcul, heure de départ dernier calcul et valeur incrémentation

Implémentation des paramètres des perturbations (uniquement pour module O)

POUR heure = heure de départ premier calcul Jusqu'à heure de départ dernier calcul

Appel de la fonction *dijkstra_pourunipolaire*

Heure = Heure + valeur incrémentation

FIN POUR

SI demande de réinitialisation des perturbations demandée

Appel de la fonction *reprise_circulations* (uniquement pour module O)

FIN SI

FIN SI

encadré 6 Calcul(s) unipolaire(s)

3 - Calculs multipolaires

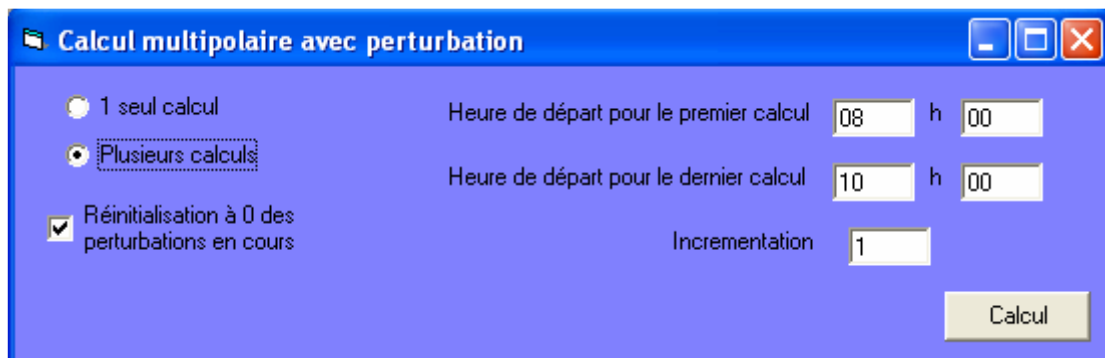


figure 39 Interface de calcul(s) multipolaire(s)

Étapes principales de calculs multipolaires

1-Lecture du fichier indiquant si un seul ou plusieurs calculs à effectuer

2-SI un seul calcul à effectuer

Lecture du fichier indiquant l'heure de départ

Implémentation des paramètres des perturbations (uniquement pour module O)

Appel de la fonction *dijkstra_pourmultipolaire*

SI demande de réinitialisation des perturbations demandée

Appel de la fonction *reprise_circulations*

FIN SI

FIN SI

2'-SI plusieurs calculs à effectuer

Lecture du fichier nœud de départ, *heuredépartpremiercalcul*, *heuredépartderniercalcul* et *valeurincrémentation*

Implémentation des paramètres des perturbations

POUR *heure* = *heuredépartpremiercalcul* Jusqu'à *heuredépartderniercalcul*

Appel de la fonction *dijkstra_pourmultipolaire*

heure = *heure* + *valeurincrémentation*

FIN POUR

SI demande de réinitialisation des perturbations demandée

Appel de la fonction *reprise_circulations* (uniquement pour module O)

FIN SI

FIN SI

encadré 7 Calcul(s) multipolaire(s)

4 - Comparaison de calculs multipolaires

Cette fonctionnalité a pour but de comparer les résultats issus de calculs multipolaires avec et sans perturbation. Si plusieurs calculs multipolaires ont été effectués, il est possible de faire une comparaison pour toutes les minutes entre deux dates définies.

Deux fichiers sont générés et donnent les informations suivantes :

- nombre de relations interrompues et nombre de relations subissant un allongement du temps de connexion,
- relations subissant un allongement du temps de connexion en raison de la perturbation,
- relations interrompues en raison de la perturbation,
- somme des temps supplémentaires induits par la perturbation (pour les relations perturbées mais pas interrompues).

Il est ainsi possible de se focaliser uniquement sur les relations perturbées. En effet, dans le cadre de graphes avec un nombre de sommets élevé, le taux de relations impactées est souvent très faible et peut rendre difficile l'interprétation de résultats.

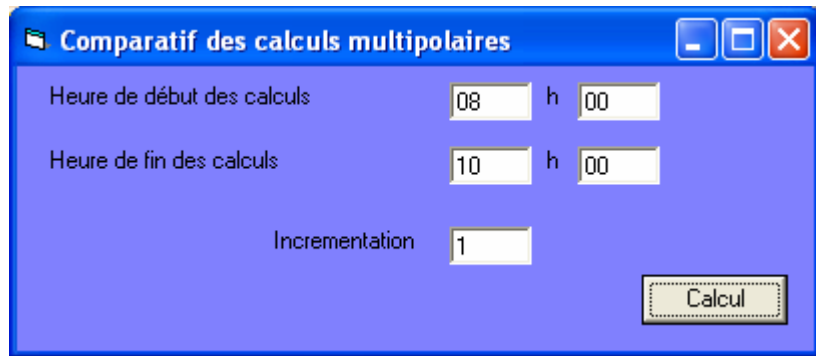


figure 40 Interface de comparaison de calculs multipolaires

D- Simulations basées sur l'offre et la demande (module OD)

Ce module permet de simuler les flux de voyageurs sur le réseau sans prise en compte des paramètres liés à l'information. Chaque agent est informé d'une éventuelle perturbation avant de partir. Les paramètres des perturbations sont implémentés avant que chaque agent calcule son itinéraire.

Ceci peut par exemple correspondre à des travaux, occasionnant une interruption de trafic sur une partie du réseau (ex : Travaux Castor l'été sur le RER-C, entraînant une interruption de circulation dans les deux sens entre Austerlitz et Invalides).

Il est possible de faire une simulation avec un agent uniquement. On sélectionne alors les caractéristiques du trajet qu'il doit effectuer. Dans le cas contraire, la demande est définie dans un fichier avec tous les enregistrements correspondant aux agents utilisant le réseau¹.

¹ Voir la description faite précédemment de la fonction *LecturefichierOD*.

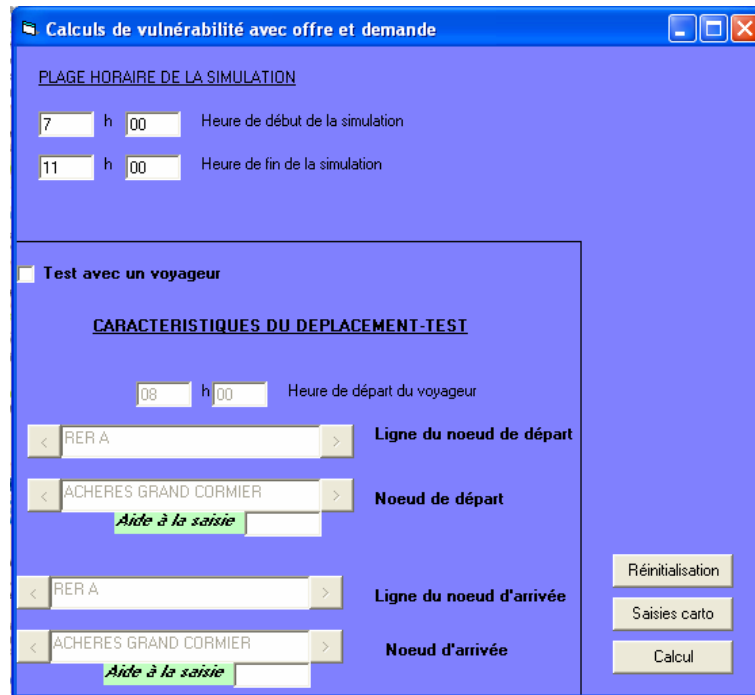


figure 41 Interface pour les simulations avec offre et demande

Étapes principales d'une simulation OD

1-Lecture du fichier indiquant heuredébutsimulation et heurefinsimulation

2-Implémentation des paramètres des perturbations

3-Appel de la fonction *lecturefichierOD*

4-Appel de la fonction *dijkstra_puisitinéraire*

5-Appel des fonctions *sortieheurearrivéeagentstrajetinitial*, *calculnombredepassagespararcinitial* et *calculnombredeminutespararcinitial*

6-POUR Date = heuredébutsimulation Jusqu'à heurefinsimulation

Appel de la fonction *action1véhicule*

Appel de la fonction *actionagents*

Appel de la fonction *action2véhicule*

Appel des fonctions *sortiepositionarcs*, *sortiepositionnœuds* et *sortiepositionvéhicules*

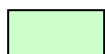
Date = Date +1 minute

FIN POUR

7-Appel des fonctions *sortieheurearrivéeagentstrajetréel*, *calculnombredepassagespararcréel* et *calculnombredeminutespararcréel*

8-Appel de la fonction *reinitialisationagentsetvéhicules*

9-Appel de la fonction *reprisecirculations*.



Phase de simulation



Phases pré et post simulation

encadré 8 Simulation OD

E- Simulations basées sur l'offre, la demande et l'information (ODI)

Par rapport au module OD, ODI intègre les paramètres de diffusion de l'information. Pour le paramètre lié au décalage entre le début et la fin de la perturbation, il est possible de sélectionner deux valeurs encadrantes. Ainsi, si on sélectionne 1 et 10 avec une valeur d'incrément de 1 minute, 10 simulations successives sont lancées avec comme paramètre 1, 2, 3...10 minutes de décalage entre l'heure de début de la perturbation et l'heure de la diffusion d'information. Il est par ailleurs possible d'indiquer si l'information est diffusée :

- dans les véhicules,
- uniquement sur les lignes perturbées ou sur l'ensemble du réseau.

figure 42 Interface pour les simulations avec offre, demande et information

Etapes principales d'une simulation ODI sans variation de la date de diffusion de l'information

1-Lecture du fichier indiquant heure début perturbation et heure fin perturbation

2-Lecture du fichier indiquant caractéristiques de diffusion de l'information, heure début simulation, heure fin simulation

3-Appel de la fonction *lecturefichierOD*

4-Appel de la fonction *dijkstra_puisitinéraire*

5-Appel des fonctions *sortieheurearrivéeagentstrajetinitial*, *calculnombredepassagespararcinitial* et *calculnombredeminutespararcinitial*

6-POUR Date = heure début simulation Jusqu'à heure fin simulation

SI Date = heure début perturbation

Implémentation des perturbations

FIN SI

SI Date = heure fin perturbation

Appel de la fonction *reprise_circulations*

FIN SI

Appel de la fonction *action1véhicule*

Appel de la fonction *actionagentsinfo*

Appel de la fonction *action2véhicule*

Appel des fonctions *sortiepositionarcs*, *sortiepositionnœuds* et *sortiepositionvéhicules*

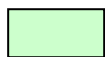
Date = Date +1 minute

FIN POUR

7-Appel des fonctions *sortieheurearrivéeagentstrajetréel*, *calculnombredepassagespararcréel* et *calculnombredeminutespararcréel*

8-Appel de la fonction *reinitialisationagentsetvéhicules*

9-Appel de la fonction *reprise_circulations*¹



Phase de simulation



Phases pré et post simulation

encadré 9 Simulation ODI sans variation de la date de diffusion d'information

¹ Au cas où la perturbation ne serait pas finie à la fin de la simulation.

Étapes principales de simulations ODI avec variation de la date de diffusion de l'information

1-Lecture du fichier indiquant heuredébutperturbation et heurefinperturbation

2-Lecture du fichier indiquant les caractéristiques de diffusion de l'information, heuredébutsimulation, heurefinsimulation, valeurincrémententation

3-Appel de la fonction *lecturefichierOD*

4-Appel de la fonction *dijkstra_puisitinéraire*

5-Appel des fonctions *sortieheurearrivéeagentstrajetinitial*, *calculnombredepassagespararcinitial* et *calculnombredeminutespararcinitial*

6-POUR heureinfo = heureinfo1 Jusqu'à heureinfo2

POUR date = heuredébutsimulation Jusqu'à heurefinsimulation

SI heure = heuredébutperturbation

Implémentation des perturbations

FIN SI

SI heure = heurefinperturbation

Appel de la fonction *reprisecirculations*

FIN SI

Appel de la fonction *action1véhicule*

Appel de la fonction *actionagentsinfo*

Appel de la fonction *action2véhicule*

Appel des fonctions *sortiepositionarcs*, *sortiepositionnœuds* et *sortiepositionvéhicules*

date = date +1 minute

FIN POUR

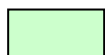
Appel des fonctions *sortieheurearriveeagentstrajetréel*, *calculnombredepassagespararcréel* et *calculnombredeminutespararcréel*

Appel de la fonction *reinitialisationagentsetvéhicules*

Appel de la fonction *reprisecirculations*

heureinfo = heureinfo + valeurincrémententation

FIN POUR



Phase de simulation



Phases pré et post simulation

encadré 10 Simulations ODI avec variation de la date de diffusion d'information

F- Simulations basées sur l'offre, la demande, l'information et la capacité (ODIC)

Comparativement au module ODI, ODIC prend en compte la contrainte de capacité sur les véhicules. Si le véhicule est déjà rempli à 100 %, l'agent doit attendre le suivant.

La différence se fait au niveau de la fonction *Actionagentsinfocapacite* (comparativement à la fonction *Actionagentsinfo*). Pour la montée des agents, on traite tout d'abord dans l'ordre tous les agents présents dans une file d'attente. Les agents réussissant à monter dans un véhicule sont enlevés de la file. On passe ensuite aux autres agents. Ceux qui n'arrivent pas à monter dans un véhicule sont placés à la suite dans la file d'attente.

Par ailleurs, plus l'agent a un numéro d'identifiant élevé, plus il subit les contraintes de capacité. Cela est lié aux règles de fonctionnement du modèle. Lorsque plusieurs agents arrivent sur un même nœud, on débute le traitement par ceux ayant l'identifiant le plus petit. Ensuite la définition d'une file d'attente fait que les agents n'ayant pu monter dans un véhicule sont prioritaires lorsque le suivant arrive.

Le reste des procédures est globalement identique à ce que l'on trouve avec le module ODI (sans variation de la date de diffusion de l'information). Une différence réside dans le fait qu'il n'y a pas la possibilité de définir au niveau de l'interface le trajet d'un seul agent (ce serait inutile pour des analyses avec contraintes de capacité).

Calculs de vulnérabilité avec offre, demande, information et capacité

PARAMETRES DE DIFFUSION DE L'INFORMATION

Information diffusée : uniquement dans les lignes concernées par la perturbation

Information disponible dans les noeuds du réseau : Oui

Information disponible dans les véhicules : Non

1 seul calcul
 Plusieurs calculs

Plage horaire de la simulation : 7 h 0 - 12 h 0

Décalage entre le début de la perturbation et la diffusion de l'information : 1ère valeur [] minutes

Calcul

figure 43 Interface pour les simulations avec offre, demande, information et capacité

Section 5 - Performance des traitements

Dans la mesure où cette thèse s'inscrit dans le champ de l'Aménagement de l'Espace et Urbanisme, l'optimisation informatique ne constitue pas un objectif majeur de ce travail. Le but est de concevoir un outil adapté à nos interrogations et facilement modifiable lorsque des questionnements nouveaux se posent à nous. En effet, « *l'intervention sur le modèle doit [...] être toujours possible pour que celui-ci soit un modèle de simulation en Aménagement assumant une fonction didactique, exploratoire ou prévisionnelle* » (Mathis, 2003).

Néanmoins, une certaine performance de l'outil est nécessaire si l'on souhaite que son champ d'utilisation et ses applications soient larges. En ce sens, il y a un intérêt scientifique évident pour nous à une rapidité des traitements dans la mesure où elle conditionne fortement le champ d'investigation des recherches.

En effet, comment travailler sur un réseau présentant une offre de transport très importante, entraînant des calculs lourds sans avoir à notre disposition un outil relativement performant ? Par ailleurs, au cours de la phase de test du modèle et de production de résultats, disposer d'un outil relativement efficace est déterminant car cela évite de perdre inutilement du temps.

C'est pourquoi nous avons choisi d'utiliser le langage C++, très performant pour les calculs, et travaillé dans une certaine mesure l'optimisation des algorithmes, notamment pour la fonction « *dijkstra* »¹, de loin la plus coûteuse en temps. Néanmoins, n'étant pas informaticien de formation, le code peut ne pas être totalement optimisé¹.

La rapidité des calculs dépend également de la capacité de l'ordinateur utilisé et des traitements demandés (offre de transport plus ou moins importante, nombre d'agents présents).

Les quelques valeurs, données ici à titre indicatif, correspondent à des calculs et simulations réalisés avec un micro-ordinateur présentant les caractéristiques suivantes :

- AMD Athlon™ 64 Processor
- 3000+
- 2.01GHz
- 1.00 Go de RAM.

Les calculs d'itinéraires unipolaires et de sommet à sommet sur le graphe d'Île-de-France (voir Partie III) sont effectués en environ 1 à 2 secondes. Le temps est approximativement le même pour les calculs unipolaires car le graphe est parcouru de manière arborescente dans les deux cas. Les calculs multipolaires correspondent dans notre cas à n calculs unipolaires successifs. Ainsi, sur le graphe Île-de-France (contenant 912 sommets), il faut environ 20 minutes pour effectuer un calcul multipolaire. Lorsque les calculs de sommet à sommet, unipolaires et multipolaires sont effectués toutes les minutes entre deux dates définies, la

¹ Un informaticien de formation trouverait certainement des moyens d'améliorer les rapidités de traitement au niveau de certaines fonctions.

même fonction est appelée autant de fois que nécessaire. Plus le graphe présente un nombre limité de sommets et d'horaires, plus les calculs sont rapides.

Les simulations avec les agents (OD, ODI et ODIC) peuvent prendre beaucoup de temps. En effet, tous les agents calculent tout d'abord leur itinéraire. Une procédure permet de grouper les calculs pour les agents ayant la même origine, la même destination et la même heure de départ. Pour une simulation avec un agent en Île-de-France, le temps de traitement est faible (quelques secondes). Pour une simulation avec 60 000 agents en Île-de-France sur une plage horaire de 4h à 23h30, nous avons les durées suivantes :

- calcul des itinéraires : 50 minutes (le regroupement des calculs pour les agents ayant les mêmes caractéristiques de déplacement fait gagner du temps car cela fait passer le nombre de calculs de 60 000 à 2 500¹) ;
- simulation des déplacements : 1h40.

Pour un graphe d'une centaine de sommets avec des fréquences de lignes de 5 à 10 minutes, une simulation avec un seul agent dure quelques secondes. Pour une simulation avec 50 000 agents, le calcul d'itinéraire avant départ dure environ 15 minutes. Pour une simulation OD, la durée de simulation des déplacements sur la plage horaire 6h-12h est ensuite d'environ 5 minutes. Pour une simulation ODIC avec de problèmes de capacité très importants, cette durée est d'environ 50 minutes.

Le modèle n'est pas limité en nombre d'agents. Des contraintes peuvent toutefois venir du manque de disponibilité de la mémoire vive du micro-ordinateur utilisé et des temps de traitement qui peuvent devenir trop importants et rendre l'outil inutilisable en pratique.

Section 6 - Validité du modèle

Il convient de s'assurer de la validité du modèle avant de pouvoir l'utiliser dans le cadre de scénarii. « *On ne construit pas un modèle sans avoir pu juger de sa pertinence à mettre en évidence des mécanismes, ou simuler des phénomènes* » (Baptiste, 1999). Des hypothèses de travail ont été faites, des choix réalisés, influençant la nature du modèle et ses implications sur le plan des résultats qu'il est susceptible de fournir.

Tout d'abord, force est de constater l'extrême difficulté d'une telle tâche. Nous pouvons bien évidemment vérifier la justesse sur le plan algorithmique du modèle mais il est très difficile de s'assurer de la correspondance entre les simulations effectuées et la réalité. Cette difficulté, valable pour la plupart des modèles, est particulièrement présente dans notre cas dans la mesure où nous modélisons le comportement d'individus de façon très simplifiée, ce qui induit nécessairement des approximations.

¹ Voir dans le chapitre I de la partie III les simulations avec plusieurs agents.

Toutefois, il est clair que la reproduction très fidèle de la réalité n'est pas notre objectif initial de travail car cette problématique se heurte par ailleurs à la qualité des données disponibles. Des enrichissements du modèle seraient également nécessaires.

Il s'agit plutôt d'étudier, de manière exploratoire, les interrelations entre les paramètres de notre modèle, réalisé à partir d'hypothèses de travail très strictes. Nous rejoignons partiellement ici les propos d'E. Holm et L. Sanders lorsqu'ils évoquent les « mondes artificiels » : « *certaines applications reposent sur des mondes complètement artificiels. L'enjeu est alors de tester, d'un point de vue théorique, les effets de différentes règles de comportement individuel ou de différentes configurations initiales, sans chercher à reproduire une situation observée précise* » (Holm et Sanders, 2001).

La validité du modèle repose en premier lieu sur la cohérence entre nos hypothèses de travail (définies pour simplifier la réalité) et le fonctionnement du modèle. Le modèle a été développé pour répondre à nos questionnements. Il a un champ de validité (globalement les questions et hypothèses soulevées dans le cadre de cette recherche) qu'il convient de respecter.

Nous touchons ici un point sensible de tout travail de modélisation. En effet, le problème lié à un modèle peut parfois plus venir d'utilisations de celui-ci à mauvais escient que d'un problème intrinsèque. La question de la qualité des données en entrée se pose également. Afin que le modèle fonctionne correctement, celles-ci doivent respecter certaines contraintes que nous avons évoquées. Le modèle PERTURB ne doit pas être considéré comme un outil « clef en main ». Il s'agit d'une application développée pour répondre à des questions de recherche et qui doit pouvoir continuer à évoluer.

Par ailleurs, de nombreux points restent à éclaircir : comment diffuser l'information ? Comment l'information est-elle perçue ? Autant de paramètres déterminants qui ne sont pas pris en compte d'une façon tout à fait précise dans le modèle. Ce type d'approche doit être complété pour être efficace par une bonne connaissance pratique du fonctionnement du réseau et des supports d'information disponibles.

Pour les modules ne prenant pas en compte les agents (modules Prelim et O), la question de la validité se pose moins. Nous avons adapté l'algorithme de Dijkstra pour réaliser des calculs de plus court chemin et effectuer différentes sorties fichiers.

De manière générale, de nombreux tests ont été faits pour s'assurer de la validité de l'application et du bon fonctionnement des algorithmes. Néanmoins, comme toute application informatique, ce n'est qu'en l'éprouvant via une utilisation intensive sur des cas multiples qu'une fiabilité presque totale pourra être atteinte.

Conclusion

Après avoir présenté au cours du chapitre II les fondements théoriques sur lesquels le modèle développé repose, ce chapitre a été consacré à sa présentation. Il est surtout un outil d' « aide à la réflexion » dans le sens où il participe à une démarche de recherche en permettant de mesurer des critères liés à la vulnérabilité d'un système de transports en commun.

La modélisation effectuée est basée sur des objets dont certains possèdent des caractéristiques particulières (les agents), cette approche ayant été possible grâce à l'approche systémique menée au préalable.

Nous nous sommes interrogés sur la validité et le domaine de pertinence de l'outil. Toutefois, cette modélisation en appelle d'autres qui viendront compléter notre approche afin d'enrichir la réflexion dans le domaine de la vulnérabilité des transports et celui plus spécifique du rôle de l'information dans la gestion des perturbations. En effet, *« il n'y a pas de modélisation parfaite, et surtout, il n'y a pas une seule modélisation. Les choix potentiels sont multiples, et il est de bonne méthode d'utiliser la large gamme de possibilités qu'ils offrent pour faire progresser la connaissance, sans repli frileux ou sectaire sur telle ou telle méthode de modélisation de l'espace »* (Durand-Dastès, 2001).

Le modèle constitue un outil permettant d'appréhender la vulnérabilité de manière générale et plus spécifiquement l'importance des voyageurs dans la régulation, à travers l'information diffusée et les modifications de comportements potentiels.

Les analyses possibles grâce à PERTURB sont par ailleurs facilitées grâce au développement d'une plate-forme de simulation, utile notamment pour faire varier les paramètres du système de transport...

CHAPITRE IV PLATE-FORME DE SIMULATION

Introduction

Après avoir présenté le modèle PERTURB, conçu pour répondre à nos questionnements sur la vulnérabilité structurelle et fonctionnelle, il est maintenant utile de présenter la plate-forme de simulation, mise en place pour ce travail de recherche. Celle-ci associe :

- MAPNOD¹ (avec des compléments, notamment un module de visualisation dynamique),
- des programmes de génération de systèmes de transport théoriques,
- PERTURB.

PERTURB prend en entrée des fichiers contenant l'offre de transports en commun, les éventuelles données sur les agents et plusieurs paramètres (perturbation, diffusion de l'information...) en fonction des modules utilisés. Il est intéressant de pouvoir faire facilement varier ces entrées afin d'observer les conséquences sur les résultats obtenus en sortie de PERTURB. Un système de transport théorique doit pouvoir être développé ex-nihilo, moyennant certaines contraintes.

Néanmoins, il n'est pas envisageable de prendre en compte tous les paramètres de création d'un système de transport (négociation entre opérateur et acteurs du territoire, choix des décideurs...). Ce travail spécifique a plus pour vocation de faire varier différentes caractéristiques que de représenter très fidèlement une offre et une demande réelles sur un territoire. Néanmoins, ce travail exploratoire est susceptible d'ouvrir de nouvelles pistes de recherches intéressantes, au-delà du travail effectué dans le cadre de cette thèse.

Ainsi, quatre applications nous permettent de faire varier les caractéristiques de ces entrées :

- le modèle *RES*, développé par H. Baptiste, afin de générer une population et un réseau initial ;
- le programme *Maillage*, pour supprimer un nombre d'arcs défini sur le réseau, selon certaines règles ;

¹ Logiciel développé par L. Chapelon et A. L'Hostis, anciens doctorants du Laboratoire.

- le programme *Créationlignes*, dont le but est la génération sous contraintes de lignes de transport (avec leurs horaires) utilisant le réseau de transport obtenu suite au programme *Maillage* ;
- le programme *Générationdemande*, générant automatiquement une base de données avec les origines, destinations et heures de départ des agents à partir des populations affectées aux nœuds du réseau et du réseau de transport. Le fichier peut être ensuite lu par PERTURB pour l'implémentation des caractéristiques des agents (*fonction lecturefichierOD*).

Excepté le modèle RES, conçu par H. Baptiste, toutes les applications suivantes ont été développées dans le cadre de cette recherche. Elles ont néanmoins utilisé le savoir-faire du Laboratoire, notamment pour l'utilisation de l'algorithme de Floyd de calcul des chemins minimaux¹. De même que PERTURB, toutes ces applications ont été développées en langage C++.

Ces applications doivent être utilisées les unes après les autres afin de tenir compte de la nature logique de la conception du système de transport. Il est par ailleurs possible de travailler sur la base d'un graphe conçu manuellement, en amont de l'utilisation de *Créationlignes* ou d'effectuer des modifications manuelles à chaque étape.

Mais se pose alors la question suivante : comment coordonner l'utilisation de ces applications avec PERTURB ? De plus, la visualisation des données de base ainsi que des résultats nécessite la création d'une interface conviviale pour effectuer des simulations en raison de « *l'importance considérable de l'imagerie dans le domaine des réseaux, tout à la fois comme visualisation d'une structure complexe, comme mode de présentation efficace des résultats, comme outil de diagnostic et outil de recherche, et enfin comme moyen de communication* » (Mathis, 2003).

Le choix a été fait d'adapter à nos besoins le logiciel MAPNOD, développé par A. L'Hostis et L. Chapelon. Ainsi, nous conservons le langage Visual Basic pour les aspects avantageux concernant la facilité à générer une interface graphique et effectuons une passerelle vers nos applications en C++ (ou Visual Basic dans le cas de RES et de l'interface de PERTURB) pour la réalisation des calculs.

L'architecture de la plate-forme de simulation est représentée sur la *figure 44*. Les numéros correspondent à l'ordre logique d'utilisation des applications. Quelques opérations manuelles sont nécessaires entre les différentes étapes. PERTURB peut également être directement utilisé avec des données correspondant à un système de transport réel.

¹ Voir (Chapelon, 1997).

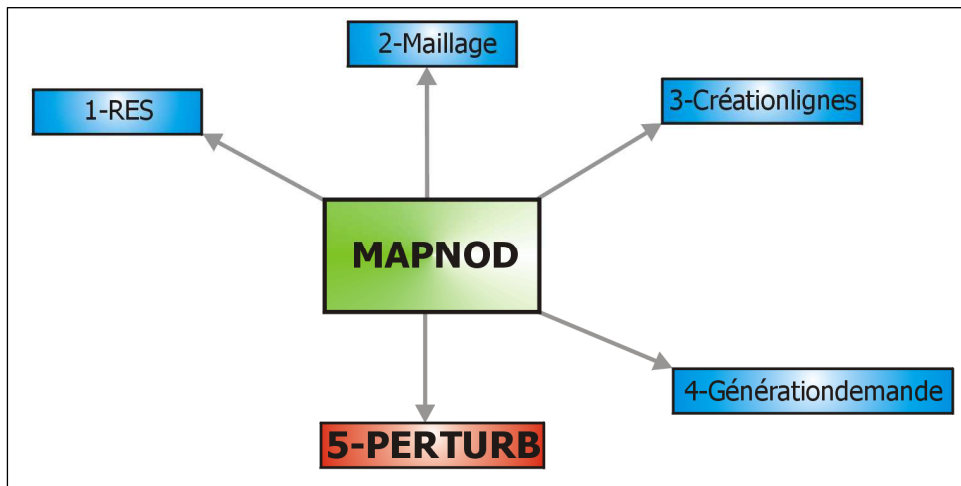


figure 44 Architecture de la plate-forme de simulation

Nous présentons ainsi successivement ces applications (excepté PERTURB) en commençant par le logiciel MAPNOD, sur lequel nous avons effectué quelques adaptations à la marge.

Section 1 - MAPNOD¹

A- Présentation générale²

MAPNOD est un outil de modélisation des réseaux de transport basé sur la théorie des graphes. Il comprend des fonctions d'édition et de modification des graphes, permettant de travailler sur les sommets et les arcs, en création, modification ou suppression. Il contient également de nombreuses fonctionnalités de calcul. Les résultats peuvent être utilisés pour la réalisation de cartes. Nous présentons ici quelques caractéristiques de ce logiciel de recherche évolutif qui constitue l'interface graphique de base de notre plate-forme de simulation. La *figure 45* montre l'interface générale de MAPNOD ainsi que la boîte de dialogue d'édition des arcs du graphe.

¹ La version originale de MAPNOD est disponible en ligne à l'adresse suivante : <http://mapnod.free.fr>.

² Présentation basée sur (Chapelon (dir.), 2005).

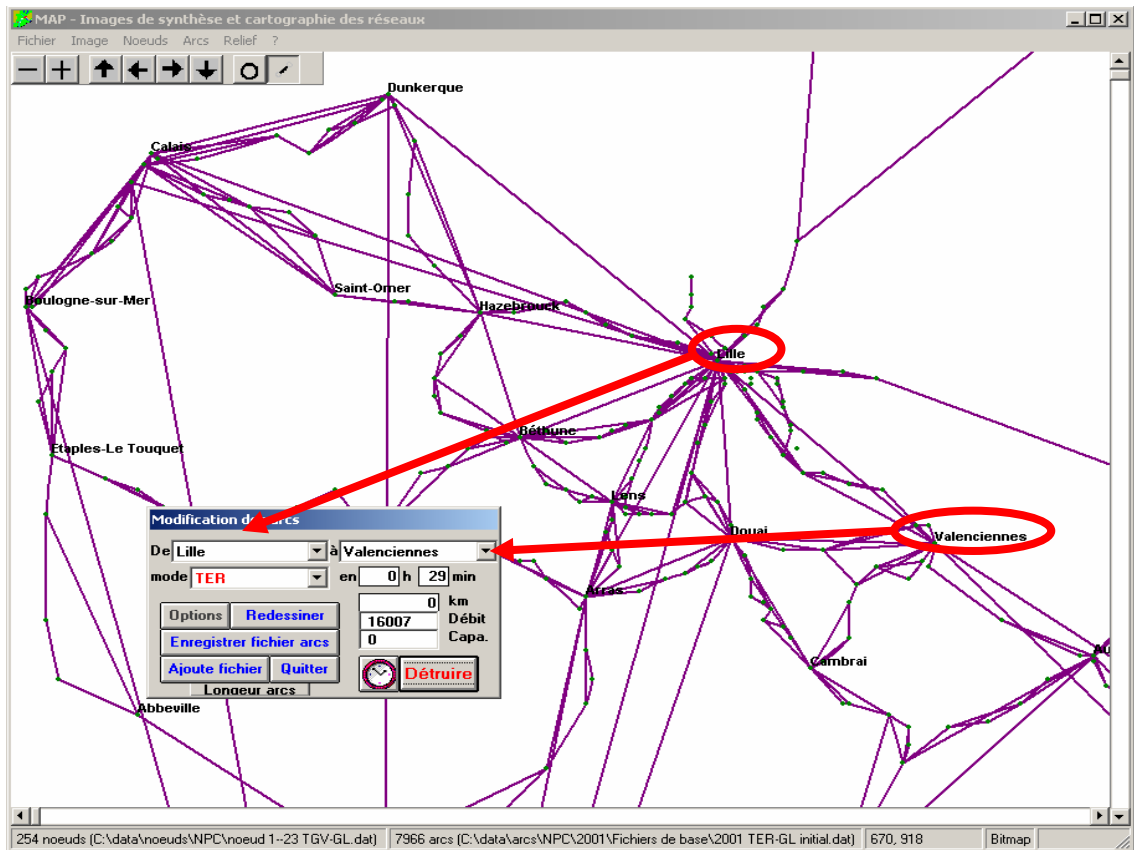


figure 45 Interface de MAPNOD : édition des arcs du graphe

Un arc est caractérisé dans l'environnement de MAPNOD par un sommet d'origine et un sommet de destination ainsi que par un mode de transport. La figure 45 montre l'édition de l'arc en mode TER entre Lille et Valenciennes. S'agissant des graphes horaires, MAPNOD prend en charge la gestion d'un p-graphe, c'est-à-dire un multigraphe d'épaisseur p , dans lequel chaque couche correspond à un horaire.

MAPNOD contient des modules de calculs sur les graphes. Nous utilisons ici uniquement les fonctionnalités graphiques de MAPNOD.

B- Adaptation à nos besoins

Quelques adaptations ont dû être effectuées. Nous avons créé un module spécifique d'implémentation des paramètres pour le lancement des différentes applications (*Maillage*, *Génération demande...*)¹.

¹ Voir dans la partie descriptive de chaque application.

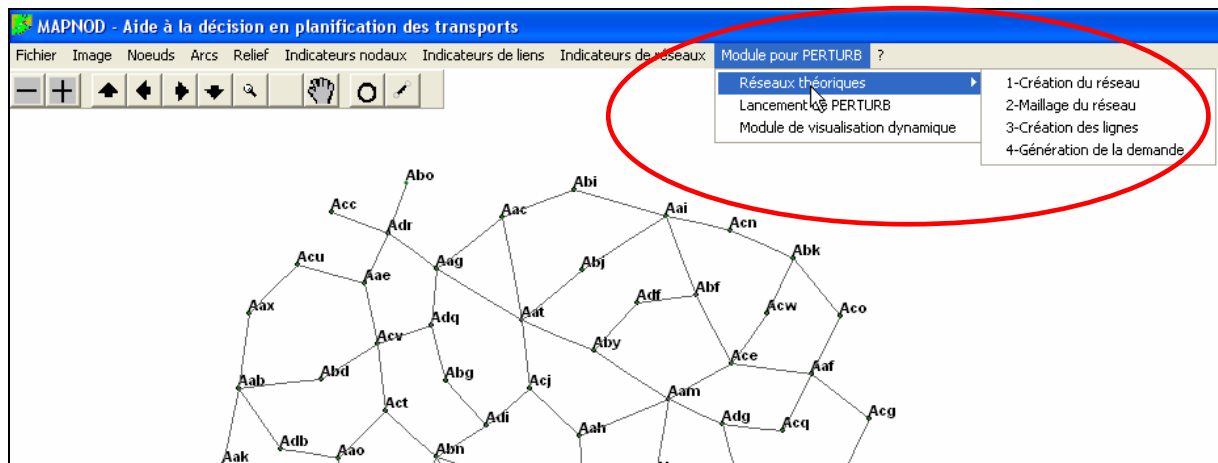


figure 46 Ajout d'un module spécifique à MAPNOD

De plus, dans la mesure où nous étudions un phénomène spatio-temporel, un module de visualisation dynamique a été développé dans le but d'observer des phénomènes au cours du temps. En effet, « une animation, avec la possibilité d'effectuer des "arrêts sur image", autorise une bonne lecture de la représentation et permet une exploration systématique du modèle » (L'Hostis, 1997).

Ce module permet de visualiser de façon dynamique :

- le processus de suppression des arcs du réseau (suite au lancement de *Maillage*),
- le processus de création des lignes (suite au lancement de *Création lignes*),
- la variabilité des itinéraires entre deux nœuds du réseau (suite au lancement du module O ou Prelim de PERTURB),
- les flux d'agents sur le réseau au cours du temps (modules OD, ODI, et ODIC de PERTURB).

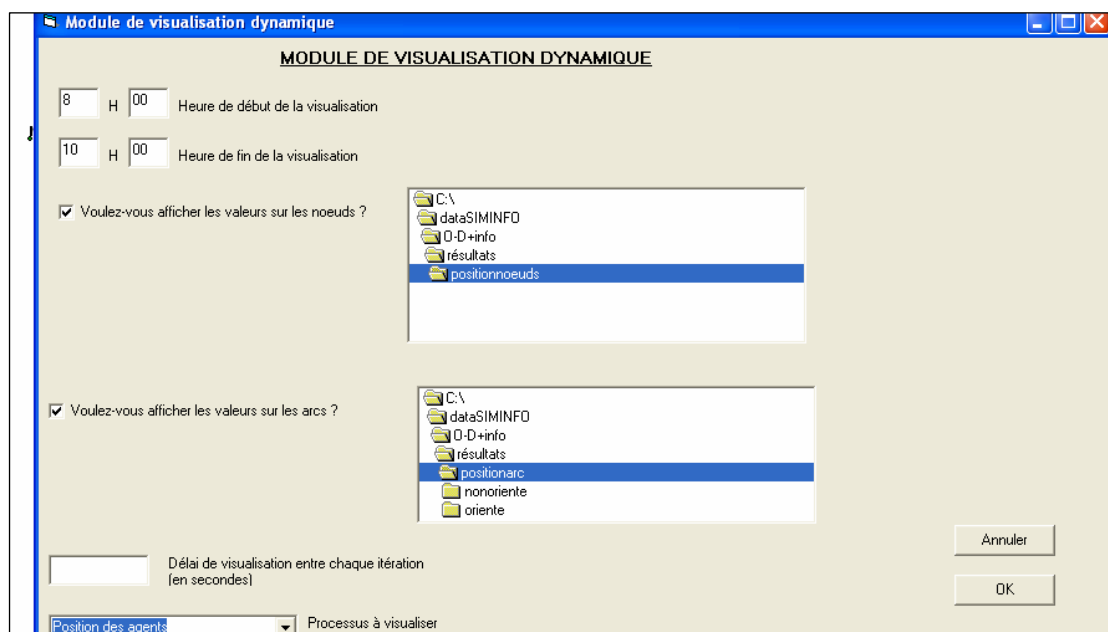


figure 47 Interface du module de visualisation dynamique

Afin de pouvoir représenter l'évolution de l'heure au cours d'une simulation, le module de statistiques de MAPNOD a été modifié. Des champs heure et minute ont été ajoutés ainsi qu'un bouton « Pause » pour stopper le processus de visualisation.

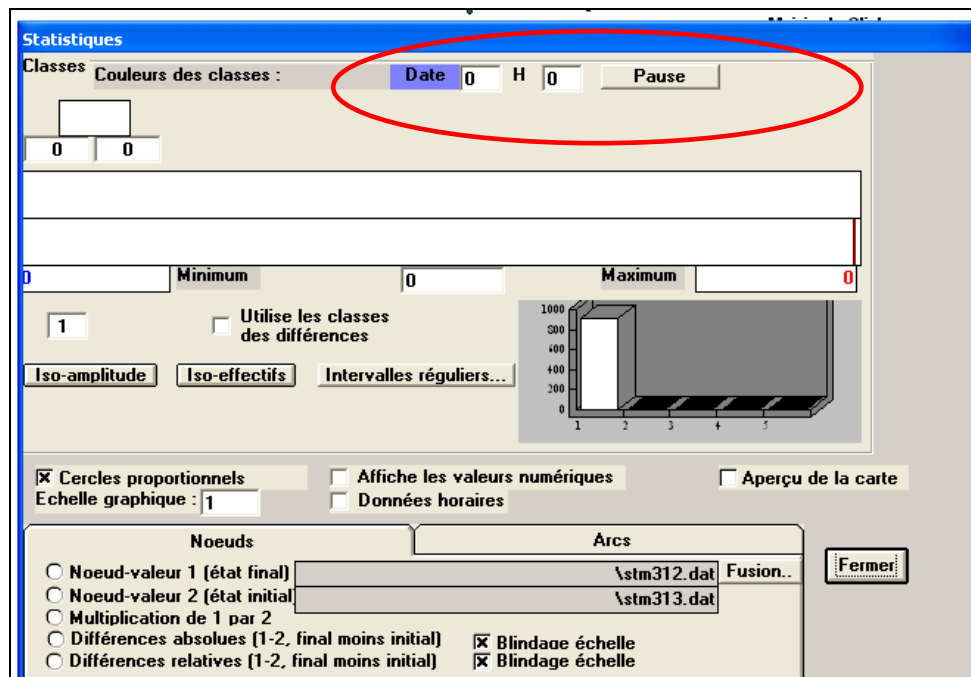


figure 48 Adaptation du module Statistiques de MAPNOD

Section 2 - RES

Le programme *RES* développé par H. Baptiste (Baptiste, 1994) permet, au sein d'un espace théorique, la génération aléatoire (mais sous contraintes) de nœuds avec affectation de population et d'un réseau de transport routier les connectant. Celui-ci a initialement été développé pour représenter un espace et un réseau routier au niveau départemental.

En l'utilisant, nous pouvons aisément faire varier en plus des dimensions de l'espace certaines propriétés :

- Population :
 - nombre de nœuds,
 - répartition des nœuds dans l'espace théorique,
 - affectation des populations sur ces derniers (en faisant varier le coefficient d'élasticité¹).
- Au niveau du réseau de transport :
 - maillage du réseau.

¹ Utilisation de la Loi Rang-taille. Cette Loi, formulée par Zipf (à partir de travaux préexistants), est de la forme suivante : $r \times P^q = K$, où r est le rang de la population P d'une ville (le rang étant déterminé par un tri décroissant des tailles de ville), q est un exposant qu'il définit comme le rapport entre les intensités des forces de diversification et d'unification (coefficient d'élasticité), K est une constante. Voir par exemple (Baptiste, 1999) pour un approfondissement théorique.

Paramètres de départ

GENERATION AUTOMATIQUE DE RESEAUX

Distribution des villes

Distribution de type :

- Régulier (Maille carrée)
- Régulier (Christaller)
- Planarité géométrique
- Christaller pur Marché
- Planarité Delaunay
- Christaller pur Trafic
- Delaunay region : 4

Paramètres des villes

Valeur du nombre aléatoire	6
Valeur de l'élasticité	1.3
Nombre de communes	300
Dist. mini entre villes (km)	7

Population

132 000 Habitants

Considérer :

- La ville principale
- Le département
- les deux (ajustement de Zipf)

Dimensions de l'espace

Largeur : 100 Km

Hauteur : 110 Km

Paramètres des arcs

Longueurs minimales	Longueurs maximales	Nombre d'arcs maximum
0 km	8 km	6

OK

Quitter

figure 49 Interface principale de RES

Les caractéristiques liées à la répartition de la population au sein de notre espace théorique sont importantes dans la mesure où elles exercent une influence sur les choix opérés en matière d'Aménagement des transports même si ces derniers sont plus ou moins volontaristes. En effet, les réseaux de transport et les services associés sont développés dans le but de répondre à une demande de mobilité. Les choix ne peuvent être effectués indépendamment de l'environnement dans lequel le système de transport s'inscrit.

Cinq caractéristiques de l'environnement urbain sont fondamentales (CERTU, 2004) :

- la taille de l'agglomération ;
- la polarisation de l'espace urbain ;
- la densité ;
- la répartition spatiale des générateurs de déplacements, variable même à polarisation et densité urbaine identiques¹ ;
- le niveau et la configuration de l'offre d'espace de circulation et de stationnement.

¹ La répartition dans l'espace urbain de l'habitat, de l'emploi et des équipements publics ou privés générateurs de trafic (lycées, hôpitaux, centres commerciaux, piscines, multiplexes, etc.) engendre une demande de déplacement qui a une configuration spatiale et temporelle originale, propre à chaque agglomération (CERTU, 2004).

Grâce à *RES*, il est possible de prendre en compte les quatre premières caractéristiques :

- la taille de notre espace d'étude, grâce aux dimensions (largeur et hauteur) choisies ;
- la densité grâce à la population totale ;
- la polarisation grâce au nombre de nœuds choisis, à la valeur d'élasticité¹ et à la distance minimale entre deux nœuds² ;
- la répartition spatiale des générateurs de déplacement en faisant varier la valeur du nombre aléatoire.

Signalons que nous pouvons également choisir de travailler sur un espace de forme rectangulaire ou arrondie et que la distribution des nœuds peut se faire selon un maillage carré ou triangulaire. Nous utilisons ainsi *RES* pour la génération de la population de notre espace théorique. Il est éventuellement possible de faire ensuite des modifications manuelles.

Pour le réseau de transport, nous pouvons utiliser *RES* pour la topologie du réseau. Mais nous nous limitons dans l'utilisation de *RES* à la génération de graphes planaires saturés³ (avec triangulation de Delaunay⁴) ou de graphes à maille triangulaire homogène. Ce n'est qu'ensuite, grâce à l'application *Maillage* que nous faisons évoluer la topologie du réseau. Nous n'utilisons donc qu'une partie des possibilités de *RES*.

Section 3 - Application Maillage

A- Objectifs et principes

Le maillage d'un réseau correspond à son inscription infrastructurelle sur un espace, le socle sur lequel peuvent ensuite être proposés des services de mobilité par des opérateurs. Le réseau peut être très maillé ou au contraire très centralisé.

La distribution de la population est souvent l'élément-clé dans le choix du maillage d'un réseau. En effet, au niveau des pôles importants, le réseau se rapproche de sa forme maximale au contraire de zones faiblement peuplées. Néanmoins, des choix plus ou moins volontaristes peuvent être effectués.

Pouvoir faire varier le maillage est nécessaire dans notre approche. En effet, plus un réseau est maillé et plus les itinéraires possibles pour se rendre d'un nœud à un autre sont nombreux, ce qui offre des alternatives en cas de perturbation sur une des lignes.

L'application *Maillage* permet de faire varier aisément le maillage du réseau théorique. Le principe est basé sur des calculs classiques en matière de vulnérabilité⁵. A chaque itération, on

¹ L'élasticité correspond à l'élasticité dans la loi Rang-taille de Zipf. Dans le cas où l'utilisateur choisit à la fois la population totale de l'espace et celle du nœud le plus peuplé, le modèle détermine automatiquement la valeur du coefficient d'élasticité correspondant.

² Plus la valeur de celle-ci est élevée, plus la répartition des nœuds est homogène.

³ Un graphe planaire est qualifié de saturé lorsqu'on ne peut ajouter aucun arc sans lui faire perdre sa planarité (Mathis, 2003).

⁴ Pour une explication sur la triangulation de Delaunay, voir par exemple (Baptiste, 1999).

⁵ Voir par exemple les travaux réalisés dans le cadre d'ESPON 1.2.1, présentés au cours du chapitre II de cette partie.

détermine pour chaque arc quelle est la conséquence de sa suppression sur le nombre de minutes passées sur le réseau. On choisit d'enlever l'arc qui minimise cette valeur.

Pour déterminer les flux potentiels de nœud à nœud (nécessaire pour le calcul du nombre de minutes sur le réseau), un modèle gravitaire est utilisé. La formule retenue est la suivante :

$$\text{Flux (i, j)} = \frac{P(i) * P(j)}{t(i, j)^2}$$

Flux (i, j) représente la demande de déplacement entre les nœuds i et j, P(i) et P(j) les populations de i et j et t(i,j) le temps de parcours de i à j par le chemin le plus court. Ce temps de parcours est pour le moment « artificiel » dans la mesure où aucune offre de transport n'est encore définie. Le temps de parcours correspondant à chaque arc est par défaut proportionnel à sa distance (pas d'hétérogénéité du réseau avec des arcs à vitesse variable). Il est possible de jouer sur ce temps afin de péjorer plus ou moins les relations entre les nœuds éloignés.

B- Entrées et sorties

L'application *Maillage* est lancée directement depuis MAPNOD.

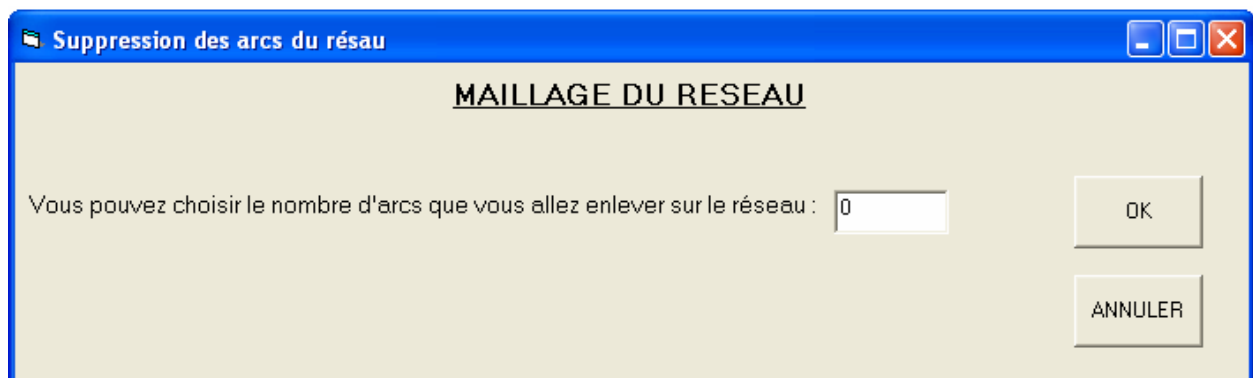


figure 50 Lancement de Maillage depuis MAPNOD

Les entrées de l'application sont :

- un fichier des sommets,
- un fichier des arcs,
- un fichier indiquant le nombre d'arcs à supprimer (ce fichier est généré par MAPNOD).

Les sorties de l'application sont :

- un fichier des arcs après chaque boucle de suppression (afin de générer en une seule fois de nombreux fichiers avec des degrés de maillage différents),
- un fichier avec le sommet d'origine et le sommet de destination de l'arc supprimé après chaque boucle de suppression (pour visualisation dynamique du processus dans MAPNOD),
- le fichier des arcs au terme du processus.

C- Principales étapes

Les principales étapes de l'application sont les suivantes :

- 1-Détermination du nombre d'arcs à supprimer
- 2-Calcul des plus courts chemins par l'algorithme de Floyd et implémentation de la matrice des précédents¹
- 3-Calcul à partir du modèle gravitaire des flux de sommet à sommet
- 4-Boucles de suppression
 - POUR 1 JUSQU'AU nombre d'arcs à supprimer
 - POUR tous les arcs
 - Réinitialisation des matrices
 - Recalcul des plus courts chemins par l'algorithme de Floyd
 - Calcul du nombre de minutes total pour connecter tous les sommets du graphe 2 à 2². Si cette valeur est la plus faible trouvée, on la conserve et on garde en mémoire l'arc pour la suppression
 - FIN POUR
 - Sortie fichier de l'arc supprimé
 - Sortie fichier de l'état actuel de maillage du réseau
 - Remise à 0 des valeurs avant nouvelle itération
 - FIN POUR
- 5-Sortie fichier de l'état final de maillage du réseau (après toutes les suppressions)

encadré 11 Principales étapes de l'application Maillage

L'application arrête de supprimer des arcs si toute nouvelle suppression a pour conséquence de rendre le graphe non connexe : tous les arcs sont des isthmes³. Ainsi, dans le cas extrême, on obtient un arbre⁴. Pour un graphe de 100 sommets et 261 arcs, le temps de traitement nécessaire pour supprimer 162 arcs est d'environ 3 minutes.

Les animations vidéos **SUPPR_ARCS-1**, **SUPPR_ARCS-2** et **SUPPR_ARCS-3** montrent trois exemples du processus de suppression des arcs.

A chaque étape, le temps nécessaire pour connecter tous les nœuds du réseau entre eux augmente (sauf au début). La *figure 51* montre que l'augmentation est de plus en plus importante à chaque étape. Elle correspond au cas de l'animation **SUPPR_ARCS-3**.

¹ L'algorithme de Floyd permet de calculer les temps de parcours entre tous les nœuds du réseau. La génération de la matrice des précédents permet ensuite de reconstituer les itinéraires entre les nœuds. Pour plus de détails, voir par exemple (Chapelon, 1997).

² Chaque relation est pondérée par les résultats obtenus avec le modèle gravitaire.

³ Voir la présentation de la théorie des graphes dans le chapitre II de cette partie.

⁴ Un graphe non orienté est un arbre si et seulement si chaque paire de sommets est reliée par un circuit simple et unique. Notre graphe est orienté mais il est symétrique, on peut donc parler ici d'arbre.

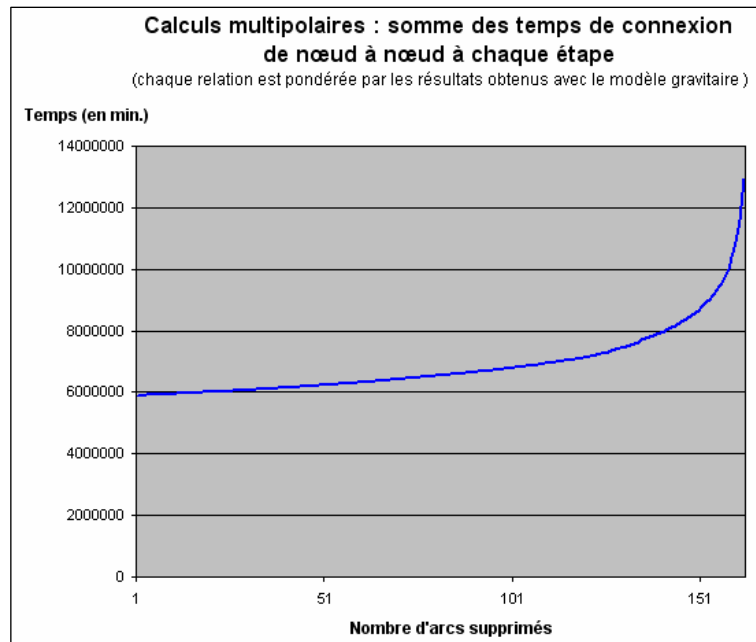


figure 51 *Calculs multipolaires : somme des temps de connexion de nœud à nœud à chaque étape (exemple)*

Ainsi, l'application *Maillage* permet de choisir le degré d'extensivité de l'exploitation (maillage). Le degré d'intensité (fréquence des circulations) et la hiérarchisation des axes sont ensuite implémentés grâce à l'application *Créationlignes*.

Section 4 - Application *Créationlignes*

A- Objectifs et principes

Les lignes d'un réseau de transport en commun sont structurées en lignes, induisant plus ou moins de correspondances pour les voyageurs. Par ailleurs, les axes sont plus ou moins hiérarchisés : plus l'agglomération est grande, plus le réseau a tendance à se hiérarchiser. La hiérarchisation du réseau ne s'élabore pas selon le seul critère de la capacité mais aussi selon les critères de vitesse, de longueur d'interstations, etc.

Ainsi, « *le réseau est dit peu hiérarchisé si les systèmes qui le composent sont à peu près équivalents, en termes de matériel, de capacité, de qualité de service,... Il sera dit très hiérarchisé si la différenciation fonctionnelle conduit à de fortes différences de nature de systèmes et de qualité de service* » (CERTU, 2004)¹. Dans les agglomérations urbaines, la mise en place d'un TCSP² est l'exemple type de cette hiérarchisation de l'offre par la massification des services là où le potentiel linéaire domine et où le transport collectif peut avoir une grande efficacité. « *En créant des axes lourds en site propre, appelés quelquefois*

¹ A cet égard, la région parisienne présente une offre de transport où l'on trouve presque tous les niveaux dans la hiérarchisation de l'offre : trains, RER, métros (avec différenciation entre Météor et les autres lignes), tramways et tram-train, bus rapides, bus classiques.

² Transport en Commun en Site Propre.

«corridors», on bâtit un «réseau armature» qui se complétera par des lignes secondaires » (CERTU, 2004). Il s'agit d'un intermédiaire entre réseau maillé et réseau avec Hub(s).

Les choix effectués dépendent de la demande mais peuvent être plus ou moins volontaristes en raison des missions de service public assurées par les opérateurs. Par exemple, le choix du débit horaire d'une ligne doit résulter d'une réflexion sur la structuration du réseau que l'on souhaite mettre en place et la fonction que cette ligne doit assurer au sein de ce réseau. C'est l'analyse de la demande en déplacement sur cet itinéraire, intégré dans son contexte de réseau, qui définit la fréquentation potentielle de la ligne en heures de pointe (débit horaire maximal).

Cette évaluation de la fréquentation à l'hyperpointe du trafic dimensionne souvent le système dans le but :

- d'éviter les problèmes de surcharge toujours préjudiciables au confort des voyageurs et au bon fonctionnement des flux d'entrée et de sortie aux points d'arrêt les plus fréquentés,
- de tenir compte de l'évolution potentielle de la demande, tout en évitant, pour des raisons financières, une surcapacité de l'offre trop importante (CERTU, 2004), parfois au détriment d'une certaine redondance.

L'absence de surcapacité peut être très contraignante lorsque certaines parties du réseau connaissent des dysfonctionnements car il n'y a pas de report possible sur des itinéraires de substitution, en raison du manque de redondance¹.

Il est difficile de prendre en compte tous ces aspects dans notre application. Néanmoins, il doit être possible de faire varier des paramètres aisément (ex : fréquences, superpositions plus ou moins nombreuses de lignes). Par ailleurs, il doit être possible de choisir la plage horaire sur laquelle nous créons l'offre.

Nous ne prenons pas en compte ici le critère distance inter-stations². De manière générale, celle-ci est liée à l'« adhérence » du mode à l'espace (Amar, 1993). Plus celle-ci est faible, plus les points d'accès et de sortie sont espacés. Plus un type de mouvement est « discontinu » et plus il doit être complété par des types plus « adhérents » lors de ses phases terminales sous peine de perdre beaucoup de son intérêt.

B- Entrées et sorties

L'application *Créationlignes* est lancée directement depuis MAPNOD.

¹ Voir dans la Partie III les simulations intégrant les contraintes de capacité.

² Ceci pourrait être possible dans le cadre d'une évolution du programme *Créationlignes*.

figure 52 Lancement de Créationlignes depuis MAPNOD¹

Les entrées de l'application sont :

- un fichier des sommets ;
- un fichier des arcs ;
- un fichier avec les paramètres pour la création des lignes : nombre de superposition maximal de lignes par arc, longueur minimale d'une ligne (en nombre d'arcs), intervalles minimum et maximum entre deux circulations, temps de parcours minimum et facteur de hiérarchisation des fréquences, début de plage horaire, fin de plage horaire (ce fichier est généré directement par MAPNOD).

Le facteur de hiérarchisation des fréquences définit les écarts de fréquence entre lignes. Si l'intervalle minimum entre deux circulations est de 10 minutes et le facteur de hiérarchisation est de 2, aucune ligne ne pourra avoir un intervalle entre deux circulations supérieur à 20 minutes. Le facteur de hiérarchisation pour les vitesses n'est pas utilisé.

Les sorties de l'application sont :

- fichiers avec les caractéristiques des lignes (notamment pour la visualisation dynamique de la construction des lignes dans MAPNOD) ;
- fichier de l'offre de transport (graphe temporisé au format PERTURB) ;
- fichiers pour le référentiel PERTURB (ces fichiers servent à constituer la base ACCESS reprenant les caractéristiques de l'offre de transport et utile notamment pour sélectionner des points d'arrêts et des lignes dans les menus de PERTURB).

C- Principales étapes

Le principe de fonctionnement de l'application est le suivant. Après avoir calculé les potentiels de flux entre chaque nœud du réseau à l'aide d'un modèle gravitaire (comme avec l'application précédente), on procède tout d'abord à la structuration des lignes. Pour chaque couple de nœuds du réseau, on met en place une ligne test. En partant du nœud *i*, on se dirige

¹ On voit sur l'interface qu'il serait à terme possible de distinguer des lignes de trains, tramways et métros (par défaut, ce sont des lignes de bus qui seront générées). Cela nécessite que le critère « distance inter-stations » soit pris en compte.

de nœud à nœud vers le nœud j en passant par les arcs les plus utilisés potentiellement (avec les arcs-valeurs les plus élevés) et en évitant si possible les arcs où une ligne est déjà présente. Les lignes doivent vérifier certaines contraintes : longueur minimale, pas de superpositions de lignes trop nombreuses....

A chaque itération, on crée une nouvelle ligne : les critères de choix sont le potentiel de trafic de la ligne, la longueur totale de la ligne et le nombre d'arcs qui n'avaient pas de ligne auparavant. Le calcul s'arrête lorsque les lignes recouvrent tous les arcs présents. Si les contraintes sont trop fortes, les lignes ne recouvrent pas tous les arcs.

Ensuite, on implémente les circulations sur chaque ligne. L'intervalle entre les circulations est fonction du potentiel de trafic de la ligne et du facteur de hiérarchisation des fréquences. Les horaires sont implémentés dans le fichier de sortie entre le début et la fin de la plage horaire¹.

¹ Pour être tout à fait précis, signalons que pour chaque circulation, la dernière circulation part au plus tard à la date de fin de la plage horaire. Il y a donc quelques circulations dépassant cette date.

Les principales étapes de l'application sont ainsi les suivantes :

1-Calcul des plus courts chemins par l'algorithme de Floyd et implémentation de la matrice des précédents

2-Calcul à partir d'un modèle gravitaire des flux de sommet à sommet

3-Calcul des arcs-valeur (affectation des flux)

4-Structuration des lignes du réseau

TANT QUE les lignes ne recouvrent pas tous les arcs

POUR tous les couples de sommets (i, j) du graphe

Initialisation d'une ligne test

On part du sommet i

Valeur = 0

Superposition = 0

TANT QUE on n'est pas arrivé au sommet j

POUR tous les arcs (i, k) ayant pour origine le sommet i

SI l'arc permet de se rapprocher de j et nombre de lignes sur cet arc < nbsuperspositionsmax

1- SI aucune ligne sur cet arc ET SI arc-valeur (i, k) ≥ Valeur

Valeur = arc-valeur (i, k)

On garde cet arc

Superposition = 0

FIN SI

2- SI aucune ligne sur cet arc ET SI arc-valeur (i, k) ≤ Valeur ET SI Superposition = 1

Valeur = arc-valeur (i, k)

On garde cet arc

Superposition = 0

FIN SI

3- SI il y a déjà des lignes sur cet arc ET SI Valeur = 0

Valeur = arc-valeur (i, k)

On garde cet arc

Superposition = 1

FIN SI

4- SI il y a déjà des lignes sur cet arc ET SI arc-valeur (i, k) ≥ Valeur ET SI superposition = 1

Valeur = arc-valeur (i, k)

On garde cet arc

FIN SI

FIN SI

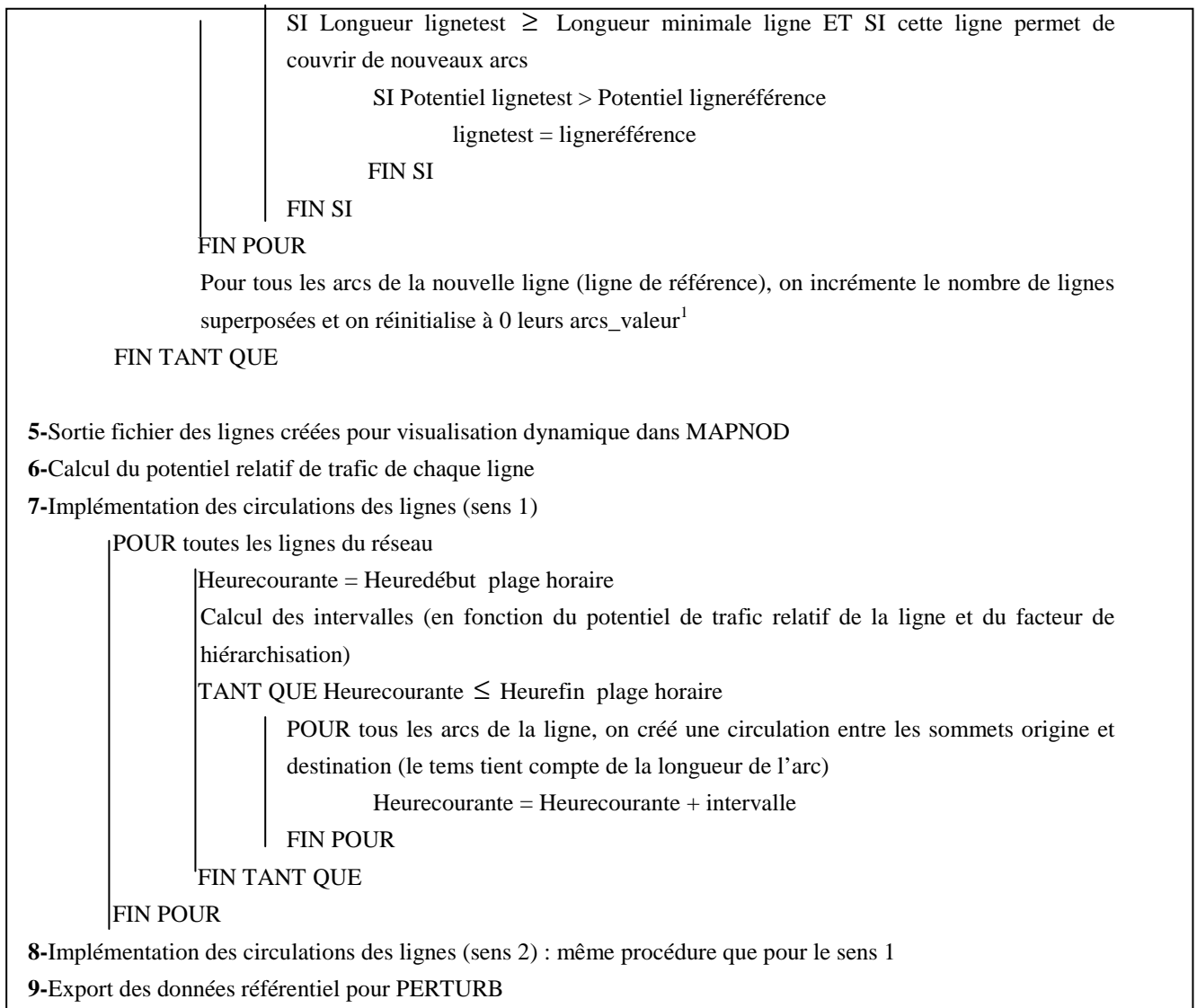
FIN POUR

Potentiel lignetest = Potentiel lignetest + arcs-valeur (i, k)

Longueur lignetest = Longueur lignetest + 1 (1 arc en plus)

i devient le sommet-destination de l'arc conservé

FIN TANT QUE



encadré 12 Principales étapes de l'application Créationlignes

Pour un réseau de 100 nœuds, le traitement dure quelques secondes. Signalons que l'implémentation de la matrice des précédents dans l'étape 1 est effectuée 2 fois, une fois dans chaque sens. En effet, dans le cas de réseaux théoriques, de nombreux temps de parcours entre nœuds peuvent être identiques. A ce niveau, faire les calculs une fois dans chaque sens de la matrice est nécessaire pour éviter que les indices des nœuds n'aient une influence sur les valeurs obtenues.

Les animations vidéo **LIGNES-1** et **LIGNES-2** montrent le processus de création des lignes. Les superpositions de lignes sont interdites dans les deux cas. Par conséquent, lorsque l'on avance dans le processus, les lignes deviennent très courtes et les dernières sont des navettes entre deux nœuds.

¹ La remise à 0 des arcs-valeurs fait que les points 2, 3 et 4 plus haut dans l'algorithme ne sont pas utiles (à partir du moment où il y a superposition de lignes, l'arc-valeur est égal à 0). Ils restent utiles si l'on souhaite faire la procédure sans remise à 0 des arcs-valeurs.

Grâce aux applications *Maillage* et *Créationlignes*, il est ainsi possible de générer les « *deux aspects complémentaires de la structuration d'un réseau* » (CERTU, 2004) : l'extensivité et l'intensivité de l'offre.

Signalons qu'il est également possible de créer des lignes avec l'application *Créationlignes* sur un graphe et de prendre en compte ensuite un nombre de lignes plus ou moins important afin de faire varier le maillage. Cela peut par contre entraîner le fait certains nœuds ne soient desservis par aucune ligne (le graphe n'est pas connexe).

Afin d'intégrer pleinement le caractère fonctionnel de notre système, il faut prendre en compte la demande de déplacement sur le réseau. Ceci est réalisé grâce à l'application *Générationdemande*.

Section 5 - Application *Générationdemande*

A- Objectifs et principes

La demande en déplacement sur notre espace théorique s'inscrit dans l'espace et le temps. Les valeurs des flux potentiels entre nœuds sont classiquement calculées en faisant recours à un modèle gravitaire, comme celui que nous avons utilisé dans les deux applications précédentes. Nous faisons de même ici pour déterminer, sur le plan spatial, la demande de déplacement entre couples de nœuds.

Nous raisonnons uniquement sur la base de trajets entre origines et destinations et ne prenons pas en compte des boucles de déplacement. En effet, notre principale préoccupation est de travailler sur la séquence même d'un déplacement, plus que sur l'enchaînement d'activités et de séquences de déplacements.

Les temps de parcours utilisés pour le modèle gravitaire ne font pas intervenir l'offre de transports en commun mais le réseau initial, issu de l'application *Maillage*. Ceci n'est a priori pas très pénalisant dans la mesure où l'offre de transports en commun générée par l'application *Créationlignes* l'a également été de cette manière. Il s'agit néanmoins d'un biais potentiel que nous nous devons de signaler et qu'une évolution de l'application pourrait supprimer totalement. Il peut à ce stade être partiellement contourné en modifiant les temps de parcours de chaque arc (qui sont par défaut les mêmes que pour l'utilisation avec *Maillage* et *Créationlignes*) : diminuer les temps de parcours des arcs des lignes les plus performantes, augmenter les temps de parcours des lignes les moins performantes...

Sur le plan temporel, on constate généralement des pics de trafic à certaines heures, des périodes creuses et des périodes intermédiaires. Nous n'intégrons pas ces dimensions avec l'application *Générationdemande*, de même que nous ne l'avons pas fait avec l'application *Créationlignes*¹. Néanmoins, il est possible de déterminer la plage horaire dans laquelle s'inscrit la demande et les intervalles entre les heures de départ des agents. Par exemple, si

¹ Il serait néanmoins possible de prendre en compte cette dimension en lançant plusieurs fois les programmes avec des paramètres différents.

100 agents doivent se déplacer entre A et B entre 8h (inclus) et 9h (non inclus) et que les départs se font toutes les 6 minutes, on aura alors 10 départs à 8h, 10 à 8h06...

B- Entrées et sorties

L'application *Générationdemande* est lancée directement depuis MAPNOD.

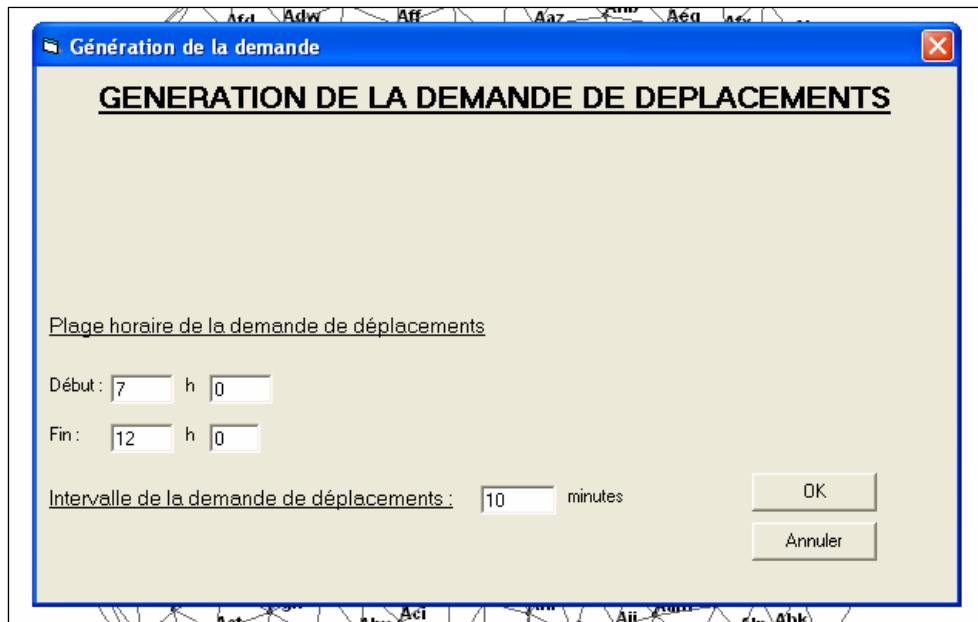


figure 53 Lancement de *Générationdemande* depuis MAPNOD

Les entrées de l'application sont :

- un fichier des sommets,
- un fichier des arcs,
- un fichier avec les paramètres pour la génération de la demande : heure de début de la plage horaire, heure de fin de la plage horaire, intervalle entre les heures de départ des agents (ce fichier est généré par MAPNOD).

Les sorties de l'application sont :

- un fichier avec la demande de déplacement temporisée : origine du déplacement, destination du déplacement, heure de départ et nombre de personnes concernées, pour utilisation dans PERTURB (format compatible).

C- Principales étapes

Les principales étapes de l'application sont ainsi les suivantes :

```
1-Calcul des plus courts chemins par l'algorithme de Floyd et implémentation de la matrice des précédents
2-Calcul à partir d'un modèle gravitaire des flux de sommet à sommet
3-Génération temporelle de la demande de déplacement
  POUR tous les couples (i, j) de sommets
    Nombre d'heures de départ = (Heure fin plage horaire - Heuredébut plage) /
    intervalle
    Nombre d'agents par pas de temps = Flux (i, j) / Nombre d'heures de départ
    Heurecourante = Heuredébut plage horaire
    TANT QUE Heurecourante ≤ Heure fin plage horaire
      On écrit dans le fichier de sortie : l'identifiant du sommet de
      départ, l'identifiant du sommet d'arrivée, l'heure de départ, le
      nombre d'agents concernés
      Heurecourante = Heurecourante + intervalle
    FIN TANT QUE
  FIN POUR
```

encadré 13 Principales étapes de l'application Générationdemande

Dans la procédure décrite, on peut facilement remarquer qu'il reste des résidus. Ainsi, si 110 personnes doivent se déplacer sur une plage horaire de 60 minutes avec des départs toutes les dix minutes, on calculera alors $18 \times 7 = 126$ déplacements. Au contraire, si la plage horaire est de 59 minutes, le nombre de personnes générés est de 108 (18×6). Ainsi, une procédure supplémentaire (non décrite ici) permet de générer le nombre exact de personnes pour chaque couple de nœuds, à une unité près. Par exemple, si le flux calculé entre deux nœuds est de 1000,5 agents 1 000 agents seront générés. Au final, il y a donc un peu moins d'agents qu'initialement mais la différence reste faible en proportion¹.

L'application *Générationdemande* correspond à la dernière étape de notre conception ex-nihilo d'un système de transport : la génération de la demande temporisée de déplacement au sein de l'espace théorique. Il est ainsi possible d'utiliser PERTURB en faisant varier facilement les caractéristiques de l'offre et de la demande de transport.

¹ Plus le nombre de personnes se déplaçant entre deux nœuds est élevé, plus cette proportion est faible.

Conclusion

La plate-forme de simulation présentée dans cette partie permet d'envisager de nombreuses applications. En effet, conformément à ce que nous souhaitons, il est possible de faire varier aisément les paramètres d'entrée du modèle PERTURB. Ce dernier peut également fonctionner directement à partir d'une offre de transport réelle, si les données au bon format sont disponibles.

Les contraintes utilisées dans les applications correspondent à notre souhait de tenir compte des facteurs pertinents de choix en matière de simulation d'un système de transport sur un territoire, bien qu'il soit impossible de simuler totalement fidèlement de tels processus de décision. Cette génération de système, qui pourra être complétée et améliorée par la suite, est susceptible d'être utile dans diverses recherches, au-delà de notre travail spécifique. Il est par ailleurs possible d'effectuer des modifications manuelles aux différentes étapes. On garde ainsi une souplesse malgré la mise en place de procédures garantissant une certaine automatisation.

Grâce à ce travail préalable, il est possible d'effectuer de nombreuses simulations pour alimenter notre réflexion sur la vulnérabilité structurelle et fonctionnelle des systèmes de transports en commun. Celles-ci ont nécessairement une valeur plus exploratoire qu'opérationnelle quant aux résultats directement obtenus mais peuvent apporter des éléments complémentaires à un travail sur un cas d'étude réel.

Par ailleurs, la visualisation dynamique des résultats dans MAPNOD est susceptible de contribuer de manière significative à nos analyses.

CONCLUSION

Au cours de cette deuxième partie, nous avons présenté les outils mis en place pour répondre à nos interrogations.

Au préalable, il a tout d'abord été nécessaire de formaliser les questionnements et de présenter les principaux aspects de la démarche de modélisation. Les trois champs théoriques utilisés (théorie des systèmes, théorie des graphes et systèmes multi-agents) ont été abordés. Ces derniers permettent d'intégrer les éléments d'un système de transport (offre et demande) et de constituer une base solide pour les fondements du modèle.

Le principal outil développé est le modèle PERTURB. Grâce à ses 5 modules applicatifs, il permet d'effectuer des calculs et simulations afin de mesurer certains aspects de la vulnérabilité structurelle et fonctionnelle des systèmes de transport en commun. Ses principaux apports sont l'intégration des perturbations, des spécificités des transports collectifs et la simulation d'agents représentant les voyageurs.

Il s'intègre dans une plate-forme de simulation contenant le logiciel MAPNOD ainsi que quatre applications pour la conception des systèmes de transport théoriques. Celles-ci peuvent être utilisées pour faire varier facilement les paramètres relatifs à l'offre de transport. Elles permettent également de s'affranchir de cas réels et facilitent en ce sens les démarches exploratoires.

La visualisation rapide des données générées par PERTURB est importante. C'est pourquoi ces dernières peuvent être lues par MAPNOD¹. Cela est particulièrement intéressant en phases de tests lorsque de nouvelles fonctionnalités sont mises en place ou que de nouveaux cas d'utilisation sont testés. Une visualisation rapide facilite la détection des anomalies. Le module de visualisation dynamique constitue par ailleurs un outil supplémentaire au service d'une meilleure analyse des phénomènes étudiés.

Les questionnements sont posés, les outils informatiques pour y répondre sont mis en place. Il est maintenant possible de faire des applications. Celles-ci sont présentées dans la troisième et dernière partie.

¹ Dans la version adaptée que nous utilisons.

INTRODUCTION

Après avoir présenté la problématique de recherche et les outils informatiques développés, nous utilisons ces derniers afin de donner des éléments de réponse à nos questionnements. Cette partie constitue donc l'aboutissement de notre démarche dans la mesure où elle montre des applications dont le but est de faire avancer la réflexion scientifique.

Il est utile de signaler les allers-retours qui ont eu lieu entre les questions de recherche, le modèle et ses applications. En effet, l'ensemble du processus s'est effectué dans une démarche itérative, les différentes parties de cette recherche s'enrichissant mutuellement, bien que celles-ci soient présentées ici de manière linéaire.

Au cours de cette partie, nous travaillons sur un cas d'étude concret : la région Île-de-France et en particulier les perturbations pouvant affecter le réseau de la SNCF¹.

Nous réalisons également des simulations sur des systèmes de transport théoriques afin de mieux comprendre les relations existantes entre les paramètres et ainsi d'étudier les liens entre les caractéristiques du système de transport (offre et demande) et la vulnérabilité.

Les simulations (Île-de-France et systèmes de transport théoriques) ont pour but de tester les sept hypothèses définies dans la Partie I de ce document. Dans le cadre de cette recherche, **il s'agit en effet à la fois de réaliser un modèle pour tester nos hypothèses et de l'utiliser à bon escient afin d'apporter des éléments de réponse pertinents.**

¹ Il serait bien sûr possible de travailler avec PERTURB sur d'autres cas d'étude : agglomérations françaises plus petites, autres capitales (Londres, Rome ...). Il suffit pour cela de fournir à PERTURB des données au bon format en entrée.

CHAPITRE I APPLICATIONS SUR L'ÎLE-DE-FRANCE

Introduction

La région Île-de-France a été choisie comme terrain d'étude pour cette recherche. Le réseau de transports en commun est dense, facilitant les réorientations de voyageurs lors de perturbations. Ces quelques chiffres donnent un aperçu de l'importance de l'offre :

- 5 réseaux de trains,
- 5 lignes de RER,
- 16 lignes de métro,
- 3 lignes de tramway et 1 ligne de tram-train (T4),
- OrlyVal,
- près de 1 500 lignes de bus¹.

Néanmoins, il faut être conscient de la grande diversité des situations en Île-de-France, notamment entre l'offre à Paris Intra-Muros, dans la première couronne et plus en périphérie. Cette diversité dans la densité de l'offre est intéressante pour nous.

Notre travail est basé sur le réseau ferré Île-de-France : lignes de trains, RER, métros, tramways. En effet, nous nous concentrons sur le réseau structurant, à forte capacité.

¹ Source : www.stif-idf.fr

Section 1 - Contexte général

A- Approche historique¹

Il est toujours utile de débiter l'analyse d'un terrain d'étude par une mise en perspective historique, afin d'appréhender par la suite la situation actuelle, au vu des évolutions successives.

Le réseau de transport ferré d'Île-de-France est aujourd'hui l'un des plus complets du monde. Sur plus d'un siècle et demi, trois grandes étapes ont marqué sa création.

La construction de l'essentiel des lignes de chemin de fer qui desservent aujourd'hui la banlieue fut l'oeuvre du XIX^{ème} siècle (**première étape**). Certaines de ces lignes eurent dès l'origine une vocation locale, telle que la première d'entre elles, inaugurée en 1837 en direction de Saint-Germain-en-Laye. D'autres furent construites pour relier Paris à la province, mais virent rapidement se développer le long de leur tracé une urbanisation et un trafic pour lequel elles n'avaient pas été initialement conçues.

La **deuxième étape** fut celle de la création, à partir du début du XX^{ème} siècle², du métropolitain parisien dont le maillage sans équivalent a contribué, conjointement à l'existence du réseau des artères haussmanniennes, à maintenir à Paris une importante densité de population, d'emplois et d'activités multiples. La Ville de Paris fit en sorte que les trains grandes lignes ne puissent pas emprunter le réseau métropolitain afin que celui-ci ait un rôle local uniquement. A partir des années 1970, de nombreux prolongements de lignes en dehors de Paris ont eu lieu et une nouvelle ligne a été créée (ligne 14 : Meteor, inaugurée en 1998).

La **troisième étape**, à partir des années 1960 fut celle de la liaison entre elles de la majorité des lignes de chemin de fer de banlieue à travers Paris. La disposition en « cul-de-sac » des gares parisiennes présentait en effet de graves inconvénients pour les habitants de banlieue devant se rendre à Paris. Ceux-ci ne disposaient que d'un point d'arrivée dans la capitale, impliquant nécessairement des correspondances. La création du RER fut marquée par des surcoûts élevés (notamment la création des stations parisiennes Auber, Etoile et Nation) et par plusieurs projets. Les deux schémas ci-dessous montrent que le choix d'un maillage peut être différent (schéma en H ou en croix), évoluer au gré des décisions prises... et donc a priori modifier par la suite fortement les possibilités de régulation. Le réseau « en croix » constitue aujourd'hui encore l'ossature des transports ferrés régionaux franciliens, par contraste avec le réseau en H prévu par le schéma directeur de 1965 » (Gérondeau, 2003). Ainsi, le processus décisionnel ayant abouti à la constitution du réseau³ tel que nous le connaissons

¹ Basée sur (Gérondeau, 2003).

² La première ligne de métro urbain fut ouverte au public en juillet 1900.

³ Voir l'ouvrage de C. Gérondeau qui relate de façon précise les obstacles ayant dû être surmontés pour la mise en place de ce réseau (Gérondeau, 2003).

a été déterminant pour son exploitation pendant des dizaines d'années en raison de l'ampleur des investissements¹.

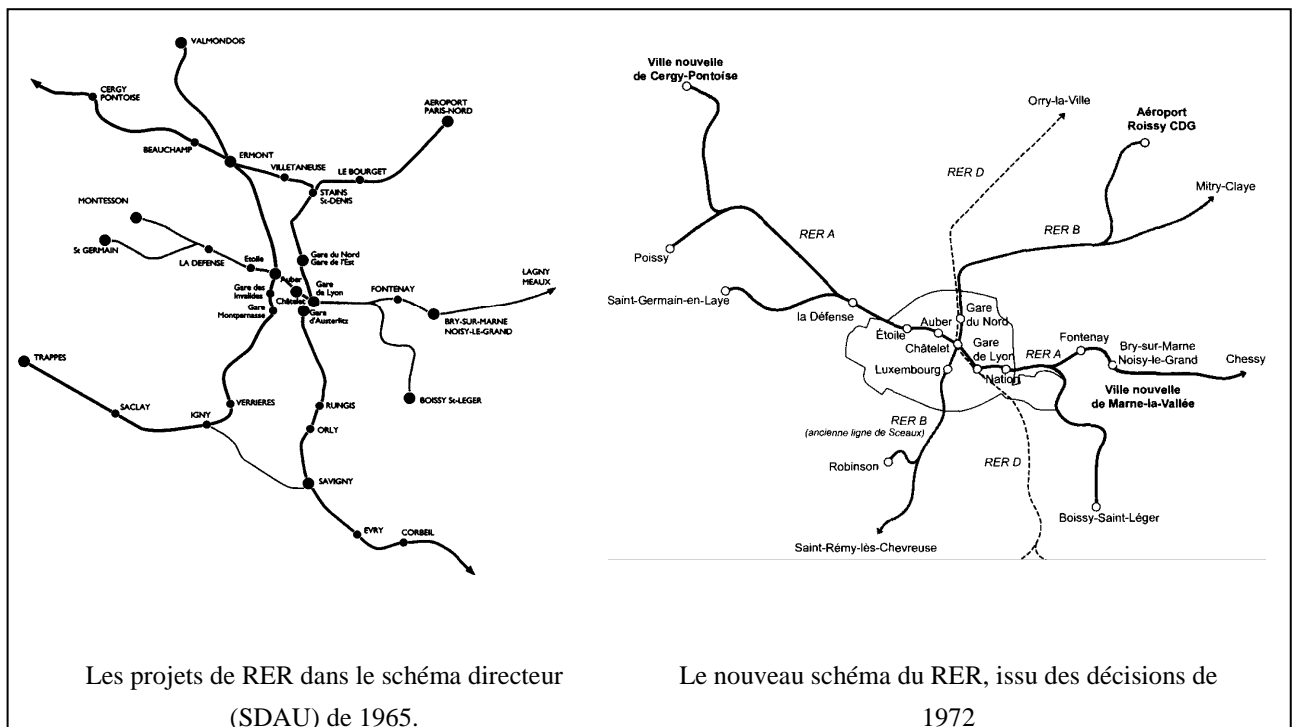


figure 54 Schémas du RER en 1965 et 1972

La mise en place du réseau de RER a amélioré les conditions d'accès à la capitale depuis sa périphérie et donné à la région toute entière une certaine unité sur le plan des transports ferrés : « les cinq lignes actuelles du RER (A, B, C, D, E) ont bouleversé les conditions d'accès à Paris des usagers des gares du Nord et de l'Est, de Lyon, d'Austerlitz, ainsi que de ceux de l'ancienne ligne de la Bastille, de la ligne de Sceaux, de celle des Invalides, de la ligne de Saint-Germain, et d'une grande part de la banlieue Ouest désormais rattachée à la ligne A grâce à l'interconnexion » (Gérondeau, 2003). Par contre, la gare Montparnasse est encore caractérisée par son isolement du Réseau Express Régional.

Malgré les investissements réalisés, la capacité du réseau ferré en Île-de-France est insuffisante sur certaines lignes².

¹ Ce qui contraste avec des réseaux d'autobus, présentant une souplesse que n'ont pas les modes ferrés et pouvant s'adapter plus facilement à des évolutions territoriales.

² Exemple : RER-D, ligne 13 du métro.

B- Organisation institutionnelle

L'organisation des transports en commun en Île-de-France est caractérisée par une Autorité Organisatrice et des opérateurs (SNCF, RATP, transporteurs routiers).

1 - Le STIF, Autorité Organisatrice des transports

L'offre de transport est définie par le Syndicat des Transports d'Ile-de-France (STIF), Autorité Organisatrice des transports dans la région. Le STIF est administré depuis 2006 par la Région Île-de-France.

Le STIF fixe les tarifs, définit la fréquence et l'amplitude des services des trains, métros, tramways et bus et contractualise avec les opérateurs, exploitants des réseaux.

Néanmoins, ces derniers gardent une certaine autonomie et peuvent être force de propositions.

2 - Les opérateurs

Les 5 réseaux de trains sont exploités par la SNCF. Certains trains TER et Corail Inter cités permettent d'effectuer des trajets internes à l'Île-de-France.

Les RER C, D et E sont gérés par la SNCF. Les RER-A et RER-B sont exploités conjointement par la SNCF et la RATP¹. Lors de perturbations, des ruptures d'interconnexion peuvent avoir lieu sur ces deux lignes.

Les lignes de métro et de tramway ainsi qu'Orlyval sont exploitées par la RATP. La ligne de tram-train T4 l'est par la SNCF.

En journée, les bus sont gérés par la RATP pour les lignes parisiennes et de proche couronne. Plus de 1 000 lignes sont exploitées par des transporteurs privés regroupés dans l'association OPTILE². La SNCF exploite également quelques lignes régulières. Les lignes de bus du réseau de nuit (Noctilien) sont exploitées par la SNCF et la RATP.

¹ Le RER-A est exploité par la RATP au sud et par la SNCF sur les branches Nanterre Université-Cergy/Poissy. Le RER B est géré par la RATP au sud de Gare du Nord et par la SNCF au nord. Pour éviter les ruptures de charge, les trains changent de conducteur, respectivement à Nanterre-Université et à Gare du Nord. Sur le RER-B, le changement de conducteur est progressivement supprimé.

² Le sigle OPTILE signifie : Organisation Professionnelle des Transports d'Île-de-France.

Section 2 - Travail préparatoire

Nous utilisons le modèle PERTURB sur ce terrain d'étude, en effectuant des calculs et simulations :

- uniquement avec l'offre sans tenir compte des perturbations (module Prelim)
- uniquement avec l'offre en tenant compte des perturbations (module O),
- avec l'offre et la demande (module OD),
- avec l'offre, la demande et l'information (module ODI).

Nous n'utilisons pas le module ODIC pour effectuer des simulations intégrant les contraintes de capacité. En effet, les données obtenues au niveau de l'offre et de la demande (dans une moindre mesure) ne sont pas suffisamment précises. Plutôt que d'obtenir des résultats dont nous ne maîtriserions pas le degré d'erreur, nous avons fait le choix de ne pas effectuer de simulations intégrant les contraintes de capacité sur notre cas d'étude concret. Nous le faisons uniquement sur les systèmes théoriques¹.

A- Données obtenues

Les données relatives à l'offre de transport théorique ont été obtenues dans le cadre de nos échanges avec l'AMIVIF², structure dont la mission principale est d'agrèger des données de la SNCF, de la RATP et d'OPTILE, afin de constituer une base de données multi-transporteurs et proposer ainsi des services d'information multimodale³. La base de données de l'AMIVIF est la complète et la plus à jour pour l'offre de transports en commun en Île-de-France. Elle intègre l'ensemble des horaires des transporteurs, les correspondances, la géolocalisation des arrêts. De cette base, nous avons extrait les horaires pour un Jour Ouvrable Banal (JOB) et travaillé uniquement sur l'offre de journée⁴. Le jour de référence choisi a été le 17 mai 2006. Ensuite, les horaires du tramway T3 ont été extraits pour un autre JOB : le 8 février 2007. La plupart des calculs ont été faits sans le T3. Quelques simulations ont été faites pour mesurer quelques effets de sa mise en service. Le tram-train T4, mis en service le 18 novembre 2006, n'a pas été pris en compte.

Les quelques figures des deux pages suivantes donnent un aperçu visuel du graphe constitué pour notre travail sur l'Île-de-France. Dans la mesure où les dessertes des trains et RER sont variables, on peut noter le nombre d'arcs élevé. Ceci donne une vision peu conventionnelle de l'offre en Île-de-France, mais intéressante. On peut en effet visualiser les parcours de trains directs, semi-directs ou omnibus. On constate également que les pôles d'échanges sont « éclatés » en plusieurs nœuds reliés par des arcs permanents. Les RER et métros sont représentés dans leur couleur conventionnelle.

¹ Voir le chapitre suivant.

² Association Multimodale d'Information des Voyageurs en Île-de-France, regroupant les transporteurs. Depuis le 1^{er} janvier 2008, l'AMIVIF a changé de statut (internalisation dans le STIF).

³ Notamment les sites Internet www.transilien.com, www.transport-idf.com et www.ratp.fr.

⁴ Le réseau de nuit (Noctilien) n'a pas été étudié.

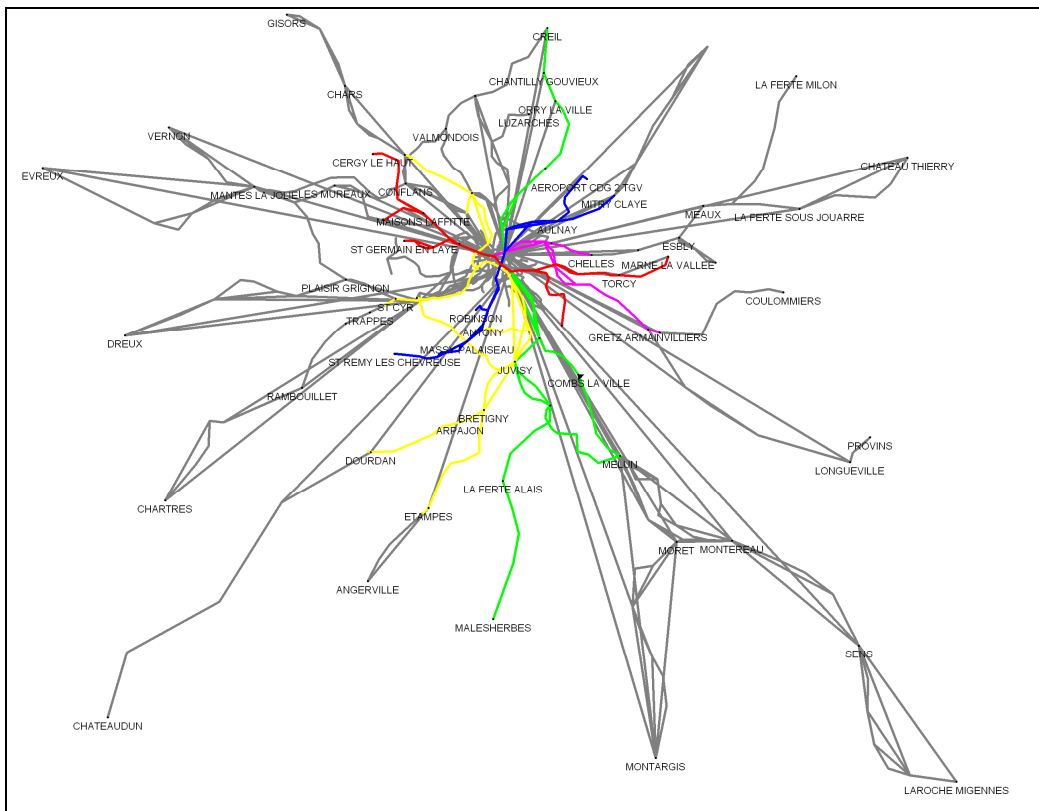
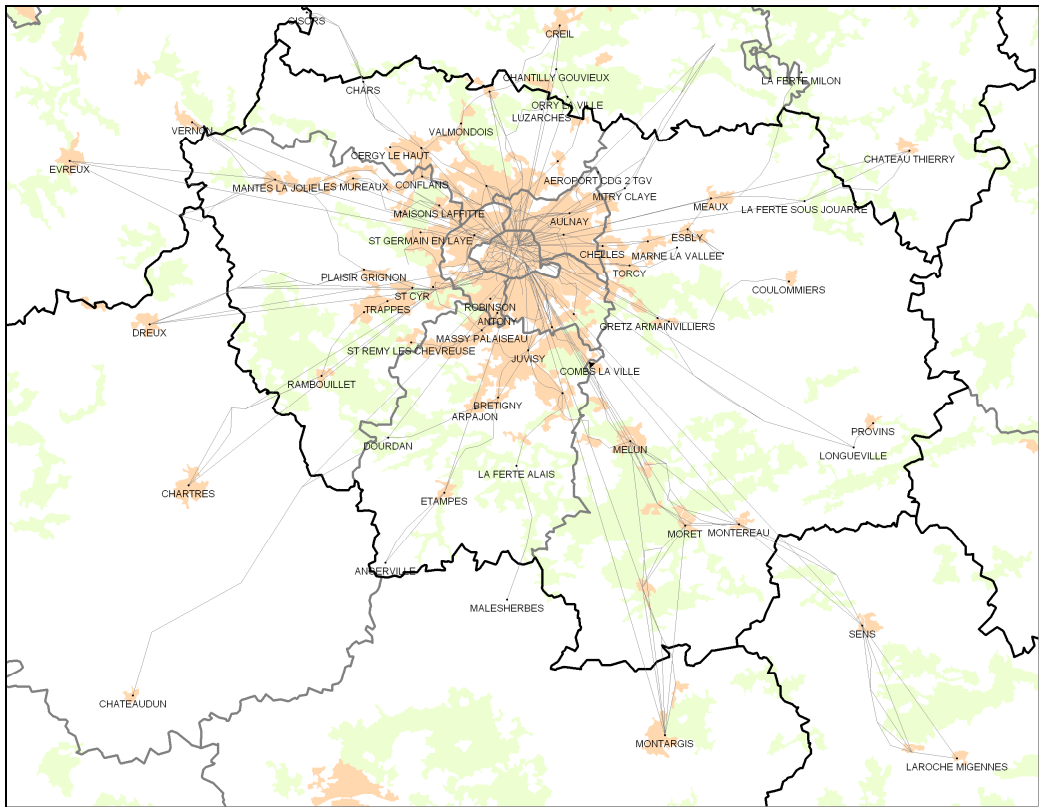


figure 55 Vues générales du graphe

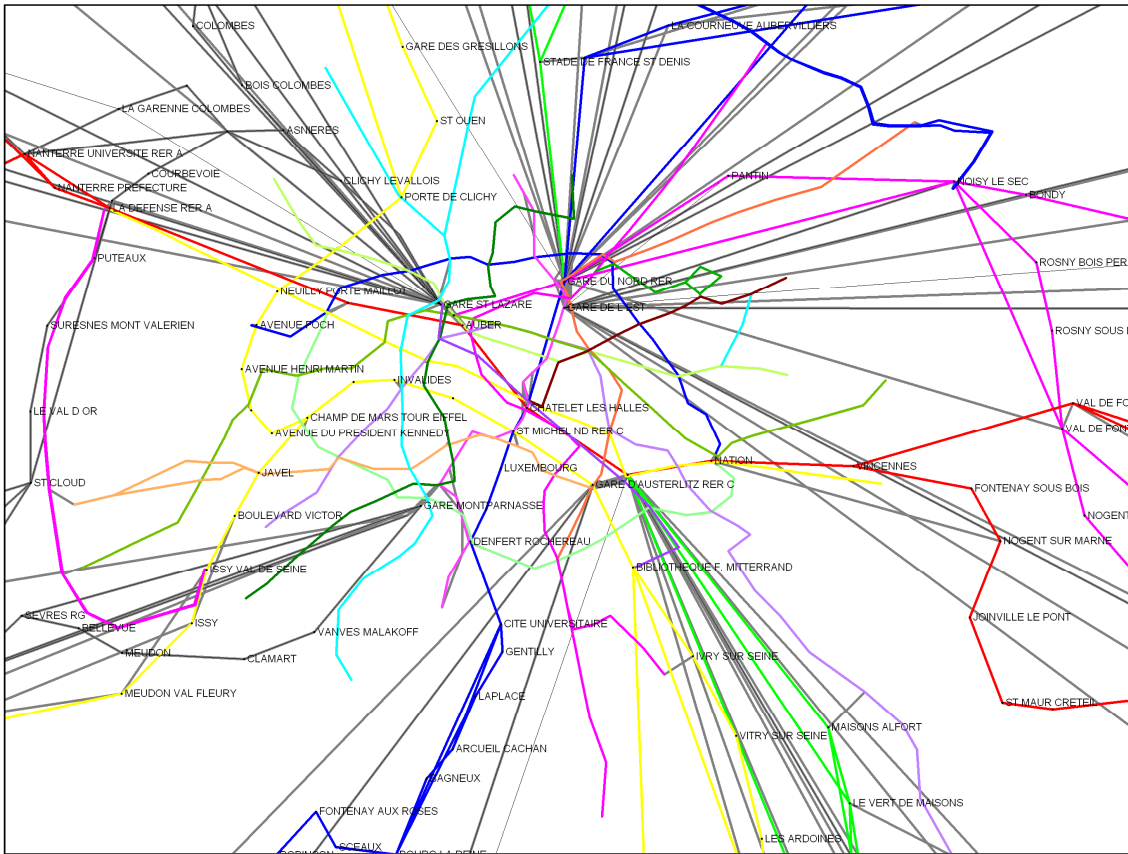


figure 56 Vue rapprochée de Paris

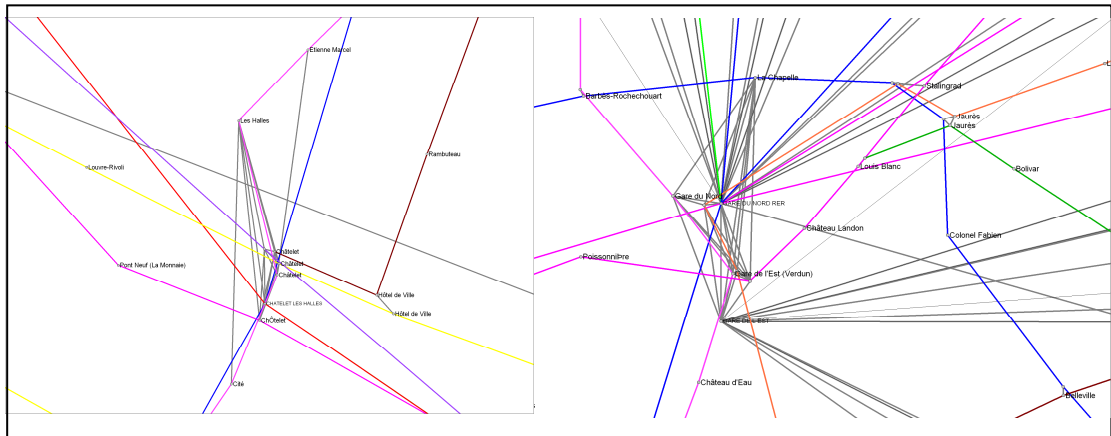


figure 57 Zoom sur Châtelet et Gare du Nord

Le graphe ainsi constitué contient 912 sommets, 2744 arcs et 318 165 arcs horaires¹. On peut observer sur les vues générales qu'il ne se limite pas aux frontières administratives de la région Île-de-France.

¹ Sans prendre en compte le T3.

Afin de ne pas charger en mémoire l'ensemble des véhicules et horaires, il est possible de définir dans les paramètres généraux de PERTURB la plage horaire sur laquelle on souhaite travailler¹.

Les données correspondant aux programmes de grève du RER-C ont été fournies par la Direction de Ligne C de Transilien en juin 2007. Les données relatives à la demande ont été fournies par le pôle Etudes/Dessertes de Transilien. Les bases de données, obtenues classées par Ligne et uniquement pour la demande concernant Transilien, sont issues d'enquêtes origine-destination. Les données sont relativement précises même si la précision temporelle est variable et la date de réalisation de l'enquête plus ou moins récente. Dans le cadre de cette recherche, nous avons utilisé les données sur le réseau Paris Est et RER-E datant de 2005.

Il aurait été impossible de trouver des données plus précises pour réaliser notre analyse. Néanmoins, nous devons reconnaître que les résultats peuvent être légèrement biaisés par les approximations, car les données ne peuvent représenter de manière parfaite l'offre et la demande. Pour ce type d'analyse, la précision des données est primordiale. Nous revenons sur ce point dans nos conclusions.

Les données obtenues ont été formatées pour être lues par PERTURB. Ce travail a été particulièrement fastidieux et long.

B- Définition de scénarii de perturbations

Afin de définir des scénarii pertinents de perturbations, un travail d'investigation a été réalisé sur la base des incidents répertoriés par le PC INFO Trafic Transilien en 2006. Pour chaque journée, les incidents sont décrits (type d'incident, heure de début et de fin de la perturbation). Les éléments suivants ressortent, de façon non surprenante :

- grande variété des aléas entraînant des perturbations sur le réseau²,
- difficulté de modélisation, liée notamment au fait que la reprise du trafic se fait toujours progressivement et qu'il y a une diffusion des perturbations sur une ligne lorsqu'un tronçon est coupé (autres horaires modifiés).

De plus, l'absence de connaissance précise de l'évolution de la situation rend délicate l'information des voyageurs.

Nous avons sélectionné des perturbations ayant entraîné des interruptions de trafic sur le réseau Transilien. Comme nous l'avons expliqué auparavant, nous ne travaillons pas sur la régulation de l'offre. Par conséquent, nous considérons que lorsqu'un tronçon d'une ligne est coupé, le reste de la ligne conserve ses horaires théoriques et qu'il n'y a pas de reprise progressive du trafic. Ces choix ont été nécessaires afin de simplifier le problème de modélisation. Des développements ultérieurs permettraient de mieux prendre en compte ces aspects.

¹ Voir dans la présentation de PERTUB (chapitre III de la Partie II).

² Voir dans le chapitre IV de la Partie I.

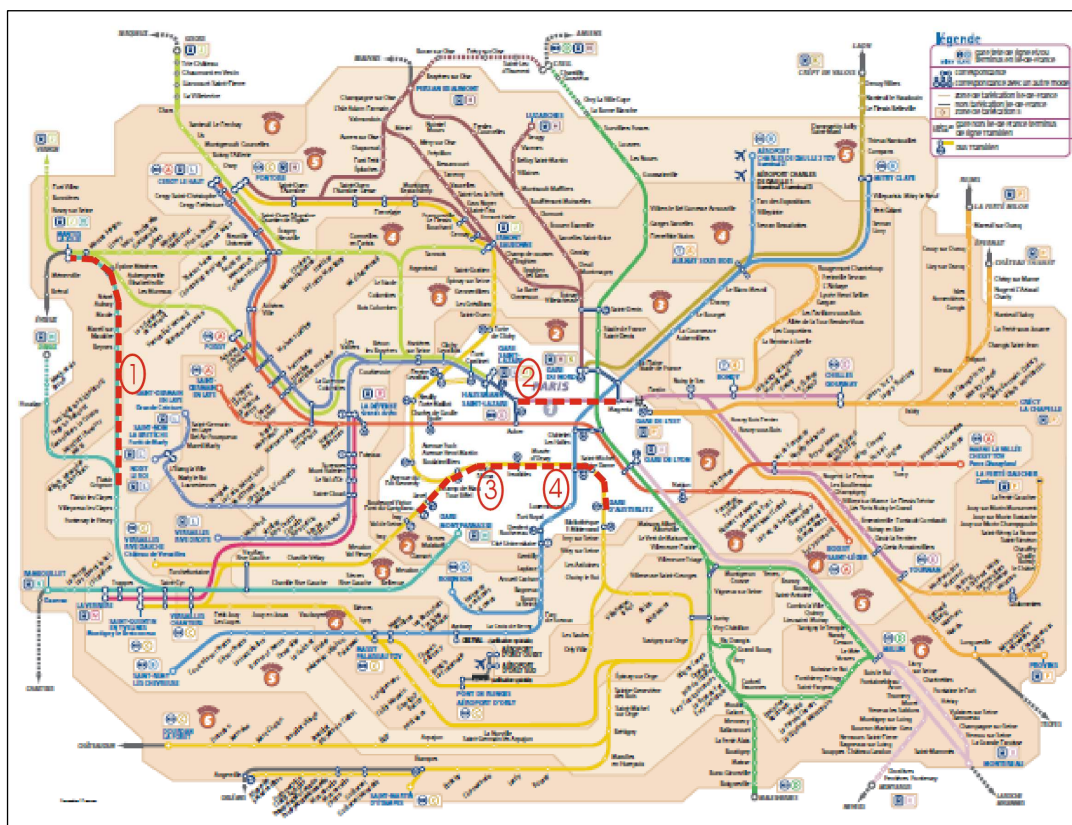
Les scénarii de perturbations sont ainsi définis par plusieurs critères :

- lieu de la perturbation (ligne(s) concernée(s), arrêts du tronçon perturbé),
- plage horaire de la perturbation (heure de début et de fin de la perturbation).

Pour la définition de l'offre perturbée, nous avons choisi de travailler sur les perturbations suivantes :

- Scénario 1 : interruption de trafic entre Plaisir-Grignon et Mantes-la-Jolie sur la ligne N (Réseau de Paris-Montparnasse),
- Scénario 2 : interruption de trafic sur le RER-E entre Magenta et Haussmann St-Lazare¹,
- Scénario 3 : interruption de trafic sur le RER-C entre Austerlitz et Boulevard Victor-Pont du Garigliano²,
- Scénario 4 : interruption de trafic sur le RER-C entre Austerlitz et Invalides (cas des travaux Castor l'été³).

Ces interruptions ont lieu dans les deux sens de circulation.

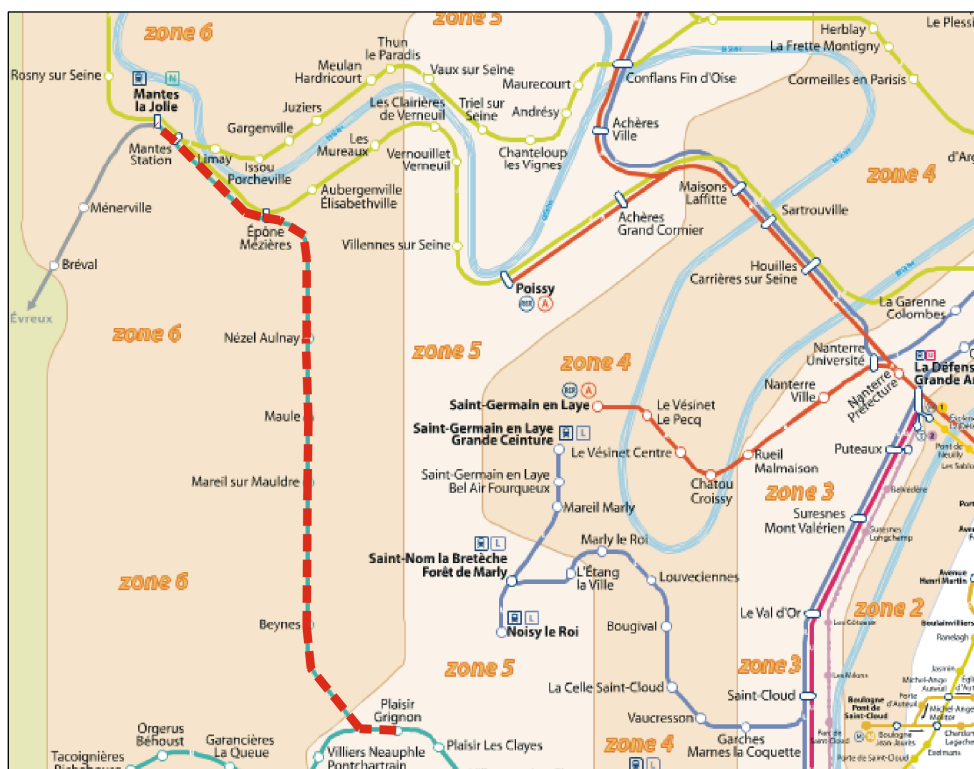


carte 6 Localisation des perturbations étudiées¹

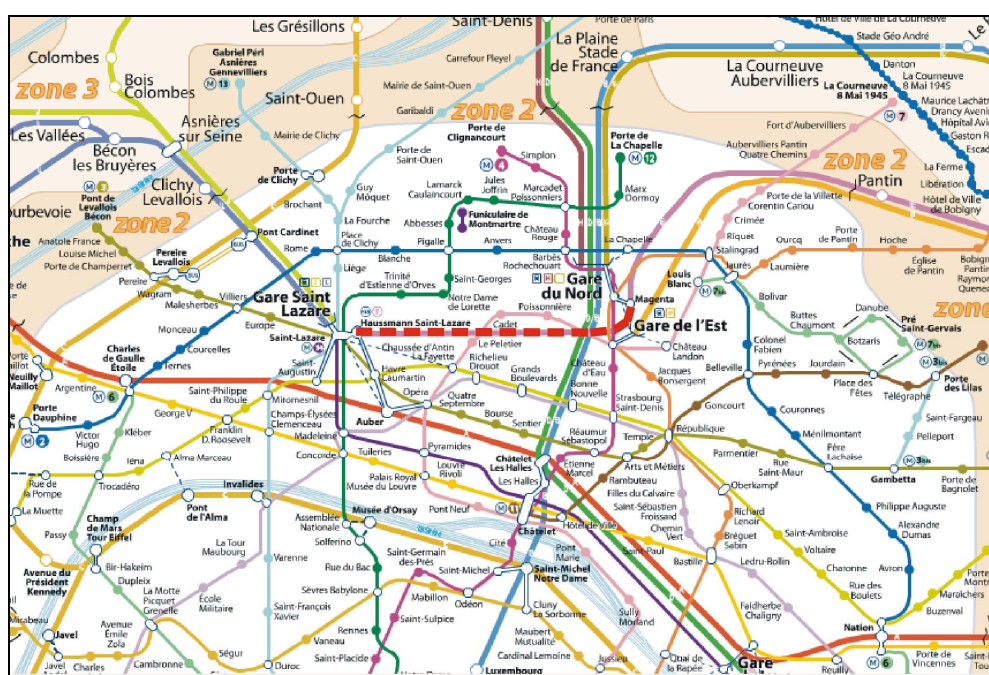
¹ Dans un tel scénario, certains RER sont dirigés vers la gare de l'Est. N'intégrant pas la régulation par l'offre dans notre approche, nous ne prenons pas en compte ce paramètre ici.

² Ce tronçon avait été identifié comme concerné par le risque d'inondation lors d'une étude réalisée sur les risques liés à l'inondation (SNCF, 2003).

³ Lors des travaux Castor, un Plan de Transport Adapté est mis en place et les horaires changent sur les tronçons où le trafic n'est pas interrompu. Ceci ne peut être pris en compte ici.



carte 7 Scénario 1 : interruption de trafic sur la ligne N entre Plaisir-Grignon et Mantes-la-Jolie²

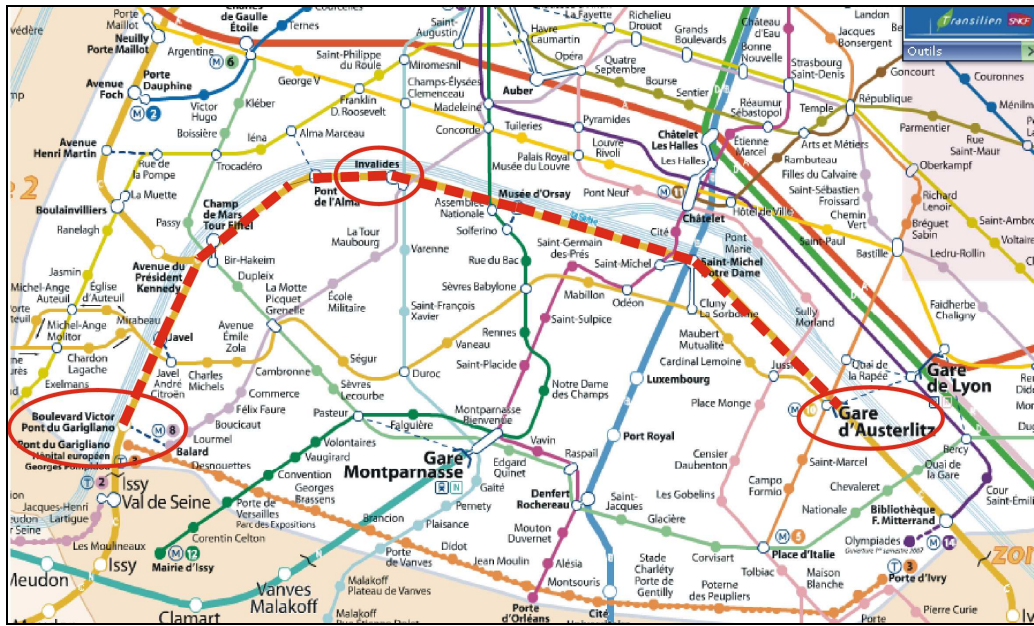


carte 8 Scénario 2 : interruption de trafic sur le RER-E entre Magenta et Haussmann St-Lazare³

¹ Source du fonds de carte : www.transilien.com.

² Source du fonds de carte : www.transilien.com.

³ Source du fonds de carte : www.transilien.com.



carte 9 Scénario 3 et scénario 4 : interruption de trafic entre Austerlitz et Boulevard Victor, interruption de trafic entre Austerlitz et Invalides¹

Ces scénarii permettent de travailler sur des axes se situant dans des zones plus ou moins maillées.

Comme évoqué précédemment, nous avons par ailleurs travaillé sur des programmes de grève du RER-C², correspondant à des mouvements sociaux plus ou moins importants :

- programme U68,
- programme U35,
- programme U16.

Le nombre à droite du U traduit globalement le pourcentage de circulations par rapport à une journée normale. Ainsi, le programme U68 correspond à un Plan de Transport où le nombre de circulations reste relativement important, alors que le programme U16 est mis en place en cas de mouvement social très suivi. Signalons que ces programmes ont été modifiés depuis suite à l'instauration de la Loi dite du service minimum dans les transports.

L'objectif n'est pas de faire une étude exhaustive de chacun des scénarii. Les calculs et simulations sont effectués pour donner des éléments de réponse en lien avec les sept hypothèses formulées.

¹ Source du fonds de carte : www.transilien.com.

² Il arrive fréquemment que seule une ou quelques lignes du réseau soient concernées par un mouvement social.

Section 3 - Calculs de nœud à nœud : mesure de la dégradation des potentialités relationnelles entre deux nœuds du réseau

Nous présentons ici les résultats issus de calculs de nœud à nœud. A chaque minute, on calcule la durée nécessaire pour aller d'un nœud à un autre. Le temps correspond à la somme de la durée nécessaire pour attendre le premier véhicule de l'itinéraire et du temps de parcours. On peut calculer à chaque minute la durée nécessaire pour atteindre le nœud de destination depuis le nœud d'origine.

Plus la fréquence des circulations est élevée, plus la variation de la durée est faible. On peut ainsi voir les écarts entre heures creuses et heures de pointe et visualiser des différences entre des lignes à forte ou faible fréquence. L'explication de ce type de graphique est proposée sur la *figure 58*.

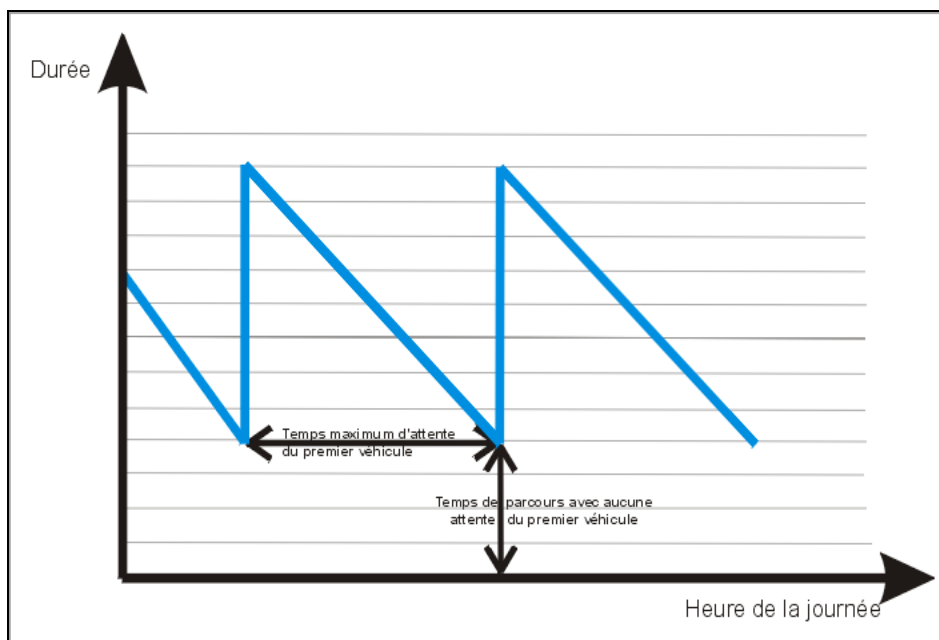


figure 58 Evolution des durées de connexion entre deux nœuds du réseau au cours du temps

A- Interruption de trafic entre Magenta et Haussmann St-Lazare sur le RER-E

Les 4 graphiques présentés montrent la dégradation de la mise en relation (augmentation du temps de connexion) entre des gares du RER-E lors d'une interruption de trafic entre Magenta et Haussmann St-Lazare. Les calculs sont faits pour toutes les minutes de 5h à 11h.

On se situe ici dans une zone où l'offre de transport est dense. Des lignes de métro facilitent le contournement de la perturbation. Par ailleurs, la ligne A du RER, desservant Val de Fontenay, permet de contourner plus en amont le tronçon interrompu. Les pertes de temps ne sont donc la plupart du temps pas très importantes même si elles peuvent être conséquentes à certaines heures. Ces graphiques montrent la diversité des conséquences de la perturbation en

fonction des heures de la journée et des nœuds considérés. A certaines heures, l'impact peut être nul car un itinéraire alternatif est déjà aussi rapide (et parfois plus) que l'itinéraire empruntant le tronçon perturbé. D'une minute à l'autre, les effets peuvent être nuls ou relativement importants.

Les animations Vidéo sur le CD permettent de visualiser les itinéraires en fonction de l'heure de départ.

1 - Trajet de Bondy à Haussmann St-Lazare

La *figure 59* présente les durées nécessaires pour rejoindre Haussmann St-Lazare depuis la gare de Bondy sur la plage horaire 5h-11h. La perte de temps liée à la perturbation est relativement constante (entre 10 et 16 minutes). On visualise assez nettement sur le graphique la période de pointe, avec des fréquences de circulations plus élevées.

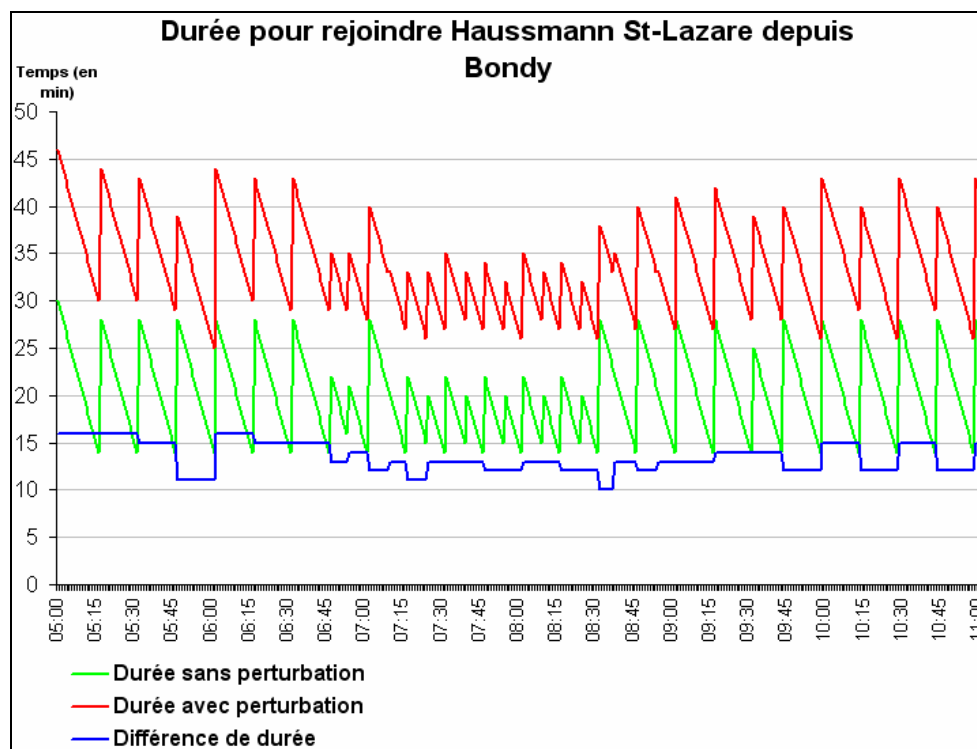


figure 59 Durée pour rejoindre Haussmann St-Lazare depuis Bondy

Le *tableau 11* présente une synthèse des résultats issus de ce calcul.

	Durée sans perturbation (en minutes)	Durée avec perturbation (en minutes)	Différence de durée ¹ (en minutes)
Valeur minimale	14	25	10
Valeur maximale	30	46	16
Valeur moyenne	20	34	13

tableau 11 Durée pour rejoindre Haussmann St Lazare depuis Bondy : résultats synthétiques

La vidéo **NaN-1** montre que les lignes de métro et RER dans Paris permettent de contourner la perturbation.

2 - Trajet de Haussmann St-Lazare à Val de Fontenay

La *figure 60* présente les durées nécessaires pour rejoindre la gare de Val de Fontenay depuis Haussmann St-Lazare sur la plage horaire 5h-11h.

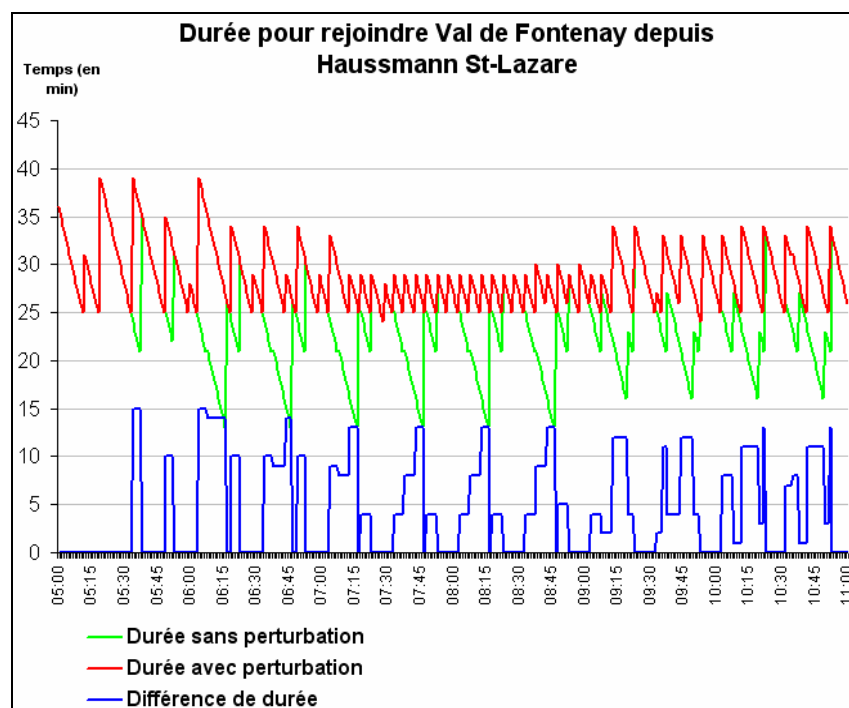


figure 60 Durée pour rejoindre Val de Fontenay depuis Haussmann St-Lazare

La perte de temps liée à la perturbation est nettement plus variable que dans le cas précédent (de 0 à 15 minutes). En effet, à certaines heures, il est plus rapide de marcher jusqu'à Auber pour prendre le RER-A plutôt que d'emprunter le RER-E, même en l'absence de perturbation.

¹ Les différences de durée sont faites pour chaque minute et ne correspondent pas à une différence entre les colonnes 2 et 3 du tableau.

Au début de la journée, il n’y a pas de différence avec et sans perturbation car le premier RER-E au départ de Haussmann St-Lazare est à 5h37. La courbe représentant les durées en cas de perturbation montre bien les fréquences très élevées des circulations sur le RER-A (toutes les 5 minutes sur cette branche à l’heure de pointe).

La vidéo **NaN-2** montre qu’en cas de perturbation, c’est presque toujours l’itinéraire via le RER-A qui est le plus rapide.

Le *tableau 12* présente une synthèse des résultats issus de ce calcul.

	Durée sans perturbation (en minutes)	Durée avec perturbation (en minutes)	Différence de durée (en minutes)
Valeur minimale	13	24	0
Valeur maximale	39	39	15
Valeur moyenne	24	29	4

tableau 12 Durée pour rejoindre Val de Fontenay depuis Haussmann St-Lazare : résultats synthétiques

3 - Trajet de Haussmann St-Lazare à Bondy

La *figure 61* présente les durées nécessaires pour rejoindre la gare de Bondy depuis Haussmann St-Lazare sur la plage horaire 5h-11h.

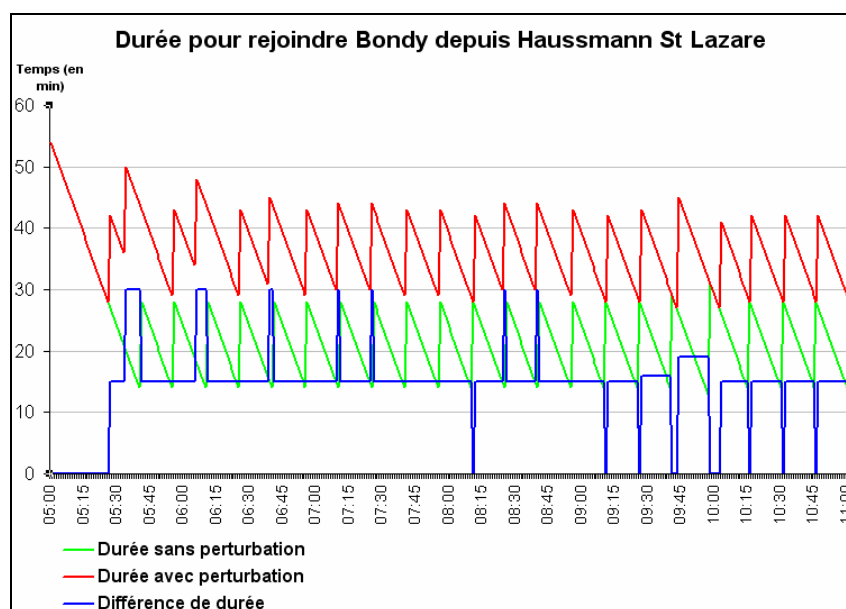


figure 61 Durée pour rejoindre Bondy depuis Haussmann St-Lazare

Les différences de durée avec et sans perturbation varient de 0 à 30 minutes. Il est à nouveau possible de remarquer que le premier RER-E n’est pas dès 5h du matin (5h40 sur cette branche), d’où la superposition des deux courbes au début de la journée.

Le temps supplémentaire lié à la perturbation est la plupart du temps de 15 minutes avec des pics à 30 minutes et des creux à 0 minute. Les pics correspondent à des instants très brefs où on a à la fois les temps les plus élevés pour les trajets avec perturbation et les temps les plus faibles pour les trajets sans perturbation (avec prise en compte du temps d'attente). Les creux correspondent au cas opposé. Néanmoins, même si la durée est parfois identique, il faudrait tenir compte du temps de parcours effectif (sans prise en compte de l'attente du premier véhicule) et du nombre de correspondances. Le *tableau 13* présente une synthèse des résultats issus de ce calcul.

	Durée sans perturbation (en minutes)	Durée avec perturbation (en minutes)	Différence de durée (en minutes)
Valeur minimale	13	27	0
Valeur maximale	54	54	30
Valeur moyenne	22	37	14

tableau 13 Durée pour rejoindre Bondy depuis Haussmann St Lazare : résultats synthétiques

La vidéo **NaN-3** montre que le contournement de la perturbation se fait localement grâce aux lignes de métro et RER dans Paris comme dans le premier cas.

4 - Trajet de Tournan à Haussmann St-Lazare

La figure 62 présente les durées nécessaires pour rejoindre la gare de Haussmann St-Lazare depuis la gare de Tournan sur la plage horaire 5h-11h.

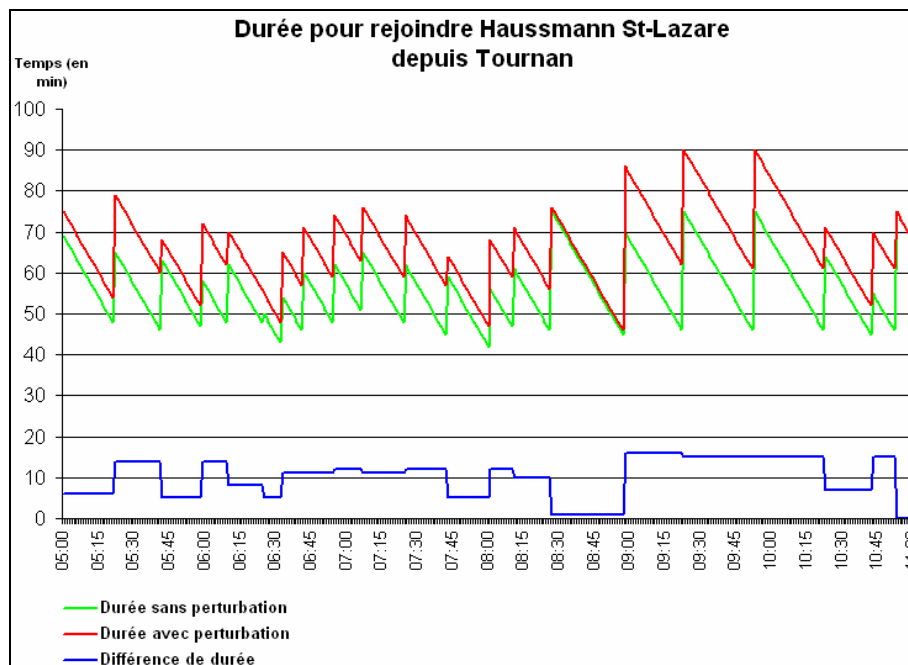


figure 62 Durée pour rejoindre Haussmann St-Lazare depuis Tournan

Les temps de parcours sont plus longs et les fréquences de circulation plus faibles que dans les cas précédents. Les temps supplémentaires induits par la perturbation ne sont pas extrêmement importants en proportion (13 minutes en moyenne pour une durée moyenne sans perturbation de 56 minutes).

La vidéo **NaN-4** montre trois possibilités pour contourner la perturbation en fonction de l'heure : descendre à Val de Fontenay pour prendre le RER-A, emprunter un train de la ligne P (Réseau Paris Est) jusqu'à la Gare de l'Est pour rejoindre ensuite Haussmann St Lazare, ou enfin contourner localement la perturbation à partir de Magenta comme dans le cas précédent.

Le tableau 14 présente une synthèse des résultats issus de ce calcul.

	Durée sans perturbation (en minutes)	Durée avec perturbation (en minutes)	Différence de durée (en minutes)
Valeur minimale	42	46	0
Valeur maximale	75	90	16
Valeur moyenne	56	66	13

tableau 14 Durée pour rejoindre Haussmann St-Lazare depuis Tournan : résultats synthétiques

B- Grève sur le RER-C

Nous présentons à nouveau ici des graphiques montrant la dégradation de la mise en relation des nœuds, entre des gares du RER-C cette fois-ci. Les calculs sont effectués toutes les minutes pour l'ensemble de la journée. Tout d'abord, ils sont effectués en ne considérant que l'offre du RER-C. Ensuite, nous intégrons les autres lignes afin de voir comment elles peuvent compenser (par redondance partielle) les dysfonctionnements du RER-C.

1 - Calculs sans prise en compte des autres lignes du réseau

Les deux graphiques présentés aux pages suivantes mettent en évidence la variation des effets de la perturbation en fonction du programme de grève. Le programme U16, très restrictif, permet uniquement d'assurer une offre pendant la période de pointe. Cela est particulièrement net dans le cas du deuxième graphique. De manière générale, c'est en dehors des périodes de pointe que les différences sont les plus nettes. L'offre est proposée en priorité sur les heures où la demande est la plus forte. Outre cet aspect temporel, des choix peuvent également être faits au niveau des gares desservies¹. Dans le programme U16, le nombre de gares non desservies est par exemple de 33 (sur les 86 gares).

La dernière heure à laquelle le trajet est possible (ensuite la connectivité n'est plus effective) varie également en fonction du programme. Celle-ci est matérialisée sur les graphiques par un trait vertical, dirigé vers le haut.

➤ Trajet de Ermont-Eaubonne à Invalides

La *figure 63* présente les durées nécessaires pour rejoindre Invalides depuis la gare d'Ermont-Eaubonne en fonction du programme de grève ou en situation normale, sur la plage horaire 4h-22h.

¹ C'est pourquoi nous sommes amenés à exclure certains nœuds des calculs afin de comparer les programmes entre eux.

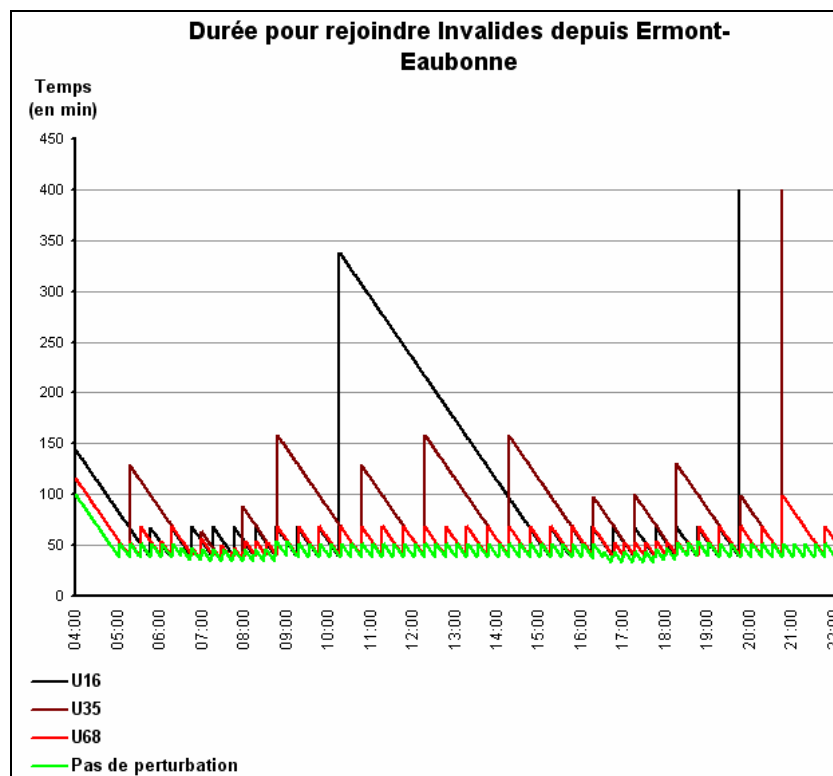


figure 63 *Durée pour rejoindre Invalides depuis Ermont-Eaubonne*

Il apparaît clairement que plus le Plan de Transport correspond à un mouvement social d'importance, plus la variabilité de la durée de connexion augmente (car les fréquences sont moins élevées). Ceci est particulièrement net pour les programmes U35 et U16 où le nombre de circulations est nettement plus faible en dehors des périodes de pointe. On observe également que le dernier train permettant d'effectuer le trajet est plus tôt dans la journée (20h46 avec le programme U35, 19h45 avec le programme U16). Les valeurs minimales sont relativement proches mais tendent à augmenter avec un programme plus restrictif. Ceci est dû à des dessertes moins directes.

Le *tableau 15* présente une synthèse des résultats issus de ce calcul. Ils correspondent à la tranche horaire 6h-19h afin de rester dans une plage horaire où il y a toujours des circulations.

	Service normal	Programme U68	Programme U35	Programme U16
Valeur minimale (en minutes)	33	36	36	38
Valeur maximale (en minutes)	54	69	159	338
Valeur moyenne (en minutes)	43	52	84	105

tableau 15 *Durée pour rejoindre Invalides depuis Ermont-Eaubonne : résultats synthétiques*

➤ Trajet d'Invalides à St-Martin d'Etampes

La *figure 64* présente les durées nécessaires pour rejoindre la gare de St-Martin d'Etampes depuis Invalides en fonction du programme de grève ou en situation normale, sur la plage horaire 4h-21h. Le sens du trajet est de Paris vers la banlieue contrairement au cas précédent.

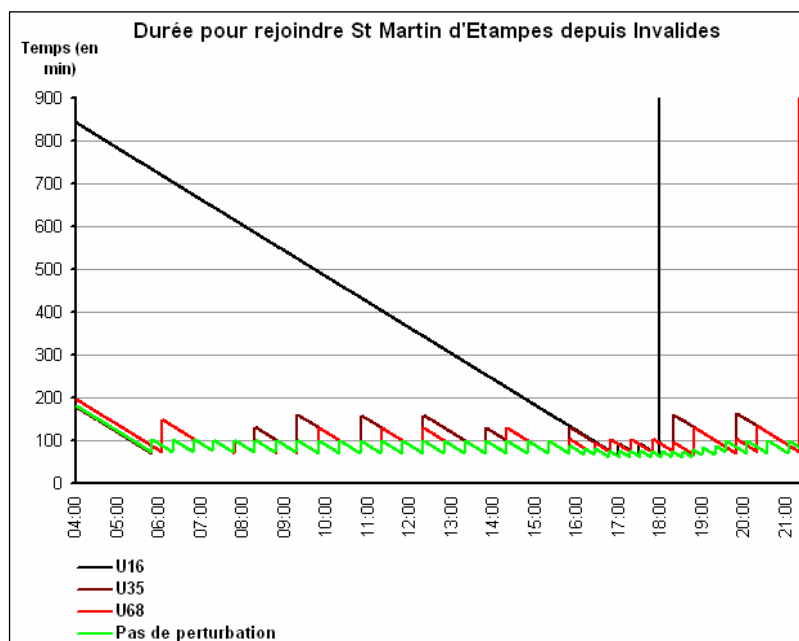


figure 64 Durée pour rejoindre St-Martin d'Etampes depuis Invalides

St-Martin d'Etampes est plus éloigné que Ermont-Eaubonne. On observe que dans le cas du programme U16, il est possible de faire le trajet uniquement sur la plage horaire de la période de pointe du soir (pour revenir de Paris) et uniquement jusqu'à 17h57. La desserte est donc réduite aux besoins les plus essentiels, compte tenu des ressources disponibles. On constate par ailleurs comme dans le cas précédent des fréquences plus faibles lorsque le programme correspond à un mouvement de grève important.

Le *tableau 16* présente une synthèse des résultats issus de ce calcul. Ils correspondent à la tranche horaire 6h-17h afin de rester dans une plage où il y a toujours des circulations.

	Service normal	Programme U68	Programme U35	Programme U16
Valeur minimale (en minutes)	62	68	70	65
Valeur maximale (en minutes)	103	148	160	722
Valeur moyenne (en minutes)	84	93	104	392

tableau 16 Durée pour rejoindre St-Martin d'Etampes depuis Invalides : résultats synthétiques

2 - Calculs avec prise en compte des autres lignes du réseau

Ces calculs ont pour but de montrer l'influence des autres lignes du réseau dans la minimisation de la dégradation de la mise en relation des nœuds du réseau : respectivement Pontoise vers Invalides et Juvisy vers Invalides, avec un programme de grève de niveau U35.

On peut constater l'importance pour les nœuds du réseau d'avoir plusieurs lignes disponibles lorsque l'une d'entre elles connaît des dysfonctionnements. En particulier, la gare de Pontoise dispose de deux lignes permettant de se déplacer vers Paris outre le RER-C : la ligne H du réseau Paris Nord et la ligne J du réseau Paris Saint Lazare. Pour Juvisy, c'est le RER-D qui compense partiellement les dysfonctionnements du RER-C.

Les animations Vidéo, sur le CD, permettent de visualiser les itinéraires (avec ou sans perturbation) en fonction de l'heure de départ.

➤ Trajet de Pontoise à Invalides

La *figure 65* présente, sur la plage horaire 4h-22h, les durées nécessaires pour rejoindre Invalides depuis la gare de Pontoise dans le cas du programme U35 sur le RER-C, avec ou sans prise en compte des autres lignes du réseau.

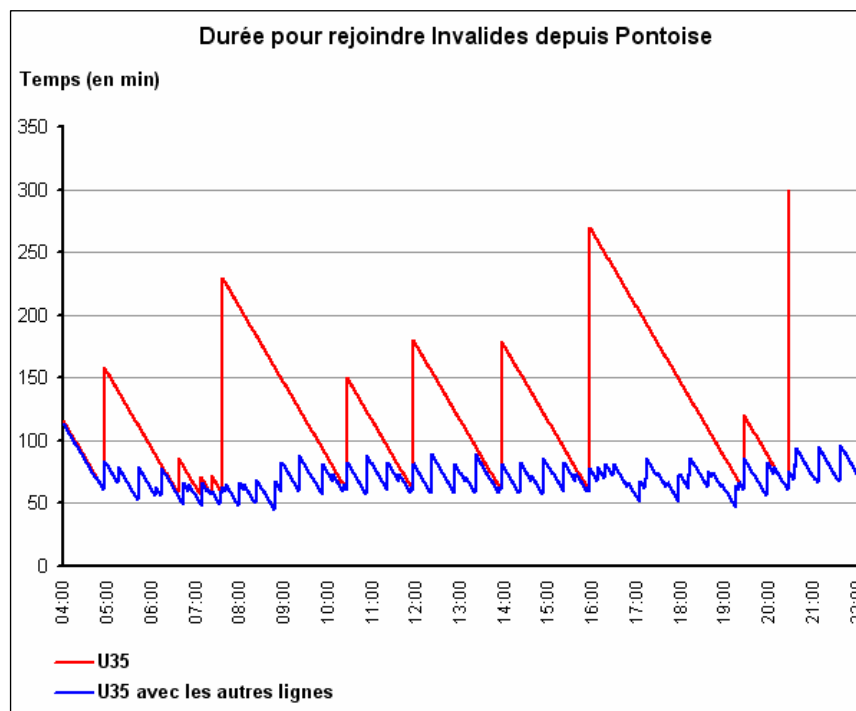
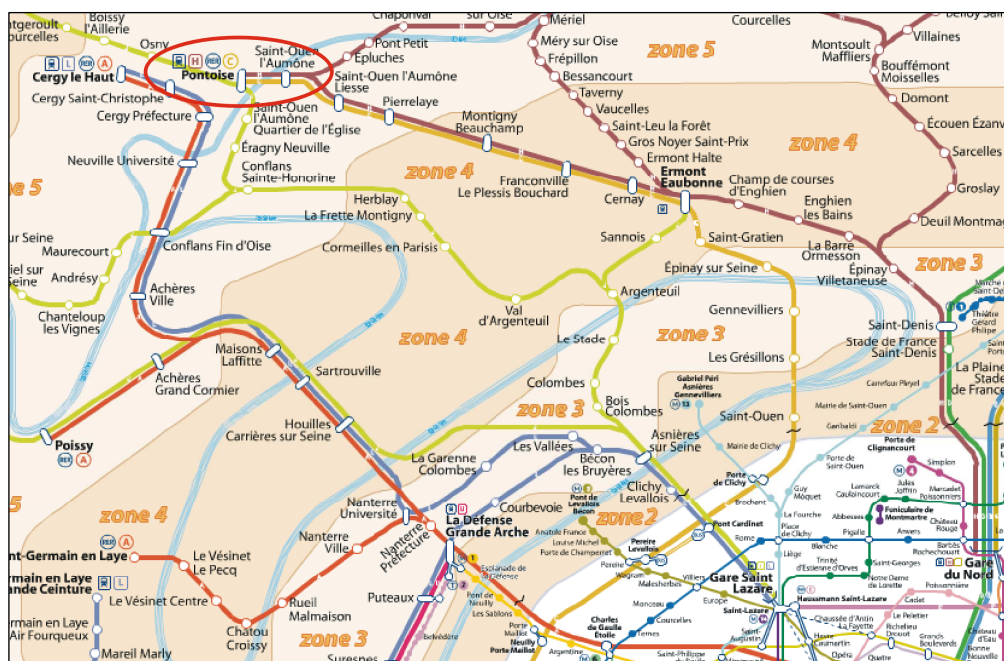


figure 65 Durée pour rejoindre Invalides depuis Pontoise

On constate que les autres lignes compensent de manière non négligeable les dysfonctionnements du RER-C. En effet, la gare de Pontoise dispose de deux autres lignes permettant de se déplacer vers Paris : la ligne H du réseau Paris Nord (en marron sur la *carte 10*) et la ligne J du réseau Paris Saint-Lazare (en vert). Ces lignes permettent par ailleurs d'effectuer le trajet sur une plage horaire plus importante.



carte 10 Situation de Pontoise sur le réseau¹

La vidéo **NaN-5** montre bien l'utilisation de ces lignes (en particulier la ligne J) pour effectuer le trajet. La vidéo **NaN-6** montre par ailleurs que même en l'absence de perturbations sur le RER-C, il est parfois plus rapide d'utiliser les lignes J ou H même si elles induisent des correspondances dans Paris pour rejoindre Invalides.

Le *tableau 17* présente une synthèse des résultats issus de ce calcul, correspondant à la tranche horaire 6h-19h. On peut remarquer que le trajet le plus rapide (45 minutes) n'est pas obtenu en utilisant le RER-C (55 minutes pour le trajet le plus rapide) mais grâce à une autre ligne du réseau (Ligne J jusqu'à la gare St-Lazare et poursuite du trajet sur la ligne 13 jusqu'à Invalides). La présence des autres lignes diminue les pertes de temps.

¹ Source du fonds de carte : www.transilien.com.

	Service normal sur toutes les lignes	Service normal sur le RER-C et non prise en compte des autres lignes	Programme U35 sur le RER-C + service normal sur toutes les lignes	Programme U35 sur le RER-C (non prise en compte des autres lignes)
Valeur minimale (en minutes)	45	55	45	57
Valeur maximale (en minutes)	74	93	89	270
Valeur moyenne (en minutes)	63	70	68	131

tableau 17 Durée pour Invalides depuis Pontoise : résultats synthétiques

➤ Trajet de Juvisy à Invalides

La figure 66 présente, sur la plage horaire 4h-22h, les durées nécessaires pour rejoindre Invalides depuis la gare de Juvisy dans le cas du programme U35 sur le RER-C, avec ou non prise en compte des autres lignes du réseau.

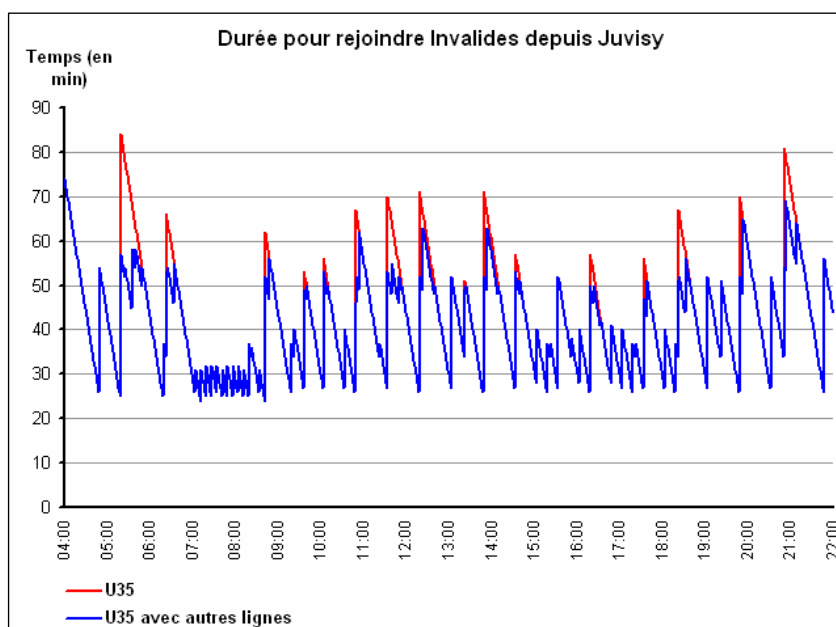


figure 66 Durée pour rejoindre Invalides depuis Juvisy

La compensation des dysfonctionnements par les autres lignes est moins forte que dans le cas précédent. Elle se fait grâce au RER-D, en vert sur la figure 67.



figure 67 Situation de Juvisy sur le réseau¹

La vidéo NaN-7 montre les itinéraires au cours du temps et permet d’observer que le RER-D est utilisé à certaines heures pour aller le plus rapidement à Invalides (tous les itinéraires passant par Villeneuve St-Georges sont dans ce cas). Il s’agit des moments où l’attente du prochain train RER-C est trop longue à Juvisy. Dans le cas du programme U16, cela est encore plus net (voir la vidéo NaN-8).

C- Interruption de trafic entre Austerlitz et Boulevard Victor : influence du Tramway T3

Nous étudions ici l’influence du T3, mis en service le 16 décembre 2006, dans la minimisation de la dégradation de la mise en relation des nœuds du réseau, lors de perturbations. En effet, la création d’une infrastructure de transport et sa mise en service opérationnelle n’ont pas une influence uniquement sur les temps de parcours théoriques entre les nœuds d’un réseau. Elles peuvent parfois prendre toute leur importance lors de dysfonctionnements de celui-ci.

Le scénario considéré est l’interruption de trafic entre Austerlitz et Boulevard Victor sur le RER-C.

¹ Source du fonds de carte : www.transilien.com.

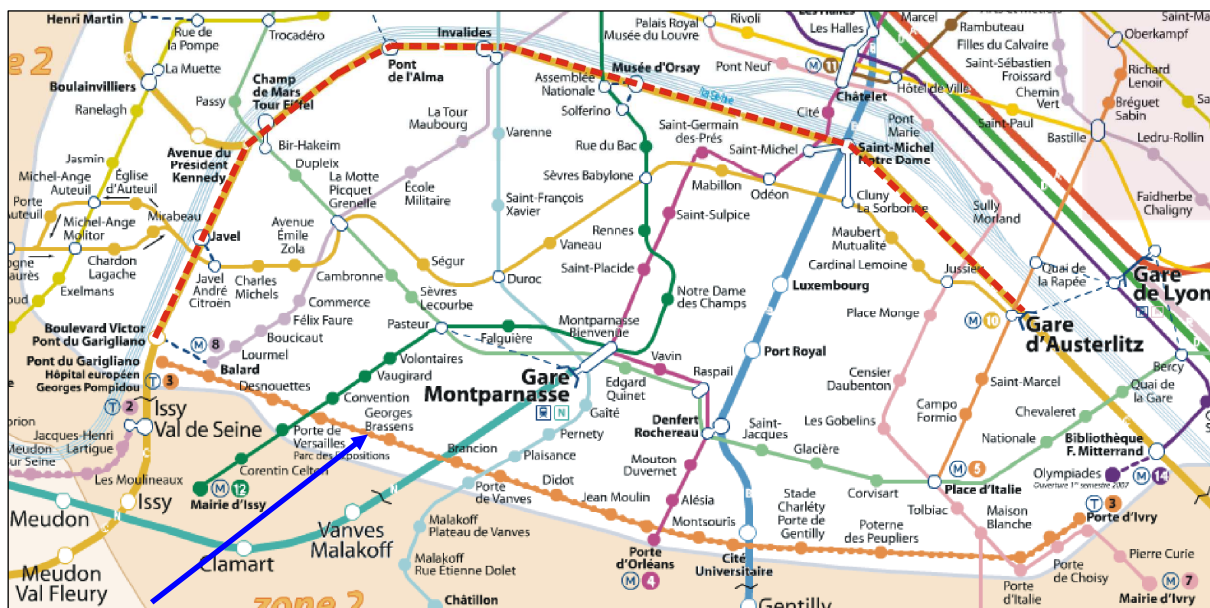


figure 68 Situation du tramway T3 et de la perturbation étudiée¹

1 - Trajet de Juvisy à Boulevard Victor

La figure 69 présente, sur la plage horaire 5h-11h, les durées nécessaires pour rejoindre Boulevard Victor depuis la gare de Juvisy.

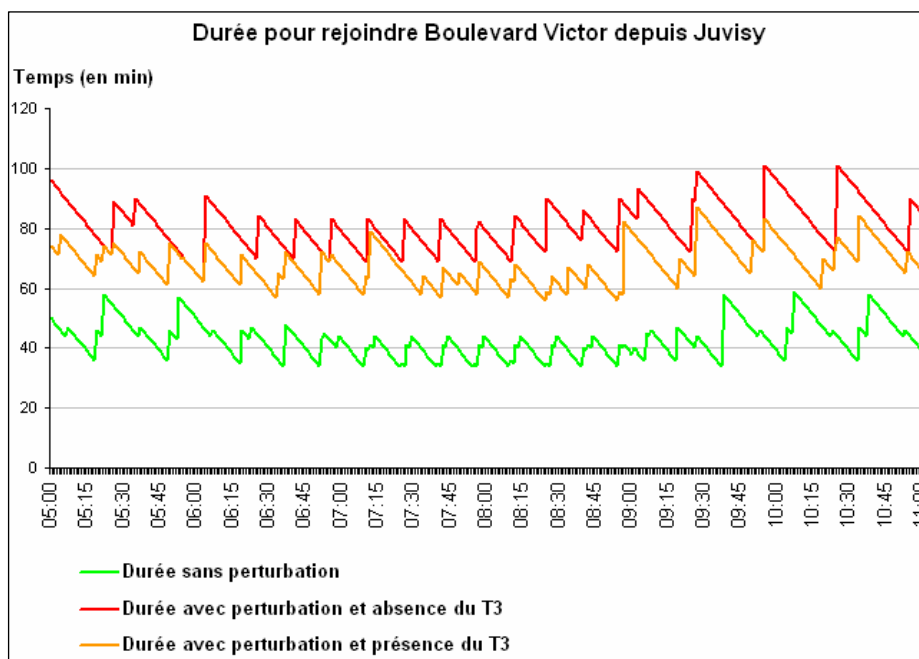


figure 69 Durée pour rejoindre Boulevard Victor depuis Juvisy

L'influence du T3 est présente uniquement lors de dysfonctionnements du réseau. Les deux courbes représentant les durées en absence de perturbation sont confondues alors qu'on

¹ Source du fonds de carte : www.transilien.com.

observe des écarts non négligeables en situation perturbée (13 minutes de différence en moyenne).

Le *tableau 18* présente une synthèse des résultats issus de ce calcul.

	Durée sans perturbation (en minutes)	Durée avec perturbation et absence du T3 (en minutes)	Durée avec perturbation et présence du T3 (en minutes)
Valeur minimale	34	62	56
Valeur maximale	59	101	87
Valeur moyenne	43	81	68

tableau 18 Durée pour rejoindre Boulevard Victor depuis Juvisy : résultats synthétiques

Les vidéos **NaN-9** et **NaN-10** montrent respectivement les itinéraires au cours du temps sans et avec prise en compte du T3. On observe que le gain de temps lié au T3 est lié à l'utilisation d'une faible portion de celui-ci (tronçon Balard-Pont du Garigliano) mais suffisante pour éviter un détour important. Notons néanmoins que ce cas de figure est théorique car une marche à pied un peu plus longue permettrait également d'éviter le détour.

2 - Trajet de Bourg-la-Reine à Boulevard Victor

La *figure 70* présente, sur la plage horaire 5h-11h les durées nécessaires pour rejoindre Boulevard Victor depuis Bourg-la-Reine.

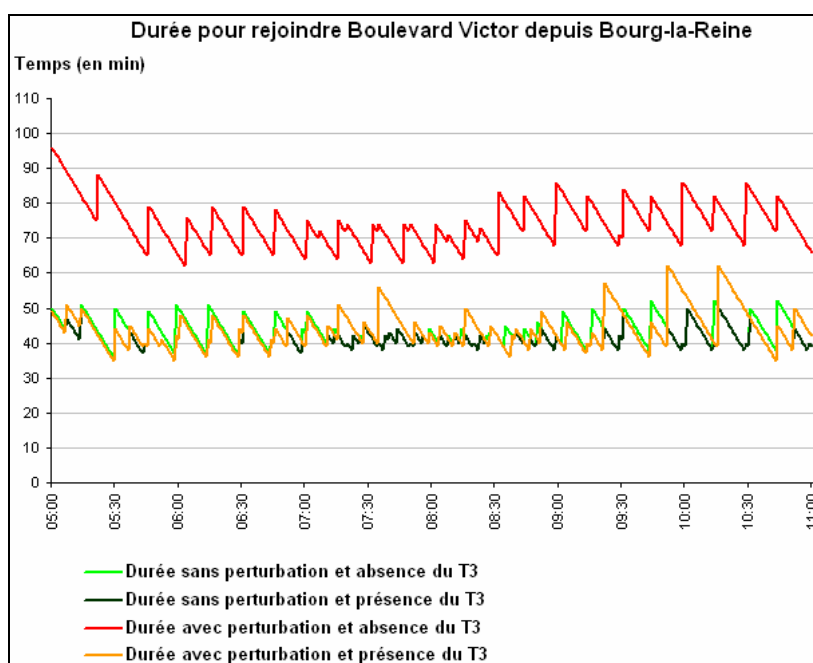


figure 70 Durée pour rejoindre Boulevard Victor depuis Bourg-la-Reine

Le T3 permet déjà des gains de temps en temps normal. Ces derniers sont néanmoins faibles et parfois nuls à certaines heures (le trajet via le RER-C étant plus rapide), mais deviennent importants en situation perturbée.

Le *tableau 19* présente une synthèse des résultats issus des calculs. On constate un écart conséquent pour les valeurs correspondant aux calculs effectués avec perturbation avec prise en compte ou non du T3 (30 minutes pour la valeur moyenne) alors que les différences en l'absence de perturbation sont peu importantes.

	Durée sans perturbation et présence du T3 (en minutes)	Durée sans perturbation et absence du T3 (en minutes)	Durée avec perturbation et présence du T3 (en minutes)	Durée avec perturbation et absence du T3 (en minutes)
Valeur minimale	35	36	35	62
Valeur maximale	50	52	62	96
Valeur moyenne	41	43	44	74

tableau 19 Durée pour rejoindre Boulevard Victor depuis Bourg-la-Reine : résultats synthétiques

Les vidéos suivantes permettent de visualiser les itinéraires :

- **NaN-11** : sans perturbation et sans prise en compte du T3,
- **NaN-12** : sans perturbation et avec prise en compte du T3,
- **NaN-13** : avec perturbation et sans prise en compte du T3,
- **NaN-14** : avec perturbation et avec prise en compte du T3.

La même remarque peut être faite que précédemment sur une possible marche à pied pour rejoindre Boulevard Victor au lieu d'effectuer un détour important pour contourner les problèmes du RER-C.

D- Analyse des formes des figures

Sur ces graphiques présentant les évolutions des temps de connexion entre 2 nœuds du réseau, on trouve des formes variées qu'il est utile de caractériser car elles traduisent des spécificités propres aux transports collectifs. Nous présentons tout d'abord les formes correspondant aux évolutions des durées de connexion avant de montrer celles correspondant aux différences entre situation perturbée et situation normale¹.

¹ Les formes présentées ici correspondent à des calculs déjà présentés plus haut ou à des calculs sur d'autres relations.

Les courbes présentant les évolutions de durées ont des formes plus ou moins régulières. Un cadencement des circulations entraîne des formes régulières alors que les dessertes variables et non cadencées ont la conséquence inverse. Dans le cas de trajets avec correspondances, les formes peuvent difficilement être très régulières. De plus, comme nous l'avons vu, les itinéraires les plus performants peuvent varier au cours du temps. Cela constitue également un facteur de non-régularité.

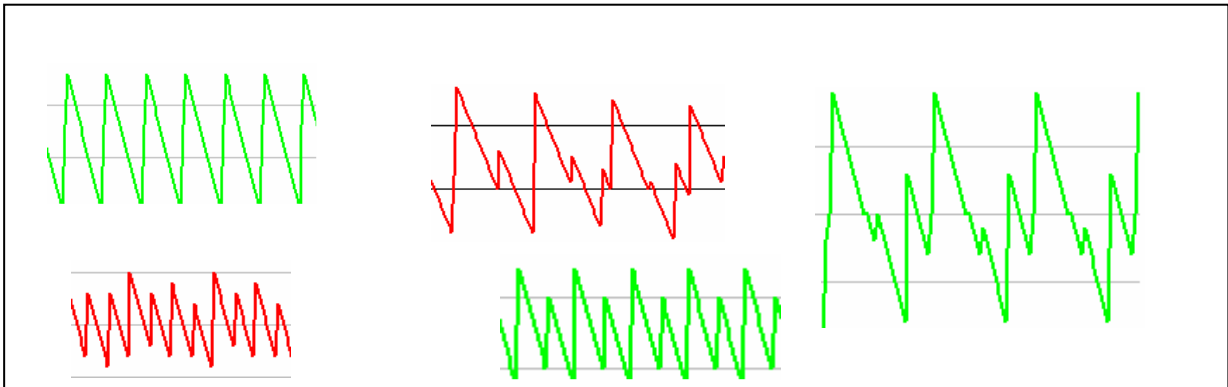


figure 71 *Formes relativement régulières traduisant une régularité de l'évolution des durées de connexion*

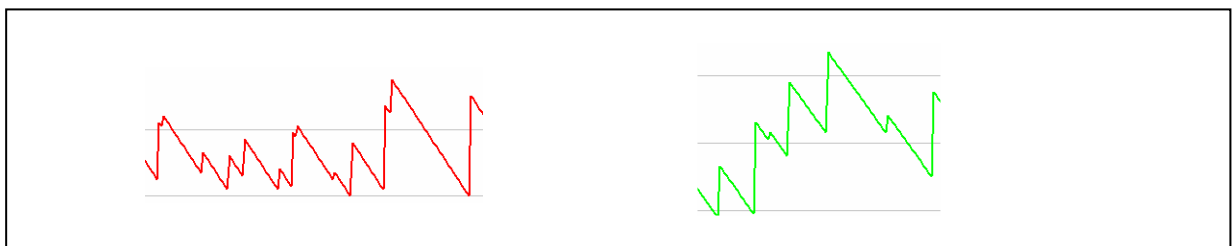


figure 72 *Formes irrégulières traduisant des irrégularités de l'évolution des durées de connexion*

Il est possible de visualiser les variations de fréquence. Celles-ci peuvent être liées au passage d'une plage horaire de pointe à une plage horaire avec moins de circulations comme sur la figure 73.



figure 73 *Passage d'une période de pointe à une période creuse*

On visualise également des fréquences moins importantes en raison de la mise en place d'un plan de Transport Adapté, lors d'une grève par exemple.

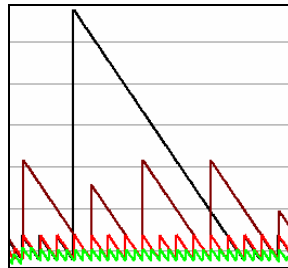


figure 74 *Fréquences plus ou moins importantes en fonction du Plan de Transport mis en place*

Les représentations des différences de temps de connexion entre situation normale et situation perturbée présentent des formes très variables. Les différences peuvent être nulles. La courbe est alors confondue avec l'axe des abscisses. Cela signifie alors que l'itinéraire le plus rapide n'utilise jamais le tronçon perturbé. Il peut y avoir quelques pics à certaines heures. Cela peut signifier que le tronçon perturbé est utilisé pour des itinéraires plus performants, mais moins fréquents que des itinéraires alternatifs.

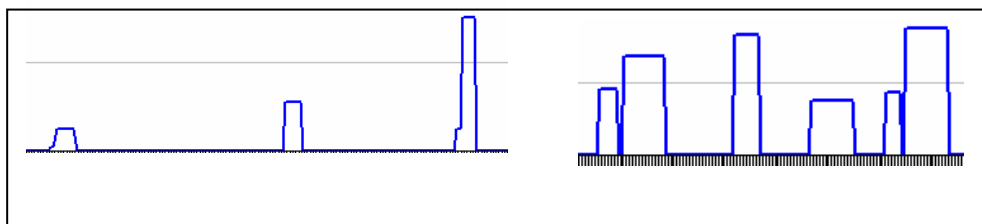


figure 75 *Courbes représentant une différence nulle à certaines heures et conséquente à d'autres*

Les écarts peuvent être relativement stables dans le temps. La perturbation a alors un impact régulier dans le temps.

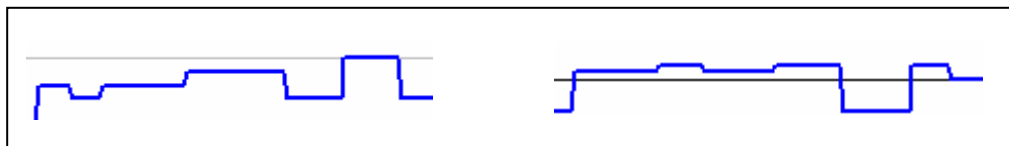


figure 76 *Perturbations avec des conséquences relativement stables dans le temps*

Les conséquences peuvent être très variables dans le temps mais on retrouve parfois une certaine régularité.

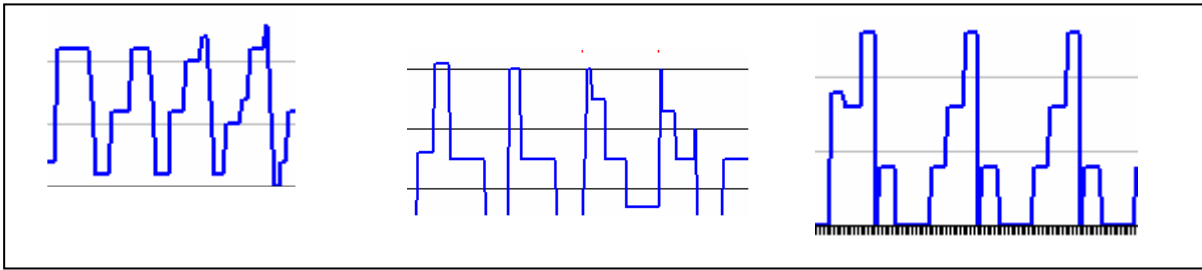


figure 77 Perturbations avec des conséquences très variables dans le temps

Lorsque la situation perturbée correspond à la mise en place d'un Plan de Transport Adapté, les temps de connexion minimum sont globalement les mêmes mais les fréquences varient. Si celles-ci sont régulières, la courbe représentant les écarts a une forme d'escalier (en bleu dans la figure 78).

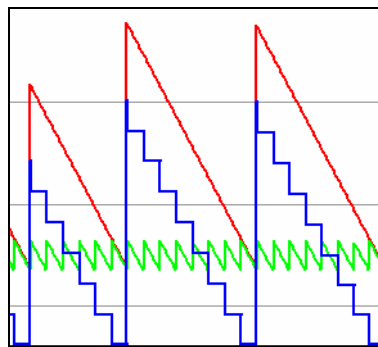


figure 78 Différence entre situation normale et perturbée lorsque seules les fréquences varient

Les calculs de nœud à nœud permettent d'obtenir quelques premières mesures sur les conséquences de perturbations, à l'échelle de simples relations. On a notamment pu observer les pertes de temps engendrées par les dysfonctionnements, celles-ci étant variables au cours du temps et pouvant être partiellement compensées grâce à d'autres lignes du réseau.

Section 4 - Calculs unipolaires : mesure de la dégradation des opportunités de déplacement au départ d'un nœud du réseau

A- Interruption de trafic entre Mantes-la-Jolie et Plaisir-Grignon

La *figure 79* montre **de manière superposée** les durées nécessaires pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ de Mantes-la-Jolie à 7h47, avec et sans perturbation. Cette heure correspond à un départ de train au départ de Mantes-la-Jolie vers Paris-Montparnasse via Plaisir-Grignon.

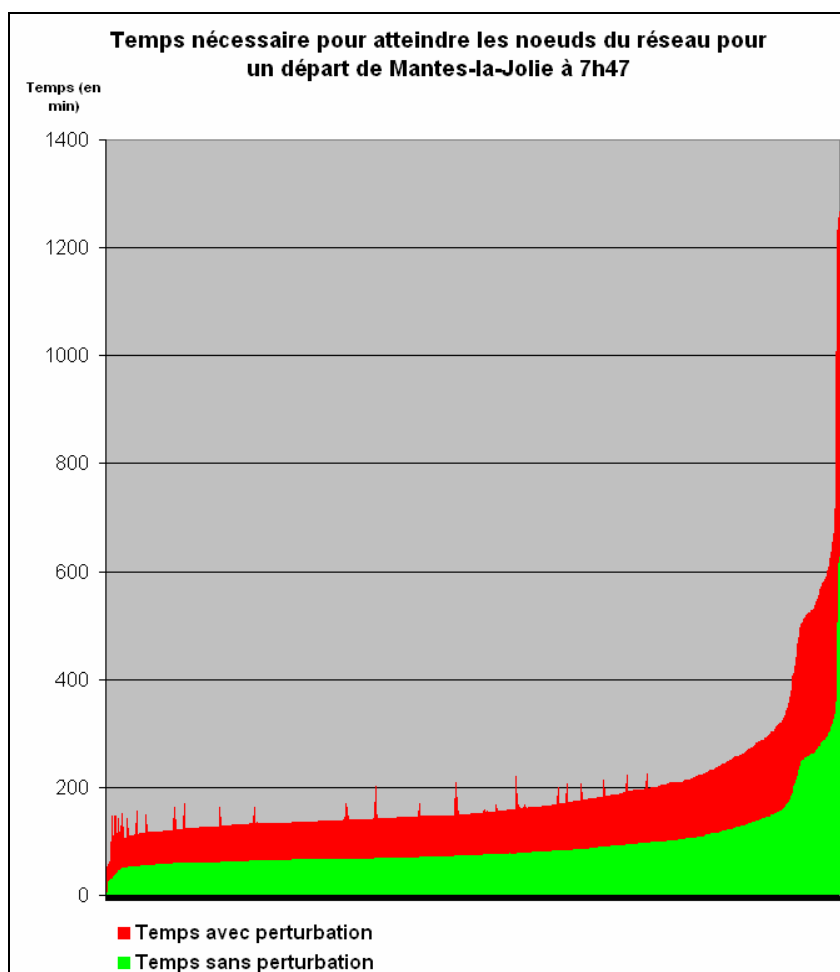


figure 79 Temps nécessaire pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ de Mantes-la-Jolie à 7h47

Les relations sont classées par temps de parcours croissant en absence de perturbation. La plupart d'entre elles ne sont pas péjorées (longueur du trait rouge = longueur du trait vert) mais quelques unes (correspondant à des pics sur le graphique) le sont fortement (jusqu'à 1h15 pour Plaisir les Clayes, 34 minutes pour Versailles-Chantiers...). Les durées très importantes à droite du graphique correspondent à des gares où le nombre de trains par jour est très faible (ex : gare de Monnerville) et où il faut attendre tard dans la journée pour trouver un train les desservant. C'est pourquoi nous avons mis en place dans PERTURB une

procédure spécifique pour ne pas prendre en compte certains nœuds du réseau pour des calculs unipolaires ou multipolaires.

Le graphique de la *figure 80* correspond à un zoom sur les nœuds les plus proches (en temps) de Mantes-la-Jolie afin de bien visualiser les pics, correspondant aux relations les plus affectées par la perturbation.

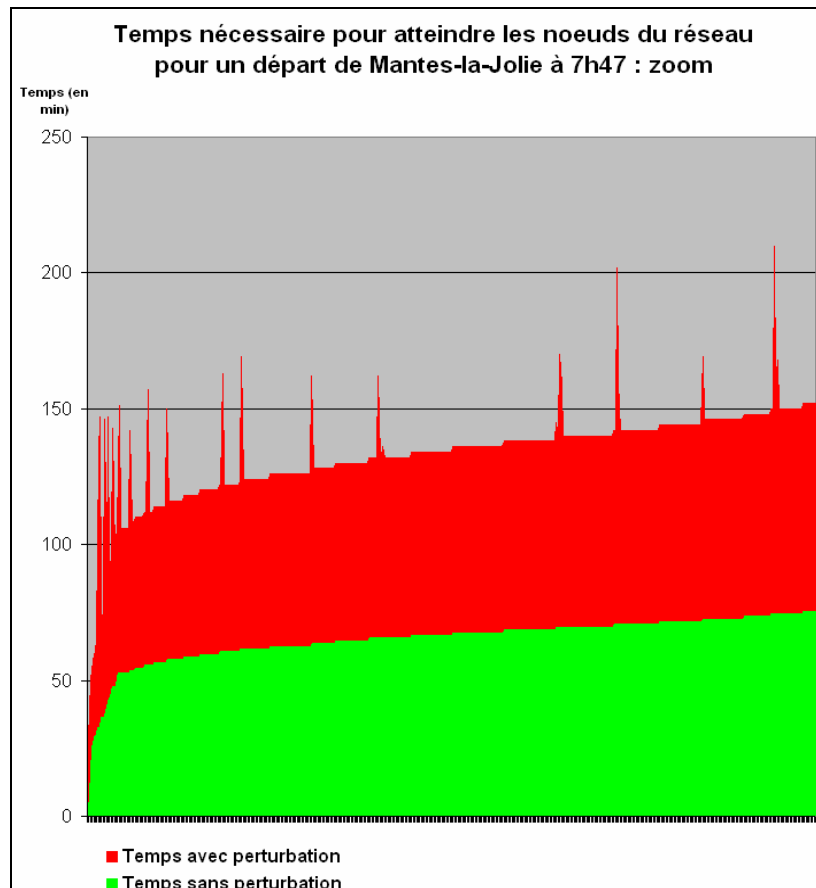


figure 80 Temps nécessaire pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ de Mantes-la-Jolie à 7h47 : zoom

1 minute plus tard, à 7h48, les conséquences sont nulles : on n'observe plus de pics. En effet, les fréquences de circulations étant relativement faibles sur l'axe Mantes-la-Jolie – Plaisir-Grignon, il est toujours plus rapide à cette heure de passer par la ligne J du réseau Paris St-Lazare et les conséquences d'une interruption de trafic entre Mantes-la-Jolie et Plaisir-Grignon sur la ligne N sont nulles.

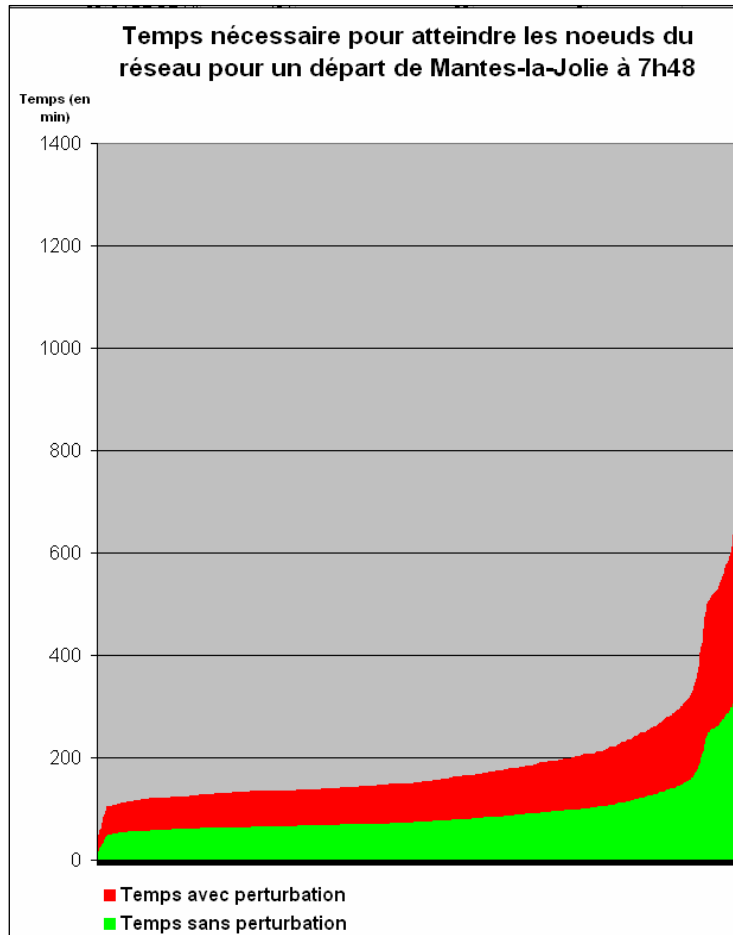


figure 81 Temps nécessaire pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ de Mantes-la-Jolie à 7h48

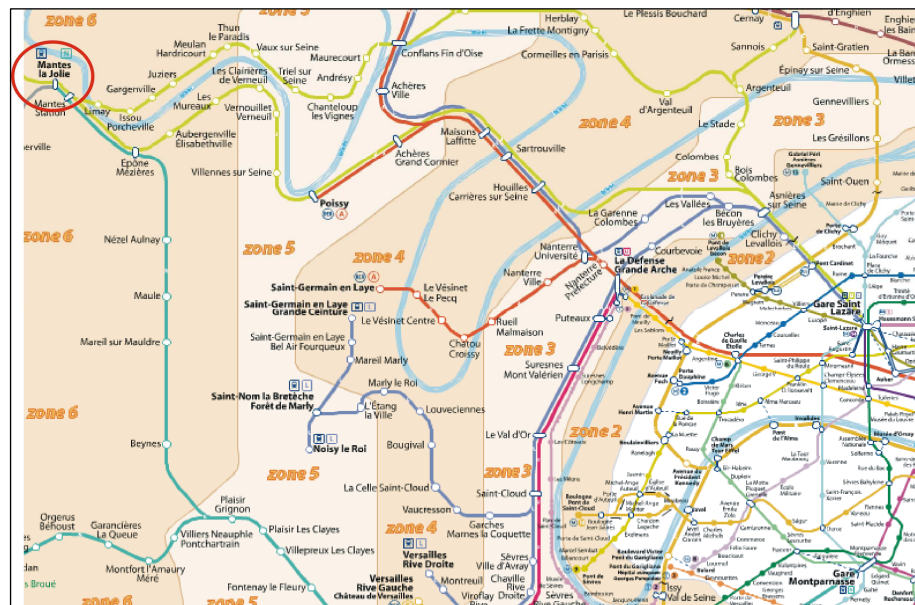


figure 82 Situation de Mantes-la-Jolie sur le réseau¹

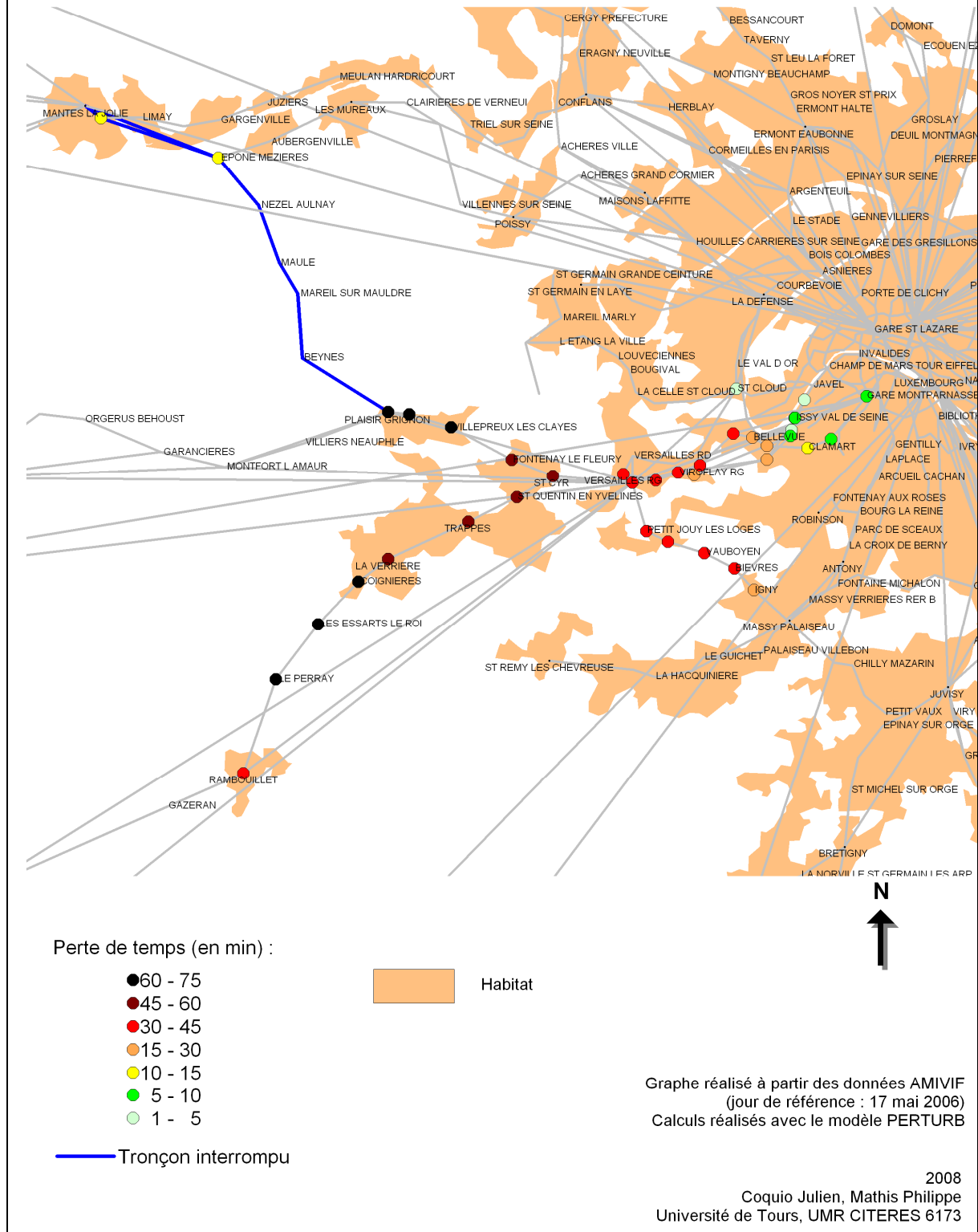
¹ Source du fonds de carte : www.transilien.com.

Les deux cartes suivantes spatialisent l'information, en montrant :

- les relations concernées par la perturbation,
- les reports de chemins minimaux.

La *carte 11* montre les pertes de temps pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ à 7h47. On observe ainsi que les conséquences de la perturbation se situent bien au-delà de la partie du réseau connaissant des dysfonctionnements (effets indirects de la perturbation). A proximité de la gare Montparnasse, on se situe à une limite entre les parties du réseau concernées ou non par une augmentation du temps de connexion avec Mantes-la-Jolie. Il s'agit de nœuds pour lesquels la durée est à peu près équivalente, que l'on utilise la ligne N ou la ligne J. Certaines gares ne peuvent par ailleurs plus être desservies : Nezel-Aulnay, Maule, Mareil sur Mauldre, Beynes.

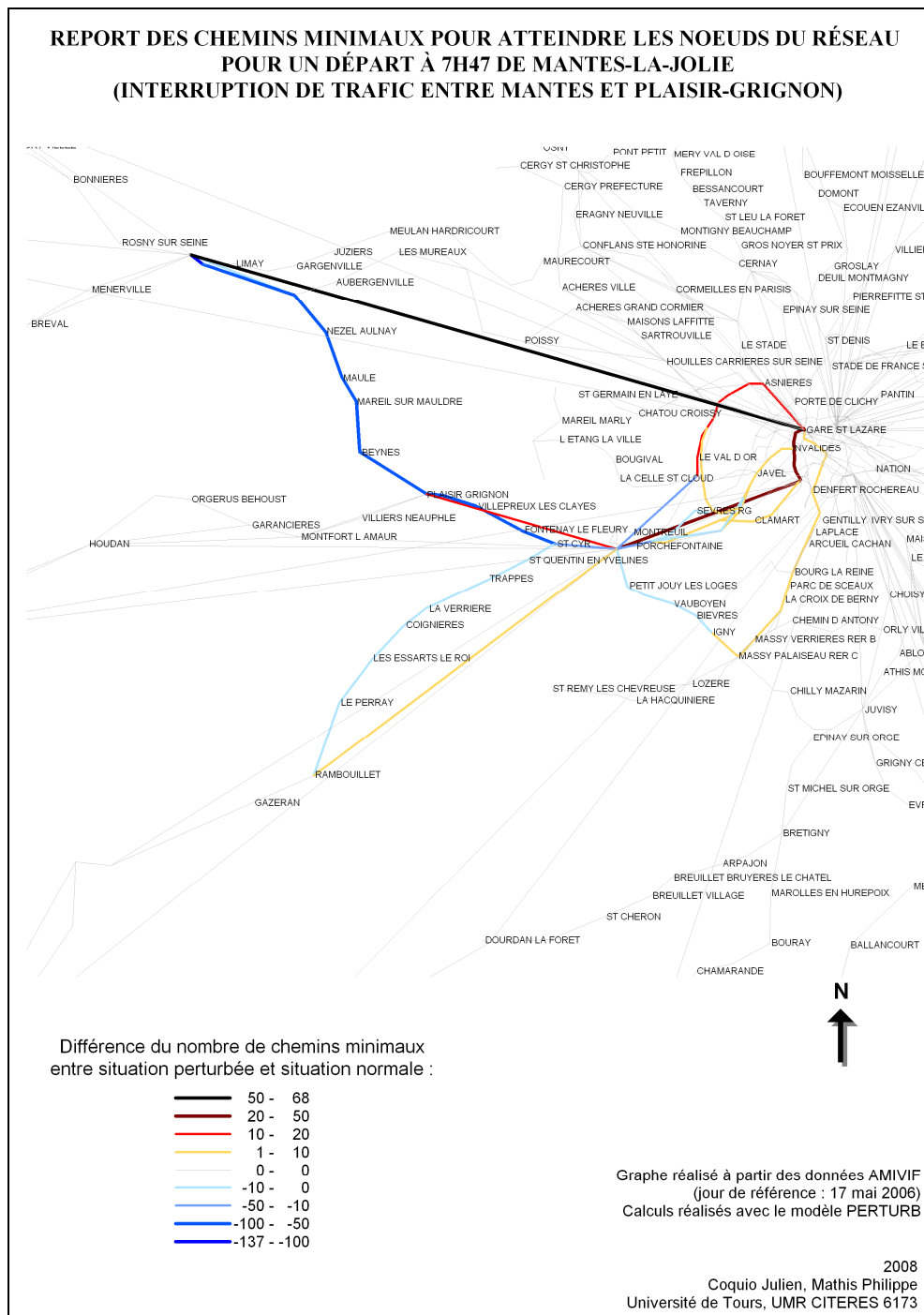
**PERTE DE TEMPS POUR ATTEINDRE LES NOEUDS DU RÉSEAU
POUR UN DÉPART À 7H47 DE MANTES-LA-JOLIE
(INTERRUPTION DE TRAFIC ENTRE MANTES ET PLAISIR-GRIGNON)**



carte 11 Perte de temps pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ à 7h47 de Mantes-la-Jolie (interruption de trafic entre Mantes-la-Jolie et Plaisir-Grignon)

La *carte 12* montre les reports de chemins minimaux. On observe qu'un train direct de Mantes-la-Jolie à Paris permet de rejoindre la gare St-Lazare et d'emprunter ensuite les lignes en correspondance. On peut visualiser une diffusion des parcours traduite par des couleurs de plus en plus claires au fur et à mesure que l'on s'éloigne de la gare St-Lazare.

Notons que dans certains cas, le détour est important (ex : pour la gare de Plaisir-Grignon) car le tronçon perturbé se situe dans un environnement faiblement maillé.



carte 12 Report des chemins minimaux pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ à 7h47 de Mantes-la-Jolie (interruption de trafic entre Mantes-la-Jolie et Plaisir-Grignon)

B- Interruption de trafic entre Austerlitz et Invalides

Les cartes et les graphiques ci-dessous montrent quelques conséquences d'une interruption de circulation entre Austerlitz et Invalides.

La *figure 83* montre, sur la plage horaire 5h-12h, la durée moyenne pour atteindre tous les nœuds du réseau au départ de la gare d'Austerlitz. Celle-ci est en moyenne de 54 minutes sans perturbation et 58 minutes avec perturbation¹. La différence maximale est de 8 minutes et la différence minimale de 1 minute².

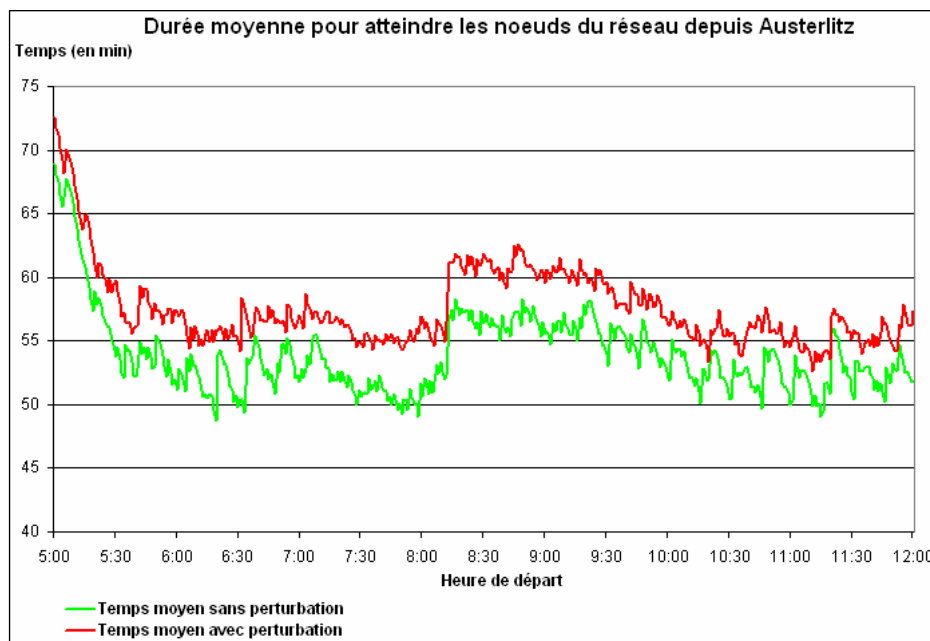


figure 83 Durée moyenne pour atteindre les nœuds du réseau depuis Austerlitz

La *figure 84* montre le temps nécessaire pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ de la gare d'Austerlitz à 8h. Le cas de figure est différent de ce que l'on a pu observer précédemment. Le nombre relations concernées par la perturbation est plus élevé. Les quatre pics principaux correspondent à des gares faiblement desservies (Bruyères sur Oise, Boran sur Oise, Précy sur Oise, St-Leu d'Esserent) au Nord de la région Île-de-France (dans l'Oise). Le temps de parcours supplémentaire induit par la perturbation entraîne une non-possibilité de la correspondance à 8h57 à Pontoise (ligne H, axe Pontoise-Creil). Le train suivant est à 12h26, d'où la perte de temps très importante.

L'impact d'une perturbation sur une relation donnée dépend des fréquences de circulations sur chacune des parties de l'itinéraire. Plus celles-ci sont faibles, plus les conséquences d'une perturbation sont potentiellement importantes.

¹ Il s'agit ici d'une moyenne de durées moyennes.

² A noter que de nombreuses relations ne sont pas concernées par cette perturbation. C'est pourquoi, dans le cas de calculs multipolaires, nous avons travaillé spécifiquement sur les relations concernées par une perturbation (voir section suivante).



figure 84 Temps nécessaire pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ d'Austerlitz à 8h

La figure 85 correspond à un zoom sur les nœuds les plus proches (en temps) d'Austerlitz. On observe bien que le nombre de relations concernées par la perturbation est relativement élevé.

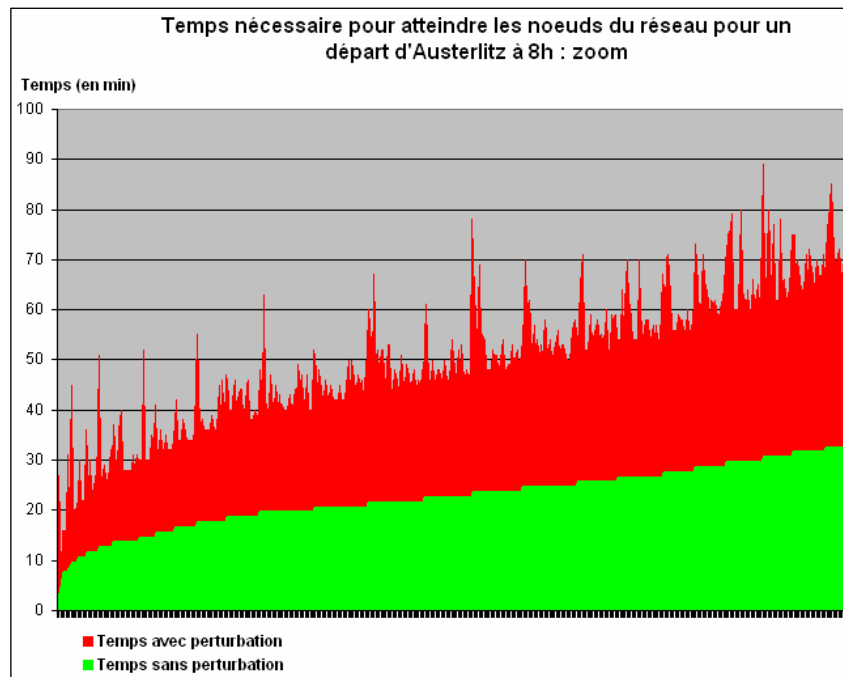
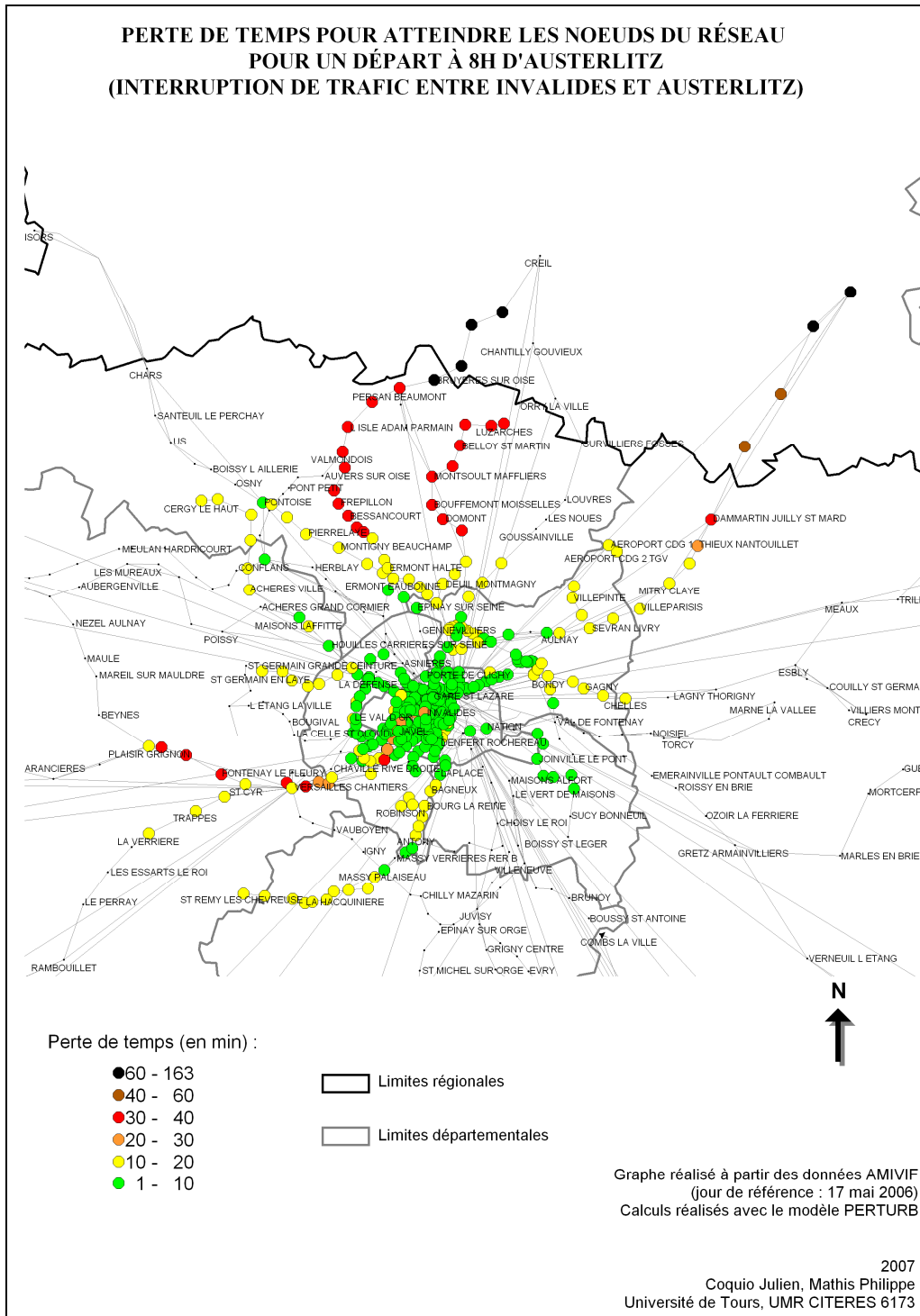


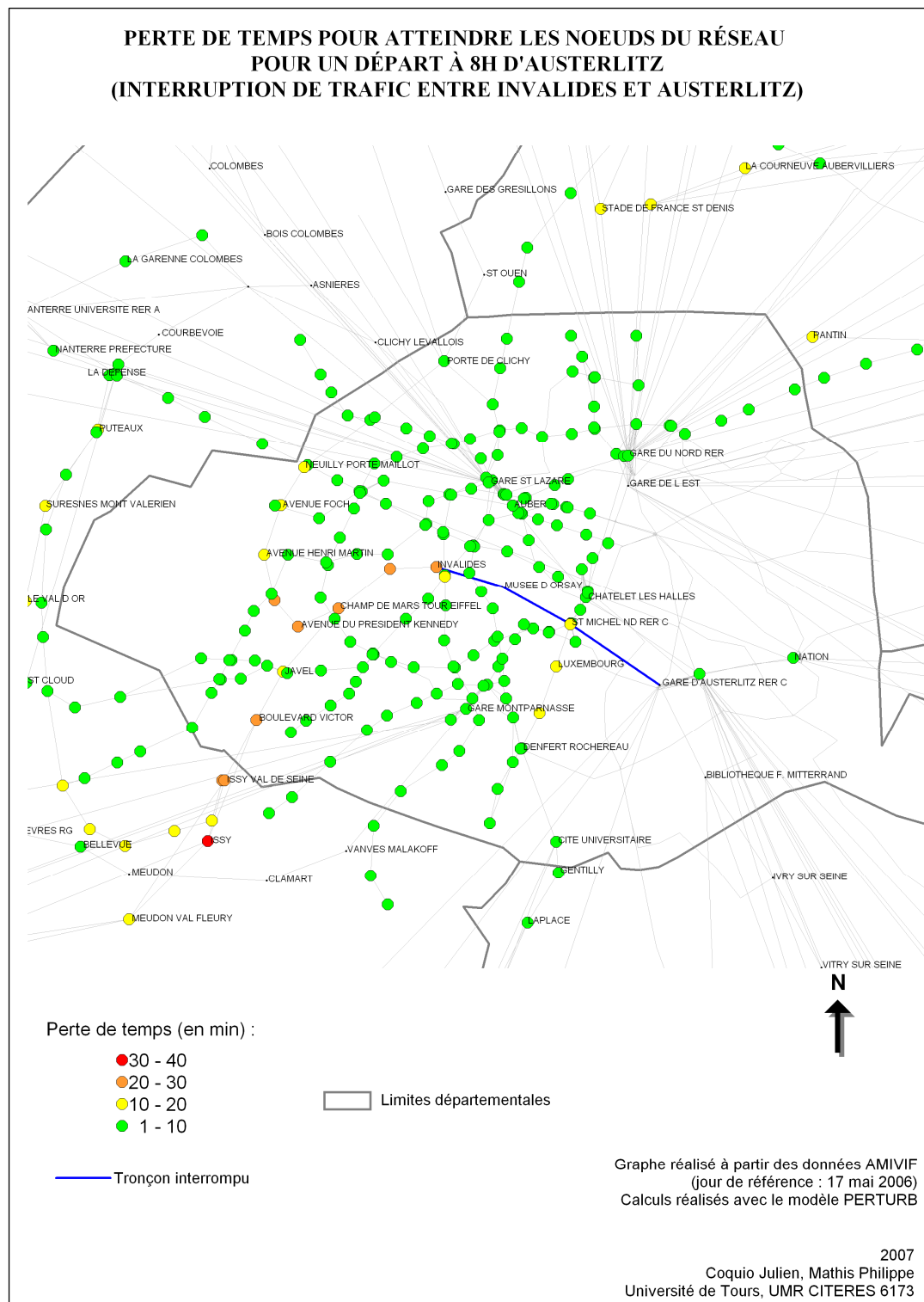
figure 85 Temps nécessaire pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ d'Austerlitz à 8h : zoom

La *carte 13* montre les pertes de temps pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ d'Austerlitz à 8h. On visualise que quelques relations vers le Nord sont particulièrement péjorées.



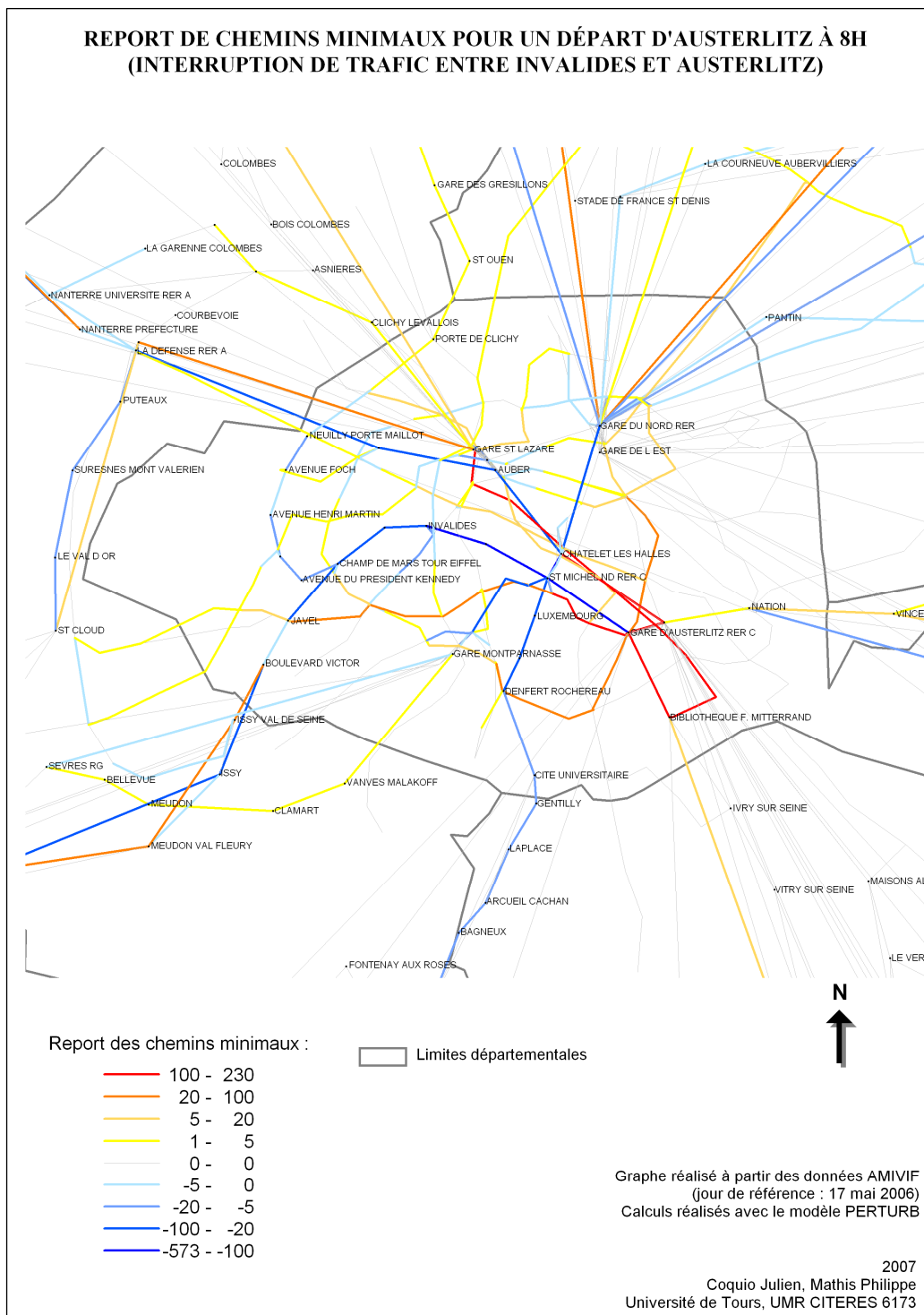
carte 13 Perte de temps pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ d'Austerlitz à 8h (interruption de trafic entre Invalides et Austerlitz)

La carte 14 correspond à un zoom sur Paris, la carte précédente ne mettant pas en évidence à une échelle fine les différences pouvant exister. On peut ainsi remarquer que les nœuds les plus touchés sont ceux situés sur ou à proximité du RER-C, ce qui est logique.



carte 14 Perte de temps pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ à 8 d'Austerlitz (interruption de trafic entre Austerlitz et Invalides)

La carte 15 montre les reports de chemins minimaux. Avec une certaine connaissance du réseau, on peut observer que les reports se font majoritairement sur les lignes 1, 5, 6, 10 et 14 du réseau métropolitain. Ceci est également mis en évidence sur la *figure 86* qui agrège les données par ligne.



carte 15 Report de chemins minimaux pour un départ d'Austerlitz à 8h (interruption de trafic entre Austerlitz et Invalides)

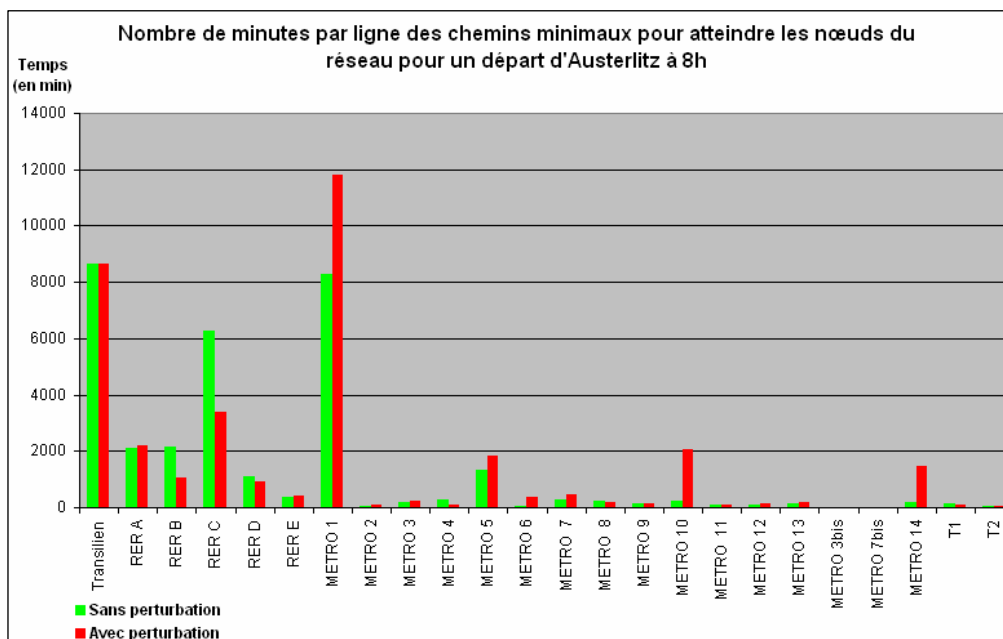


figure 86 Nombre de minutes par des chemins minimaux pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ d'Austerlitz à 8h¹

C- Mouvement social sur le RER-C

Nous étudions ici les baisses des opportunités de déplacement au départ de gares du réseau lors de mouvements sociaux sur le RER-C.

1 - Au départ de Massy-Palaiseau

La figure 87 présente, sur la plage horaire 5h-12h, les durées moyennes pour atteindre les gares du RER-C depuis Massy-Palaiseau, avec un service normal et pour les programmes U68 et U35. Seule l'offre du RER-C est prise en compte.

¹ Toutes les lignes Transilien (H, K, P, L, N, J, R) ont été ici regroupées.

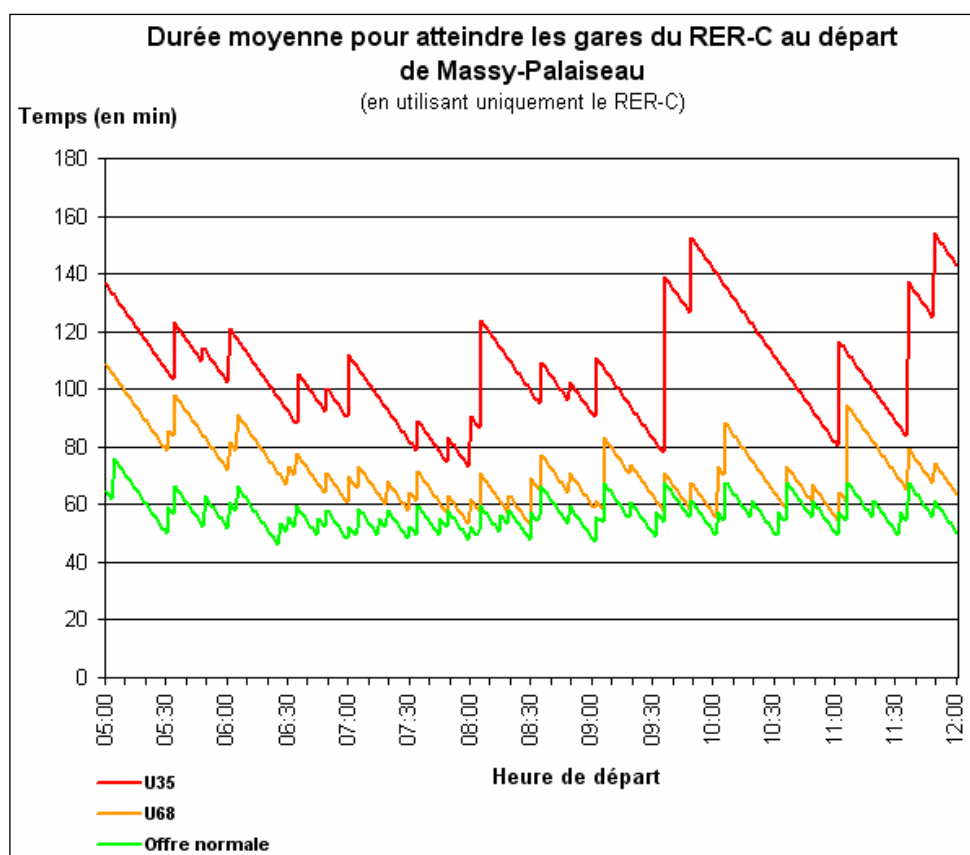


figure 87 Durée moyenne pour atteindre les gares du RER-C au départ de Massy-Palaiseau (en utilisant uniquement le RER-C)

Au départ de Massy-Palaiseau, le temps moyen pour atteindre les gares du RER-C est de 57 minutes en l'absence de perturbation, 72 minutes avec le programme U68 et 107 minutes avec le programme U35. Outre cette augmentation de temps, plus l'offre est dégradée, plus la variabilité augmente comme le *tableau 20* le montre clairement.

	Durée moyenne sans perturbation (en minutes)	Durée moyenne avec le programme U68 (en minutes)	Durée moyenne avec le programme U35 (en minutes)
Valeur minimale	46	53	73
Valeur maximale	76	109	154
Valeur moyenne	57	72	107

tableau 20 Durée pour rejoindre les gares du RER-C au départ de Massy-Palaiseau (en utilisant uniquement le RER-C) : valeurs synthétiques

La *figure 88* correspond au précédent, sauf que les autres lignes du réseau sont prises en compte. On constate que les durées sont globalement inférieures, même en situation normale (ce qui signifie que les autres lignes du réseau permettent de trouver des itinéraires plus rapides, même s'ils occasionnent plus de correspondances).

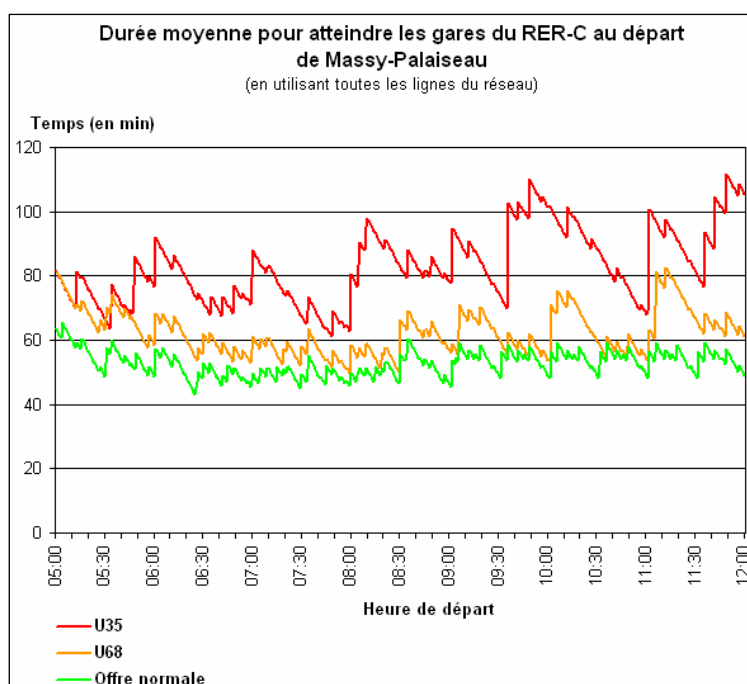


figure 88 *Durée moyenne pour atteindre les gares du RER-C au départ de Massy-Palaiseau (en utilisant toutes les lignes du réseau)*

En situation perturbée, les autres lignes permettent de limiter les valeurs maximales (112 minutes en U35 contre 154 minutes dans le cas précédent).

Le *tableau 21* présente une synthèse des résultats issus de ce calcul.

	Durée moyenne sans perturbation (en minutes)	Durée moyenne avec le programme U68 (en minutes)	Durée moyenne avec le programme U35 (en minutes)
Valeur minimale	43	50	61
Valeur maximale	66	83	112
Valeur moyenne	53	62	83

tableau 21 *Durée pour atteindre les gares du RER-C au départ de Massy-Palaiseau (en utilisant toutes les lignes) : valeurs synthétiques*

2 - Au départ de Pontoise

La *figure 89* présente, sur la plage horaire 5h-12h, les durées moyennes pour atteindre les gares du RER-C depuis Pontoise, avec un service normal et pour les programmes U68 et U35. Seule l'offre du RER-C est prise en compte.

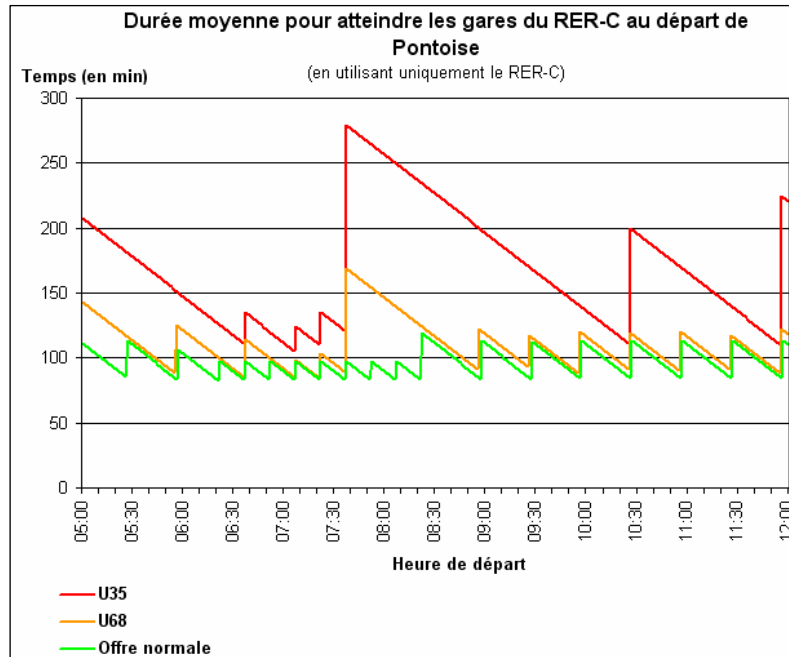


figure 89 *Durée moyenne pour atteindre les gares du RER-C au départ de Pontoise (en utilisant uniquement le RER-C)*

On peut constater des rallongements des durées plus importantes que dans le cas précédent, notamment pour le programme U35, la durée moyenne maximale atteignant 279 minutes.

Le graphique de la figure 90 correspond au précédent, sauf que les autres lignes du réseau sont prises en compte. On peut observer à nouveau leur rôle dans la mise en relation des nœuds du réseau lors des dysfonctionnements du réseau.

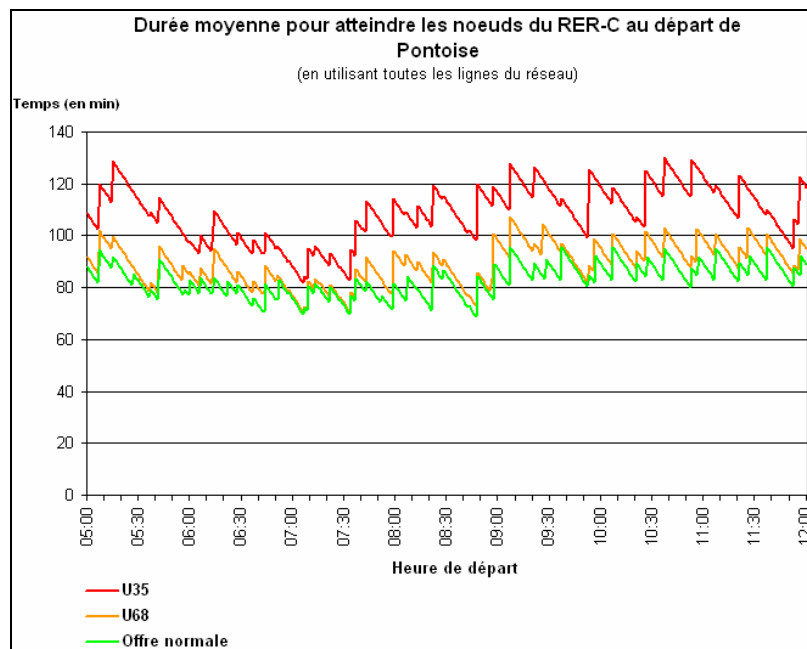


figure 90 *Durée moyenne pour atteindre les gares du RER-C au départ de Pontoise (en utilisant toutes les lignes)*

La variabilité des durées est réduite et on n'observe pas de plage horaire avec des valeurs élevées comme dans le graphique précédent. Les durées moyennes sont réduites : 83 minutes en situation normale, 89 minutes avec le programme U68 et 109 minutes avec le programme U35 (les valeurs obtenues uniquement avec le RER-C sont respectivement de 96, 110 et 168).

Plus le RER-C connaît des dysfonctionnements, plus les autres lignes ont une utilité de compensation élevée.

La *figure 91* met en évidence les disparités en fonction des nœuds du réseau. Elle montre les durées nécessaires pour atteindre les gares du RER-C pour un départ à 7h36 (correspondant à l'heure de départ d'un RER). Les trois valeurs (U35, U68 et offre normale) sont superposées pour chaque gare et les surfaces permettent de comparer les valeurs.

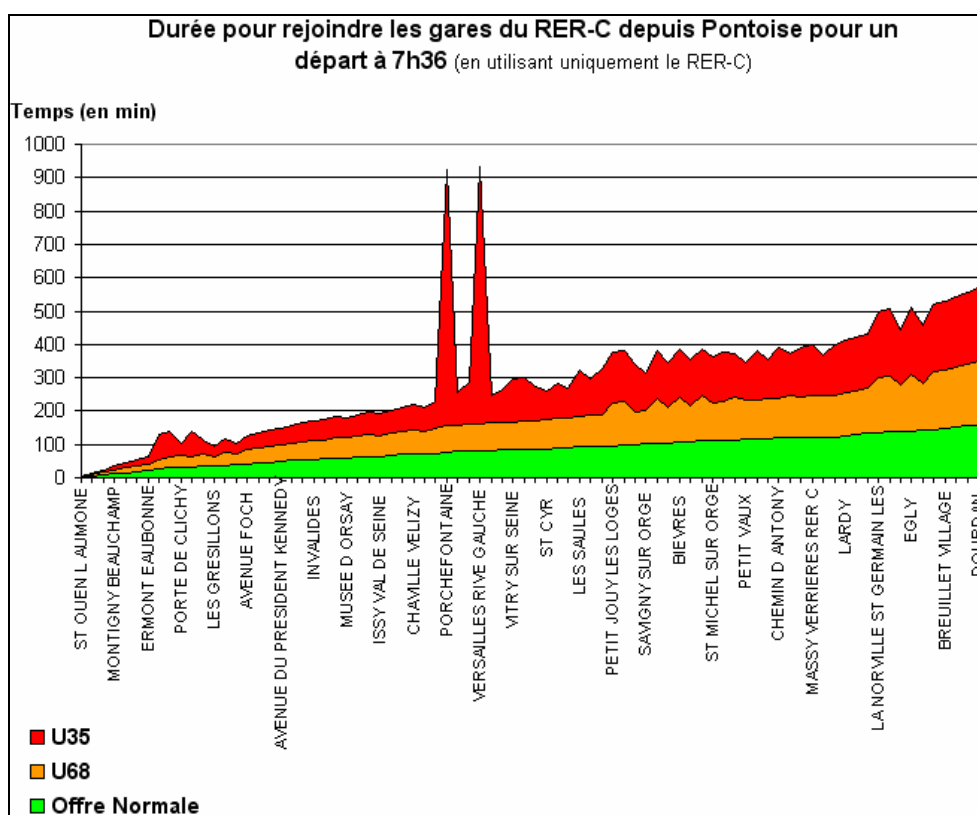


figure 91 Durée pour rejoindre les gares du RER-C depuis Pontoise pour un départ à 7h36 (en utilisant uniquement le RER-C)

Pour certains nœuds, la différence est faible. Il s'agit de gares directement joignables par le RER partant à 7h36 de Pontoise. Pour les autres nœuds, la nécessité d'emprunter des trains en correspondance (avec des fréquences moins fortes qu'en situation normale) entraîne une dégradation de la mise en relation. Il est ainsi beaucoup plus long d'atteindre certains nœuds du réseau en situation perturbée qu'en situation normale (voir notamment les « pics » de Versailles Rive Gauche et Porchefontaine avec le programme U35, ces deux gares étant peu desservies avec ce programme).

1 minute après, à 7h37, la différence de durée est plus importante et ceci pour tous les nœuds du réseau. En effet, la fréquence des circulations étant plus faible en situation perturbée, on mesure le maximum de l'impact de la perturbation : le temps moyen est de 97 minutes en situation normale (contre 83 à 7h36), 169 minutes avec le programme U68 (contre 89 à 7h36) et 279 minutes avec le programme U35 (contre 121 à 7h36). Ceci est mis en évidence sur le graphique de la *figure 92*.

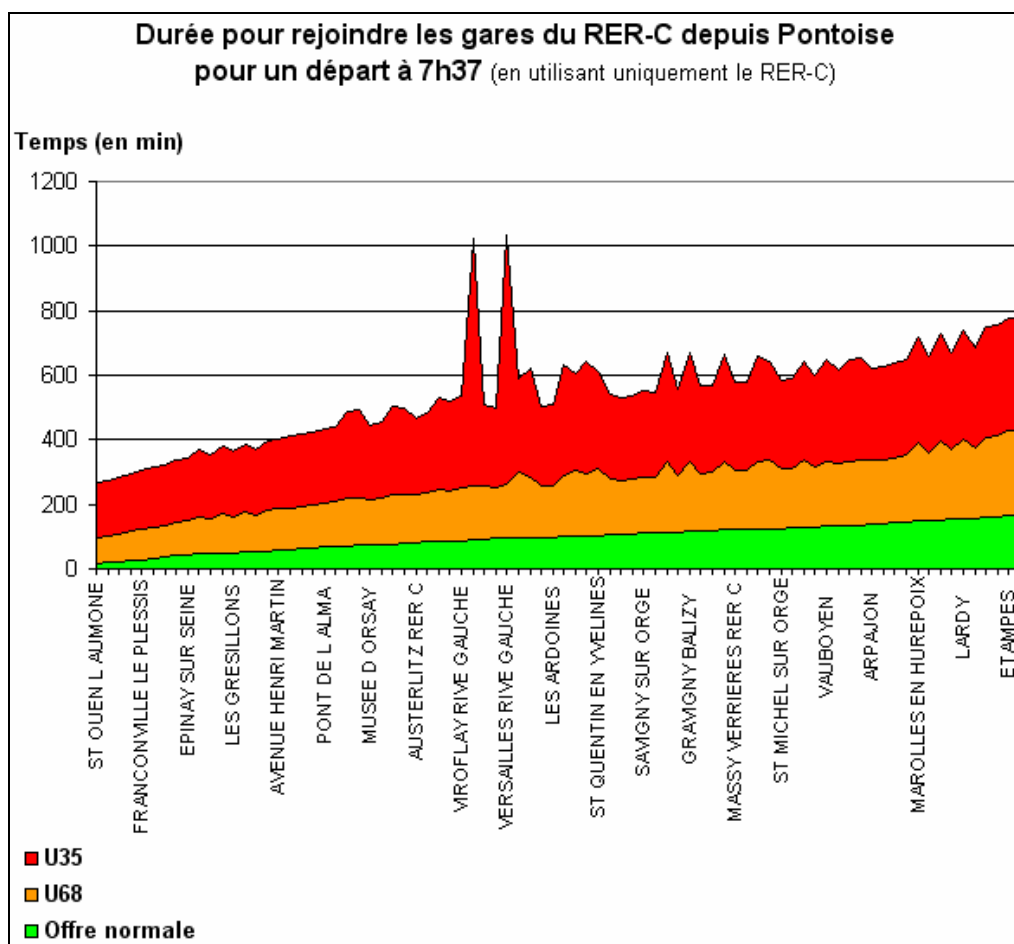


figure 92 Durée pour rejoindre les gares du RER-C depuis Pontoise pour un départ à 7h37 (en utilisant uniquement le RER-C)

Les calculs unipolaires permettent de compléter les analyses faites à partir de calculs de nœud à nœud. Nous avons spatialisé l'information (reports des chemins, temps parcours supplémentaires) et exploité des données agrégées par ligne afin de mesurer les reports des chemins minimaux, même en absence de données sur les voyageurs utilisant le réseau.

Section 5 - Calculs multipolaires : évaluation des pertes d'accessibilité sur le réseau

Les calculs multipolaires fournissent des informations à un niveau plus général. Des calculs d'accessibilité pour chaque nœud du réseau (avec et sans perturbation) sont possibles avec PERTURB. Nous pouvons également donner le différentiel (avec et sans perturbation pour chaque arc du graphe).

Néanmoins, les différences de valeur sont minimales en raison du nombre élevé de nœuds : 912, soit un nombre de relations de $912 \times 911 = 830\,832$ relations. Ainsi, dans le cas de l'interruption de trafic entre Mantes-la-Jolie et Plaisir-Grignon, le temps moyen pour connecter les nœuds du réseau (pour un départ à 7h47) passe de 69,56 minutes à 69,58 minutes. En effet, même si les conséquences de la perturbation vont au-delà de la portion du réseau directement impactée, la plupart des relations ne sont pas concernées.

Par conséquent, ce niveau d'analyse est peu pertinent dans le cadre des perturbations étudiées ici. C'est pourquoi nous nous sommes focalisés sur les relations perturbées en travaillant sur les trois cas suivants :

- interruption sur la ligne N entre Mantes-la-Jolie et Plaisir-Grignon (scénario 1),
- interruption sur le RER-E entre Haussmann St-Lazare et Magenta (scénario 2),
- interruption sur le RER-C entre Austerlitz et Invalides (scénario 4).

Nous avons calculé pour les trois scénarii le nombre de relations interrompues, le nombre de relations dont le temps est rallongé et la moyenne de ce rallongement pour des heures de départ fixées à 7h. Les valeurs sont présentées dans le *tableau 22*

TRONCON INTERROMPU	Nombre de relations avec augmentation du temps de connexion	Temps global supplémentaire sur les relations perturbées (en minutes)	Temps moyen supplémentaire sur les relations perturbées (en minutes)	Nombre de relations interrompues
Haussmann-Magenta	9 367	76 994	8	0
Mantes la Jolie - Plaisir Grignon	689	26 308	38	7 240
Austerlitz - Invalides	16 545	129 949	8	1 813

tableau 22 Evaluation globale des conséquences structurelles des trois scénarii de perturbations à 7h.

L'interruption de trafic entre Austerlitz et Invalides semble a priori être celle qui perturbe le plus le réseau : le nombre de relations concernées est très élevé car on se situe en zone centrale. Le temps global supplémentaire est de loin le plus important pour cette perturbation. Les relations interrompues dans ce cas correspondent aux relations avec Musée d'Orsay. Si l'on prenait en compte la marche à pied possible entre cette station et les stations de métro Assemblée Nationale et Solférino, ce nombre serait de 0, tout comme pour l'interruption entre Magenta et Haussmann St-Lazare.

L'interruption de trafic entre Mantes-la-Jolie et Plaisir-Grignon entraîne néanmoins des conséquences plus extrêmes. Le nombre de relations interrompues est plus élevé et le temps moyen supplémentaire sur les relations perturbées plus important (38 minutes contre 8 minutes). Ceci est lié aux différences de maillage du réseau au niveau des zones considérées. L'interruption entre Magenta et Haussmann St-Lazare correspond à une situation moyenne : nombre de relations concernées relativement élevé mais temps moyen supplémentaire peu important grâce aux facilités de contournement de la perturbation¹.

Les figures ci-dessous présentent les temps supplémentaires induits par la perturbation pour chaque relation. On visualise bien le fait que les temps de parcours supplémentaires sont nettement plus faibles dans le cas de l'interruption entre Austerlitz et Invalides (comparativement à celle entre Mantes-la-Jolie et Plaisir-Grignon). Par exemple, le nombre de relations dont le temps perdu est inférieur à 20 minutes est de 15 510 (94% des relations subissant une augmentation du temps de connexion) dans le premier cas et de 270 (39 % des relations subissant une augmentation du temps de connexion) dans le deuxième cas.

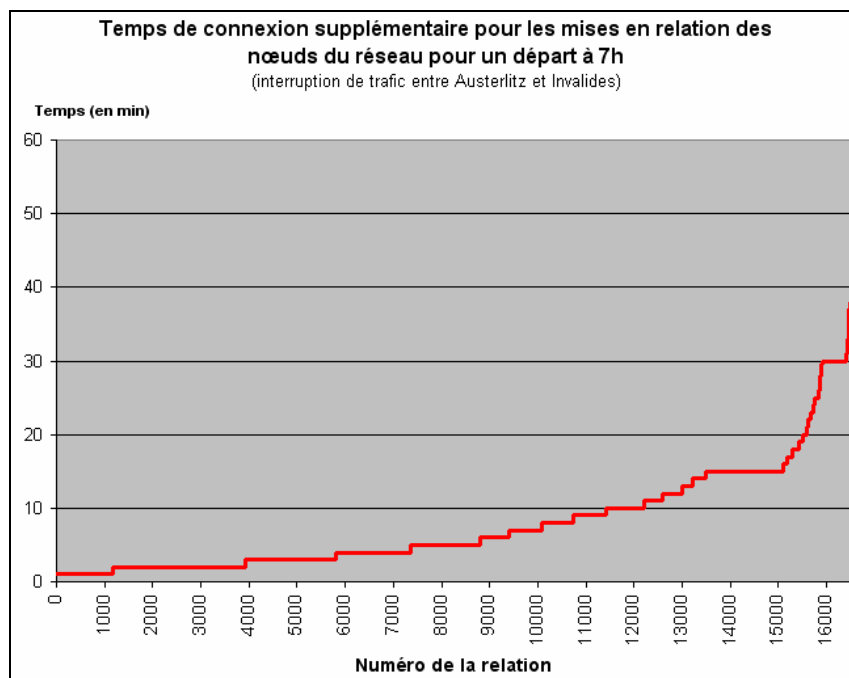


figure 93 Temps de connexion supplémentaire pour les mises en relation des nœuds du réseau pour un départ à 7h (interruption de trafic entre Austerlitz et Invalides)

¹ Voir quelques exemples de contournement dans la section 1 de ce chapitre.

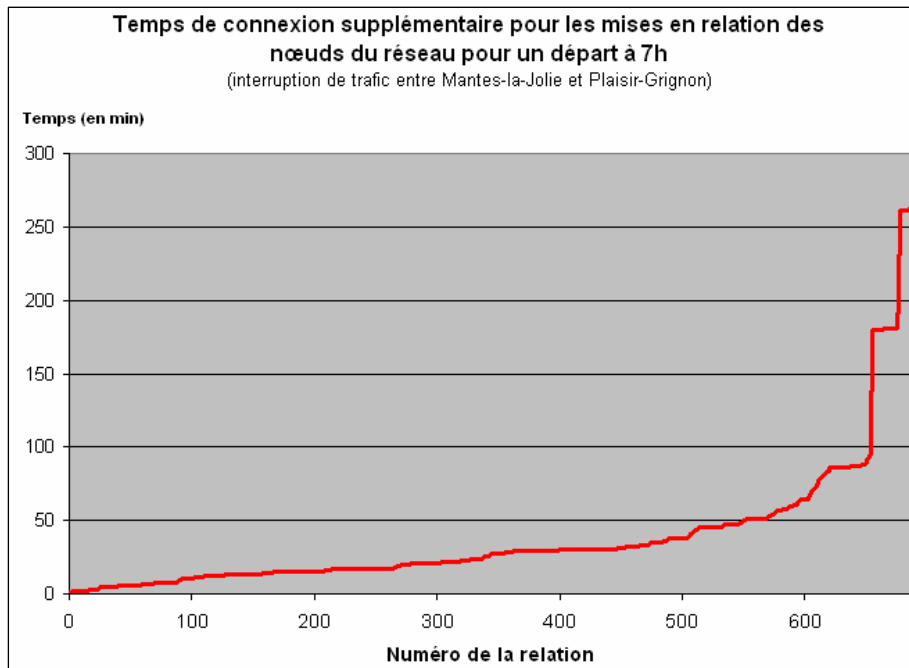


figure 94 Temps de connexion supplémentaire pour les mises en relation des nœuds du réseau pour un départ à 7h

Ces calculs multipolaires illustrent bien la diversité des conséquences de perturbations en fonction de la zone où elles se situent. En zone centrale fortement maillée, le nombre de relations perturbées est élevé mais les pertes de temps sont faibles sur les relations prises individuellement. On observe le contraire en zone périphérique faiblement maillée.

Ces calculs complètent les mesures de vulnérabilité structurelle effectuées précédemment. Celles-ci ont une grande utilité pour bien appréhender les modifications des caractéristiques de l'offre de transport suite à des perturbations. La prise en compte des horaires (spécificité des transports en commun) est un des apports majeurs de ce travail.

Section 6 - Simulations avec offre, demande (et information)

En intégrant les voyageurs utilisant le réseau et l'information qui leur est diffusée, nous nous approchons de simulations permettant de mesurer la vulnérabilité fonctionnelle du système, telle que nous l'avons définie¹.

A- Simulations avec un seul agent

Nous présentons tout d'abord des simulations effectuées avec un seul agent afin de visualiser de manière très claire quel peut être le rôle de l'information dans le cheminement d'un voyageur lorsqu'un dysfonctionnement intervient.

Les simulations sont effectuées en faisant varier les paramètres de diffusion de l'information : délai de diffusion, information diffusée ou non dans les véhicules, information diffusée ou non sur les lignes non perturbées.

1 - Interruption entre Magenta et Hausmann St-Lazare

Dans le cas présenté ici, l'interruption a lieu à 8h30. L'information est disponible dans les véhicules. Le délai de diffusion varie de 1 à 40 minutes (cas extrême, totalement théorique). L'agent effectue un trajet de Tournan à Hausmann St-Lazare en partant à 8h10. Lorsque l'interruption intervient, il se situe en amont de la gare des Yvris Noisy-le-Grand.

La *figure 95* présentant le temps de parcours en fonction du délai de diffusion de l'information montre que le temps ne varie pas jusqu'à un délai de 25 minutes puis augmente progressivement. Cela peut paraître surprenant dans la mesure où une diffusion de l'information rapide permet à l'agent de descendre à Val de Fontenay pour prendre le RER-A et donc potentiellement de minimiser sa perte de temps.

¹ Voir le chapitre IV de la Partie I.

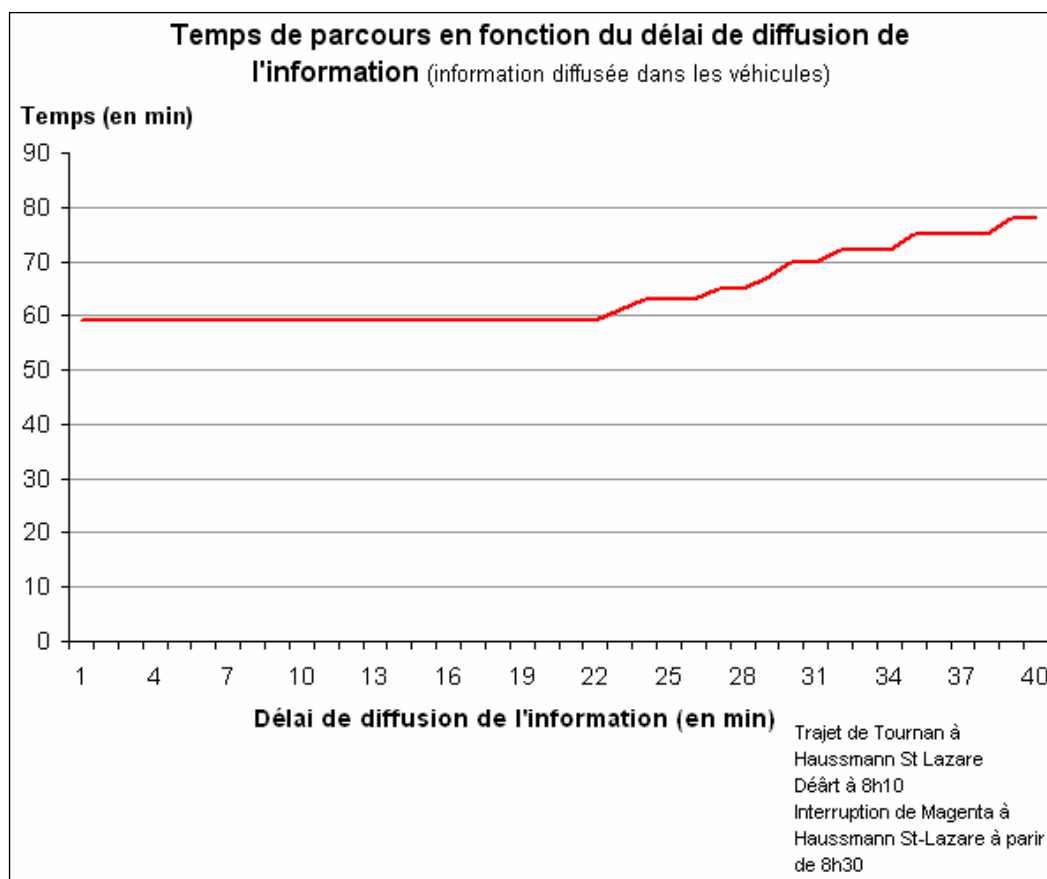


figure 95 Temps de parcours en fonction du délai de diffusion de l'information (information diffusée dans les véhicules)

Les animations vidéos **ODI-1** et **ODI-2** présentent le cheminement de l'agent, pour des délais de diffusion respectivement de 10 et 15 minutes. On observe qu'une diffusion rapide permet en effet à l'agent de descendre à Val de Fontenay mais le gain de temps est nul. Le cheminement de l'agent n'est pas le même sur les deux vidéos.

En revanche, passé 25 minutes, le temps de parcours augmente. Cela correspond à l'arrivée de l'agent à Magenta. Si l'information est ensuite diffusée très tardivement (ce qui dans un cas comme celui-ci est très improbable en pratique), l'agent attend cette information.

Par conséquent, dans un tel cas, l'effet d'une diffusion rapide ou lente est très faible, voire inexistant, en ce qui concerne les temps de parcours. Cela peut être différent sur d'autres critères, le confort pouvant par exemple être meilleur sur l'itinéraire de contournement. On remarque dans le cas présent que le fait de descendre à Val de Fontenay entraîne une correspondance de moins (car ensuite le trajet est direct de Val de Fontenay à Auber et il suffit ensuite de marcher jusqu'à Hausmann St-Lazare).

Ce premier exemple met en évidence les difficultés d'interprétation de ce type de graphique et la nécessaire investigation des résultats. Ceci est d'ailleurs une des raisons nous incitant à présenter des simulations avec un seul agent car elles permettent de prendre conscience des erreurs d'interprétations pouvant être effectuées par une méconnaissance du fonctionnement

du modèle ou un non-approfondissement des valeurs obtenues par les simulations. On met en évidence une des limites du modèle liée au fait que les agents ne vont pas chercher l'information (ex : essayer de trouver l'information, se renseigner auprès des autres agents...). Ceci correspond à une hypothèse de travail (HT3¹), définie pour simplifier la modélisation, mais dont on mesure quelques conséquences sur les limites du modèle².

2 - Interruption entre Mantes-la-Jolie et Plaisir-Grignon

➤ Première simulation

Dans la première simulation effectuée, l'interruption a lieu à 8h45. L'information n'est pas diffusée dans les véhicules. On fait varier le délai de diffusion de l'information de 1 à 45 minutes. L'agent effectue un trajet de Rambouillet à Mantes-la-Jolie en partant à 8h30.

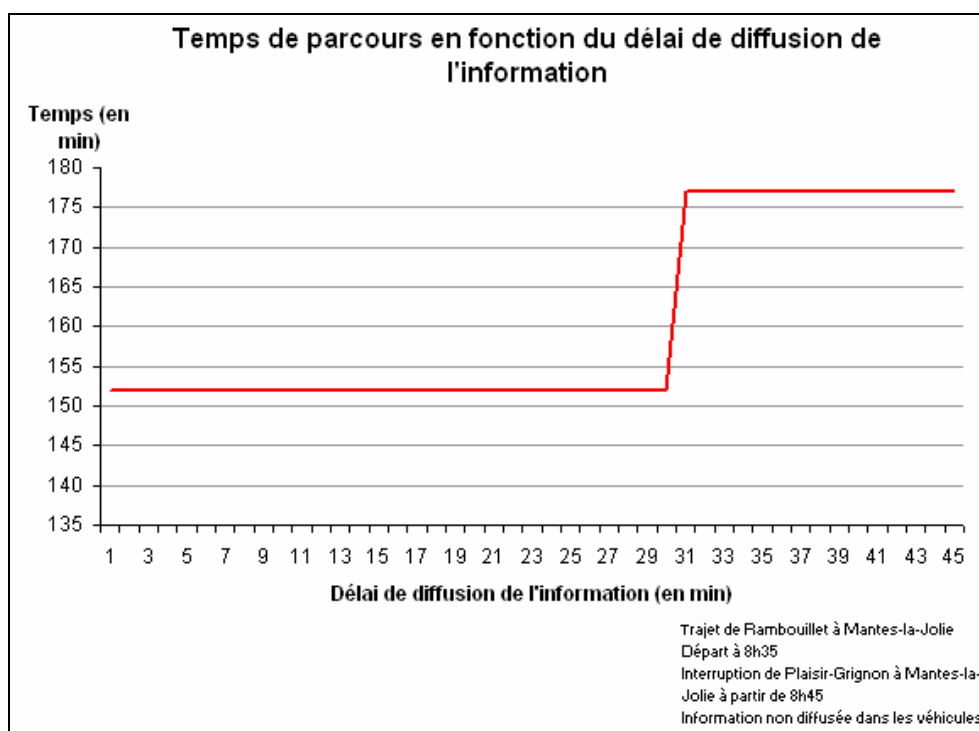


figure 96 Temps de parcours en fonction du délai de diffusion de l'information (2)

Le graphique présentant le temps de parcours en fonction du délai de diffusion de l'information est nettement différent de celui observé précédemment. On observe un « saut » de 25 minutes entre un délai de 30 et de 31 minutes. L'heure d'arrivée à Mantes-la-Jolie passe de 11h07 à 11h32 (en absence de perturbation, l'agent arrive à Mantes-la Jolie à 10h12 : voir l'animation vidéo **ODI-3**).

En observant les animations vidéo (**ODI-4** : délai de 30 minutes et **ODI-5** : délai de 31 minutes), on comprend facilement ces résultats. L'agent doit descendre à Versailles Chantiers pour une correspondance avec un train se dirigeant vers Mantes-la-Jolie. Si l'information est

¹ Voir la présentation de PERTURB dans le chapitre III de la Partie II.

² Des évolutions de PERTURB pourraient consister à donner un comportement pro-actif aux agents : aller chercher l'information.

diffusée suffisamment rapidement (jusqu'à 30 minutes), l'agent change de trajet et passe par La Défense pour rejoindre sa destination finale.

Si l'information est diffusée plus tardivement (à partir de 31 minutes), l'agent monte dans le train initialement prévu à Versailles Chantiers, va jusqu'à Pairs-Grignon et doit donc faire ensuite demi-tour. Il est venu « buter » sur la perturbation. **On mesure ici la sensibilité du phénomène. Un écart faible pour le délai de diffusion de l'information peut avoir des répercussions importantes sur le temps de parcours.**

Dans le cas présent, en faisant intervenir la perturbation après 8h45 (par exemple juste avant l'arrivée de l'agent à Versailles Chantiers), l'écart se serait produit bien avant un délai de diffusion de 31 minutes. Les conséquences du délai de diffusion de l'information sur le temps de parcours de l'agent sont donc fortement liées à sa localisation au moment où la perturbation intervient.

Les résultats obtenus avec l'information diffusée dans les véhicules ne sont pas différents : l'agent descend également à Versailles Chantiers (il aurait été possible qu'il soit plus rapide pour lui de continuer son parcours jusqu'à la gare Montparnasse, rejoindre ensuite la gare St-Lazare pour aller jusqu'à Mantes-la-Jolie).

➤ Deuxième simulation

Dans la seconde simulation effectuée, l'interruption de trafic a lieu à 5h20 (jusqu'à 7h20), avant même que des trains circulent sur ce tronçon. Cette heure peut donc être considérée comme l'heure à laquelle un incident interdisant toute circulation est détecté.

L'information est diffusée sur l'ensemble du réseau. Les paramètres que nous faisons varier sont le délai de diffusion (de 1 à 40 minutes) et la diffusion ou non de l'information dans les véhicules du réseau. L'agent part à 5h10 d'Invalides pour se rendre à Mantes-la-Jolie. Il doit en théorie passer par le tronçon perturbé.

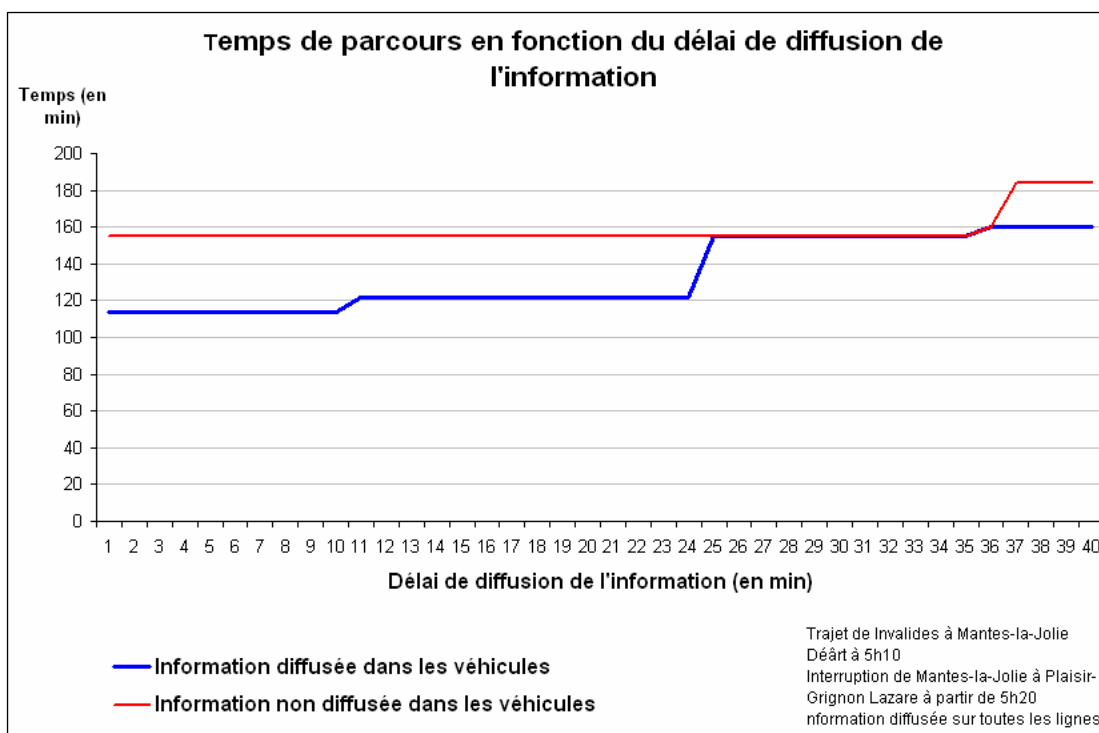


figure 97 Temps de parcours en fonction du délai de diffusion de l'information (3)

Dans le cas où l'information n'est pas diffusée dans les véhicules, la sensibilité au délai de diffusion de l'information est faible. En effet, l'agent descend à St-Cyr pour une correspondance. Si l'information n'est pas diffusée dans les véhicules, c'est donc en descendant à St-Cyr que l'agent sera informé. Si l'information est diffusée encore plus tardivement (à partir de 37 minutes), l'agent va jusqu'à Plaisir-Grignon et attend la reprise du trafic pour rejoindre Mantes-la-Jolie.

Si l'information est diffusée dans les véhicules, la sensibilité à la diffusion de l'information est plus forte. En effet, l'agent peut descendre avant St-Cyr pour se réorienter. C'est dans un tel cas que l'on mesure toute l'importance pour lui d'être bien informé.

La différence au-delà de 36 minutes correspond à une descente ou non de l'agent (en fonction de l'information diffusée) entre St-Cyr et Plaisir-Grignon. S'il va jusqu'à Plaisir-Grignon, il attend ensuite le premier train après la reprise du trafic car cela devient alors plus rapide que le contournement de la perturbation (voir vidéo **ODI-12**).

Les vidéos **ODI-6** à **ODI-12** permettent de visualiser les cheminements en fonction des paramètres de diffusion de l'information.

Ces quelques simulations avec un seul agent montrent la diversité des conséquences liées à l'information des voyageurs en fonction :

- des caractéristiques de la perturbation,
- du trajet effectué par le voyageur et donc de sa localisation au moment de la perturbation,
- des modalités de diffusion de l'information.

Par ailleurs, les effets du paramètre « délai de diffusion » sont loin d'être linéaires. En effet, d'une minute à l'autre, le temps de parcours peut varier de manière importante, faible, ou nulle. Chaque cas est unique en fonction de la situation de l'agent par rapport à la perturbation. Ces éléments plaident en faveur d'une grande prudence dans l'interprétation des résultats. Ces derniers peuvent être liés à des facteurs non évidents à première vue.

B- Simulations avec plusieurs agents

Les simulations avec un seul agent permettent de comprendre les modifications potentielles des cheminements des voyageurs en fonction des perturbations et de l'information diffusée. Elles doivent néanmoins être complétées par des simulations avec de nombreux agents, afin de véritablement prendre en compte les flux de voyageurs sur le réseau.

Nous avons fait le choix de travailler sur le scénario d'interruption du trafic entre Haussmann St-Lazare et Magenta sur le RER-E. Pour les voyageurs, nous avons travaillé sur la base des données fournies par le Pôle Etudes de la Direction de Transilien. Ces données sont issues de deux sources d'information : les enquêtes origine-destination des voyageurs¹ et les données sur les montants et descendants en gare. Les enquêtes origine-destination fournissent notamment les informations suivantes : gare (ou station de métro/tramway) de départ, gare (ou station de métro/tramway) d'arrivée, gare de montée sur la ligne, gare de descente, heure de l'interview. Les données sont ensuite pondérées grâce aux données de comptage (montées et descentes des trains). Chaque voyageur se voit ainsi attribuer un poids correspondant au nombre de voyageurs qu'il représente. Même si cette méthode est à l'origine de phénomènes de « grappe »², ces données permettent de prendre en compte de manière satisfaisante la demande.

Nous avons travaillé sur la base des enquêtes OD réalisées sur en 2005 le RER-E et la ligne P (Réseau Paris Est). Nous avons conservé, sur l'ensemble de la journée, les voyageurs circulant dans le sens Province-Paris et descendant à Haussmann St-Lazare. Ces derniers (un peu plus de 60 000³) sont ainsi censés emprunter le tronçon Magenta-Haussmann St-Lazare et poursuivre ensuite leur trajet vers leur destination finale. Dans la mesure où certains voyageurs étaient partis plus tôt d'une autre gare ou station de métro/tramway, il a été nécessaire de déterminer leur heure de départ réelle (antérieure à l'heure de l'interview en gare). Ceci a été possible en effectuant un calcul d'itinéraire inversé⁴.

1 - Simulations avec offre et demande

Nous avons tout d'abord travaillé uniquement avec des données relatives à l'offre et à la demande. Les paramètres de diffusion de l'information ne sont pas pris en compte. Les agents calculent leur itinéraire initial en ayant connaissance de la perturbation.

¹ Interviews en face à face sur les quais des gares auprès des montants du 1^{er} au dernier train. Les données sont précises (à la minute).

² Chaque agent représente un voyageur. Par conséquent, plusieurs agents ont les mêmes caractéristiques.

³ Représentés par un peu plus de 2 500 interviewés.

⁴ Cette procédure fonctionne selon le principe suivant. Pour un départ initial de A et une heure d'interview en B à la date t, on calcule les itinéraires de A à B et on choisit celui qui permet d'arriver avant la date t, en partant le plus tard possible de A. L'heure de départ de cet itinéraire est ainsi retenue comme heure de départ de l'agent.

La *figure 98* présente le temps total perdu par les agents en fonction de la plage horaire de la perturbation.

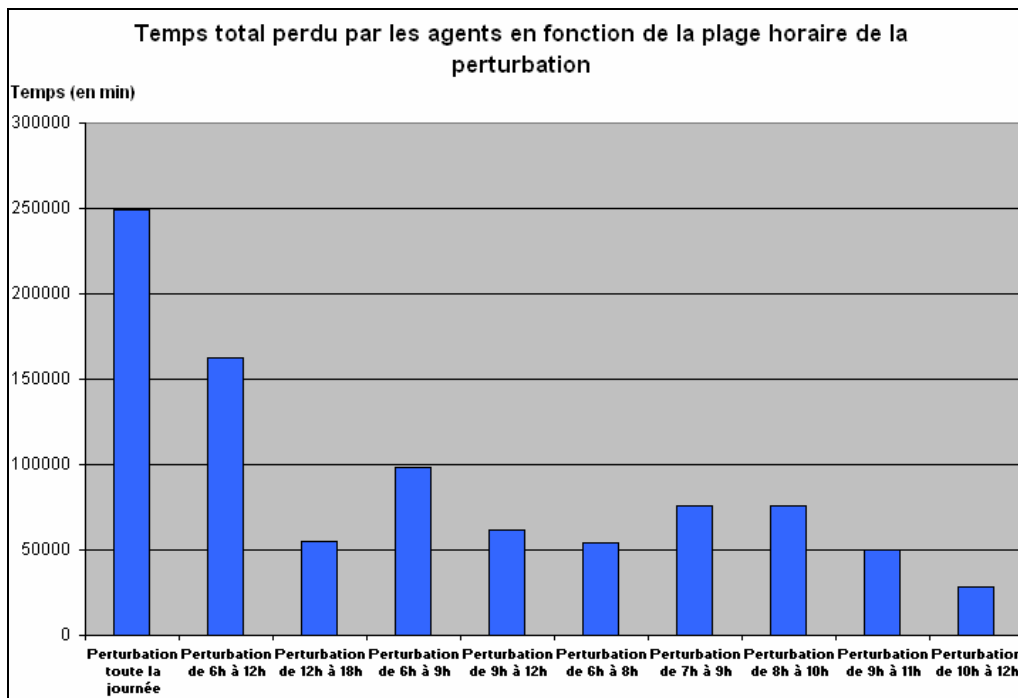


figure 98 Temps total perdu par les agents en fonction de la plage horaire de la perturbation

En fonction de l'heure de la perturbation et de sa durée, le nombre d'agents concernés par la perturbation est plus ou moins important. Pour les durées de perturbation de 2 heures, on peut noter les valeurs élevées des plages horaires 7-9h et 8-10h (plus de 75 000 minutes perdues), correspondant à la période de pointe. Celles-ci présentent des valeurs plus élevées que l'ensemble de la période 12-18h (environ 54 000).

Le temps perdu est très variable d'un agent à l'autre. La *figure 99* présente le temps de parcours en l'absence de perturbation et le temps perdu en raison de la perturbation. On considère que le tronçon est interrompu sur l'ensemble de la journée. Les données sont triées par temps perdu, puis par temps de parcours en l'absence de perturbation. On ne tient pas compte des pondérations (chaque agent représente une personne interviewée).

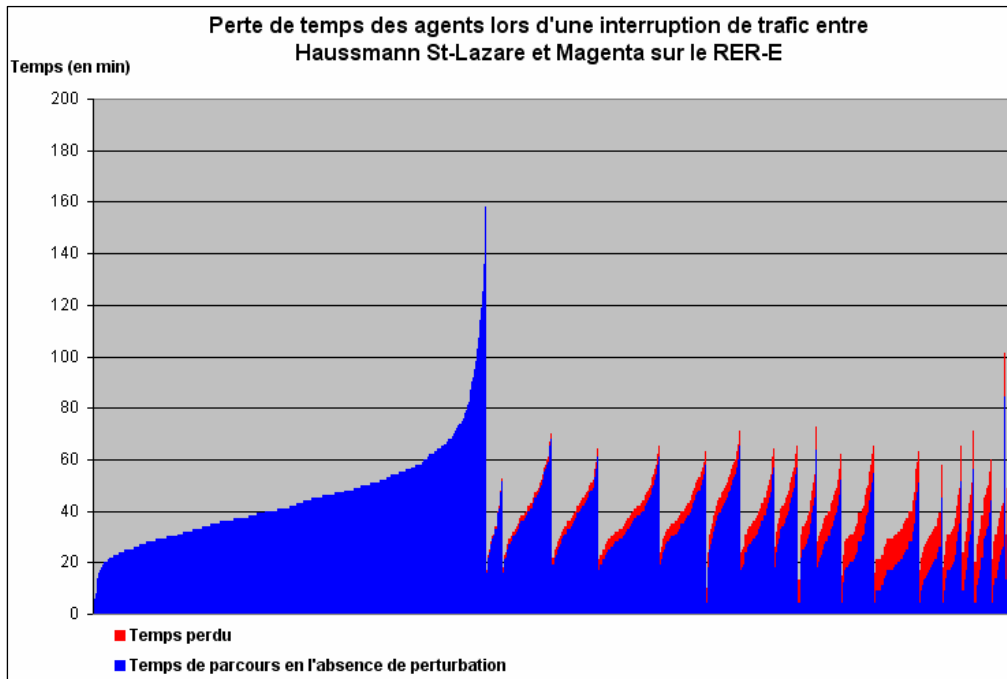


figure 99 Perte de temps des agents lors d'une interruption de trafic entre Haussmann St-Lazare et Magenta sur le RER-E

On observe des pourcentages d'augmentation très variable (jusqu'à 450%). De façon étonnante de premier abord, on peut noter que certains agents ne subissent pas de perte de temps (ceci correspond à la partie gauche du graphique). En effet, 21 139 agents (sur 60 413 agents) n'utilisent pas le tronçon Haussmann St-Lazare en situation normale.

Théoriquement, ce cas de figure ne devrait pas se produire dans la mesure où nous avons retenu uniquement les voyageurs descendant à Haussmann St-Lazare. Ceci peut s'expliquer de plusieurs manières. Tout d'abord, un écart d'une minute suffit à choisir un itinéraire plutôt qu'un autre, même si le confort est moins bon ou qu'il y a plus de correspondances. De plus, l'interview a été effectuée en 2005 et les données relatives à l'offre de transport correspondent au mois de mai 2006. Un travail spécifique pourrait être mené pour calibrer le modèle par rapport aux enquêtes origine-destination. Ce n'est pas l'objectif ici, d'autant plus qu'il faudrait le faire pour l'ensemble des lignes. Un taux de « conformité » de 65 % est ici acceptable.

Par ailleurs, environ 6 490 agents utilisant le tronçon Haussmann St-Lazare en situation normale ne perdent pas de temps lorsqu'il est interrompu (ils peuvent par exemple rattraper leur retard grâce à une correspondance). Le nombre d'agents perdant du temps est donc d'environ 33 000.

La figure 100 montre le nombre d'agents sur le tronçon Magenta-Haussmann St-Lazare au cours du temps. Le nombre varie en fonction des circulations des trains et on visualise très clairement la période de pointe.

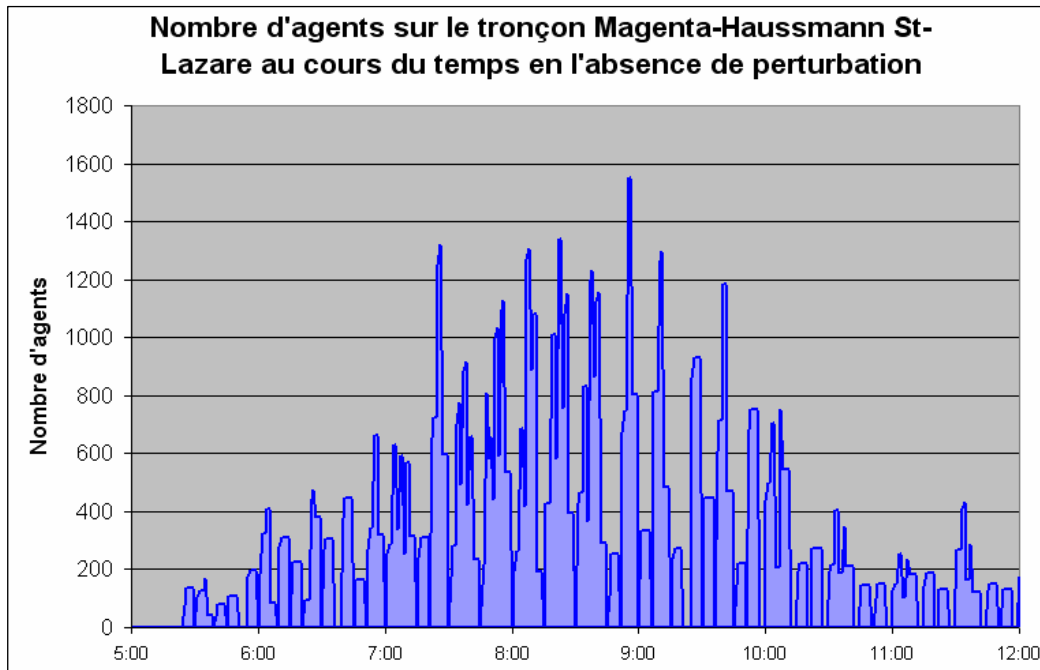


figure 100 Nombre d'agents sur le tronçon Magenta-Haussmann St-Lazare au cours du temps en l'absence de perturbation

La *figure 101* montre qu'en fonction de la plage horaire de la perturbation, les agents concernés ne sont pas les mêmes. Pour une perturbation sur l'ensemble de la journée, les agents peuvent être concernés quelle que soit leur heure de départ. Dans les autres cas, ils subissent ou non les perturbations. On peut remarquer les zones de chevauchement entre les plages horaires de perturbation. Ceci est lié au fait que les agents, en fonction de leur lieu de départ, arrivent plus ou moins tôt sur le tronçon perturbé. On note également que certains agents sont très pénalisés (plus de 30 minutes perdues).

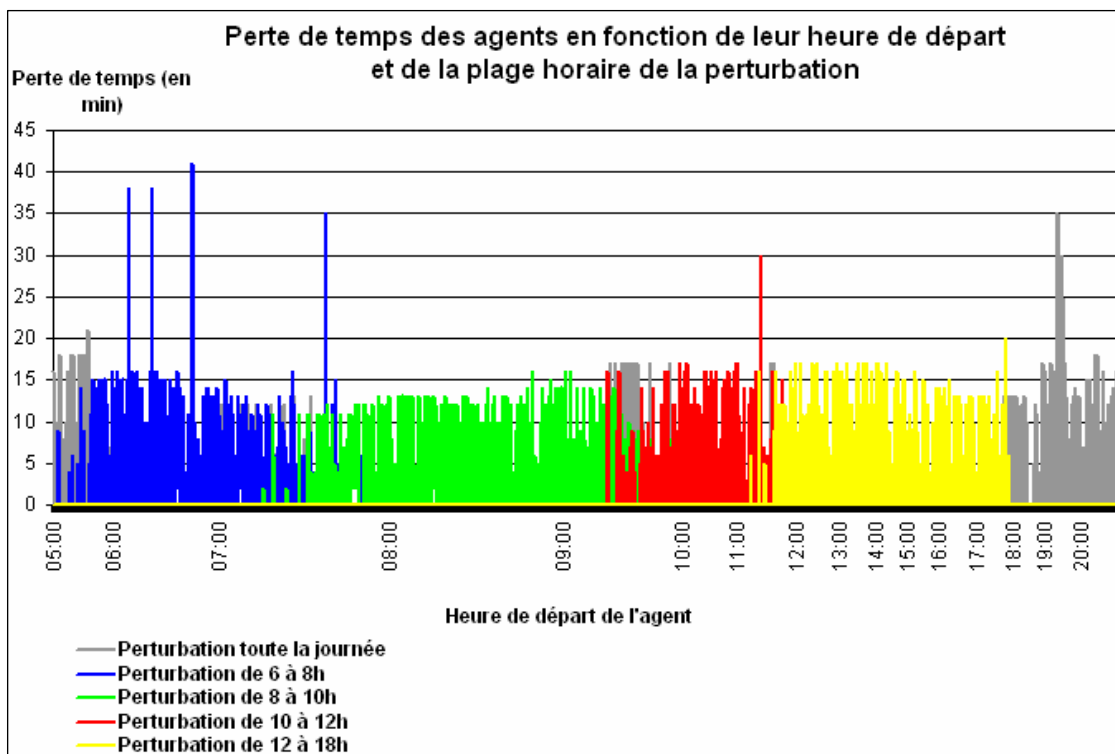


figure 101 Perte de temps des agents en fonction de leur heure de départ et de la plage horaire de la perturbation

5 vidéos montrent le cheminement des agents avec et sans perturbation sur la période de la matinée. On visualise bien le début de la journée avec une augmentation progressive des flux, même si la demande est prise en compte de manière très partielle (environ 60 000 agents).

- **Vidéo OD-1** : simulation sans perturbation, vue générale ;
- **Vidéo OD-2** : simulation sans perturbation, zoom sur Hausmann St-Lazare ;
- **Vidéo OD-3** : simulation avec perturbation, vue générale ;
- **Vidéo OD-4** : simulation avec perturbation, zoom moyen ;
- **Vidéo OD-5** : simulation avec perturbation, zoom sur la zone Châtelet-Hausmann St-Lazare-Magenta.

Il est par ailleurs possible d'observer à une échelle plus fine les conséquences des perturbations. Ainsi, la *figure 102* présente le nombre moyen d'agents sur le tronçon Val de Fontenay-Vincennes (RER-A) au cours du temps. En l'absence de perturbation, ce nombre est très faible. Il correspond dans notre cas aux agents n'ayant pas choisi d'aller jusqu'à Hausmann St-Lazare, mais plutôt de pendre le RER-A à Val de Fontenay avant de rejoindre leur destination finale. En cas de perturbation, ce nombre est nettement plus important car le RER-A devient une ligne de contournement de la perturbation. On retrouve alors le phénomène de période de pointe déjà mis en évidence plus haut, avec le tronçon Magenta-Hausmann St-Lazare.

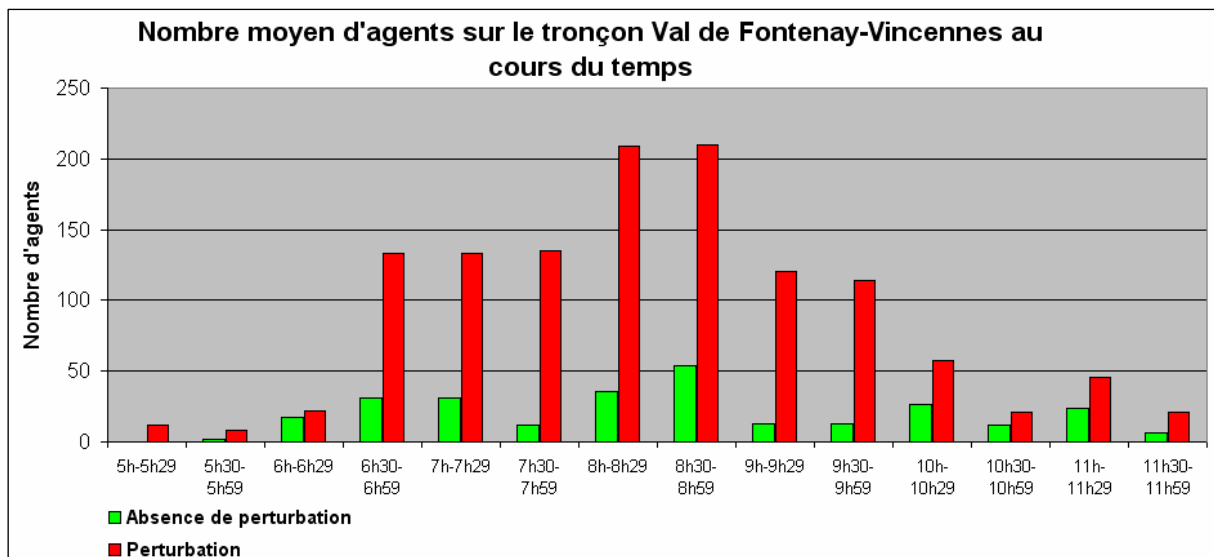


figure 102 Nombre moyen d'agents sur le tronçon Val de Fontenay-Vincennes au cours du temps

On peut visualiser ce phénomène de report au niveau d'un train. La figure 103 montre ainsi le nombre d'agents dans un train du RER-A partant de Marne-la-Vallée à 7h36 et à destination de Cergy Le-Haut.

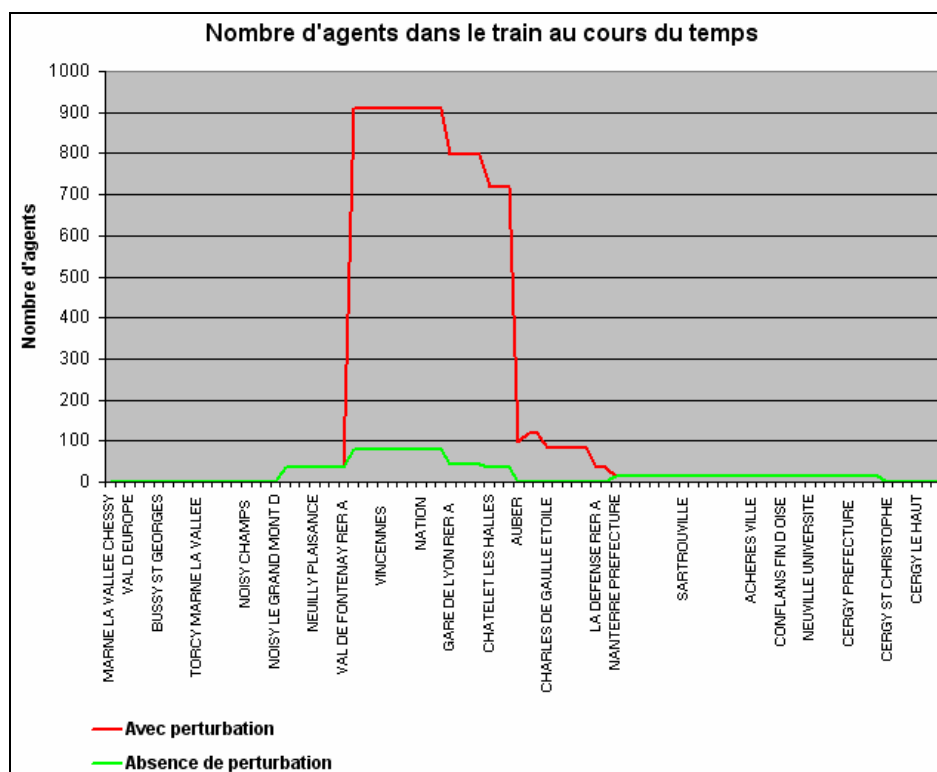


figure 103 Nombre d'agents dans le train au cours du temps

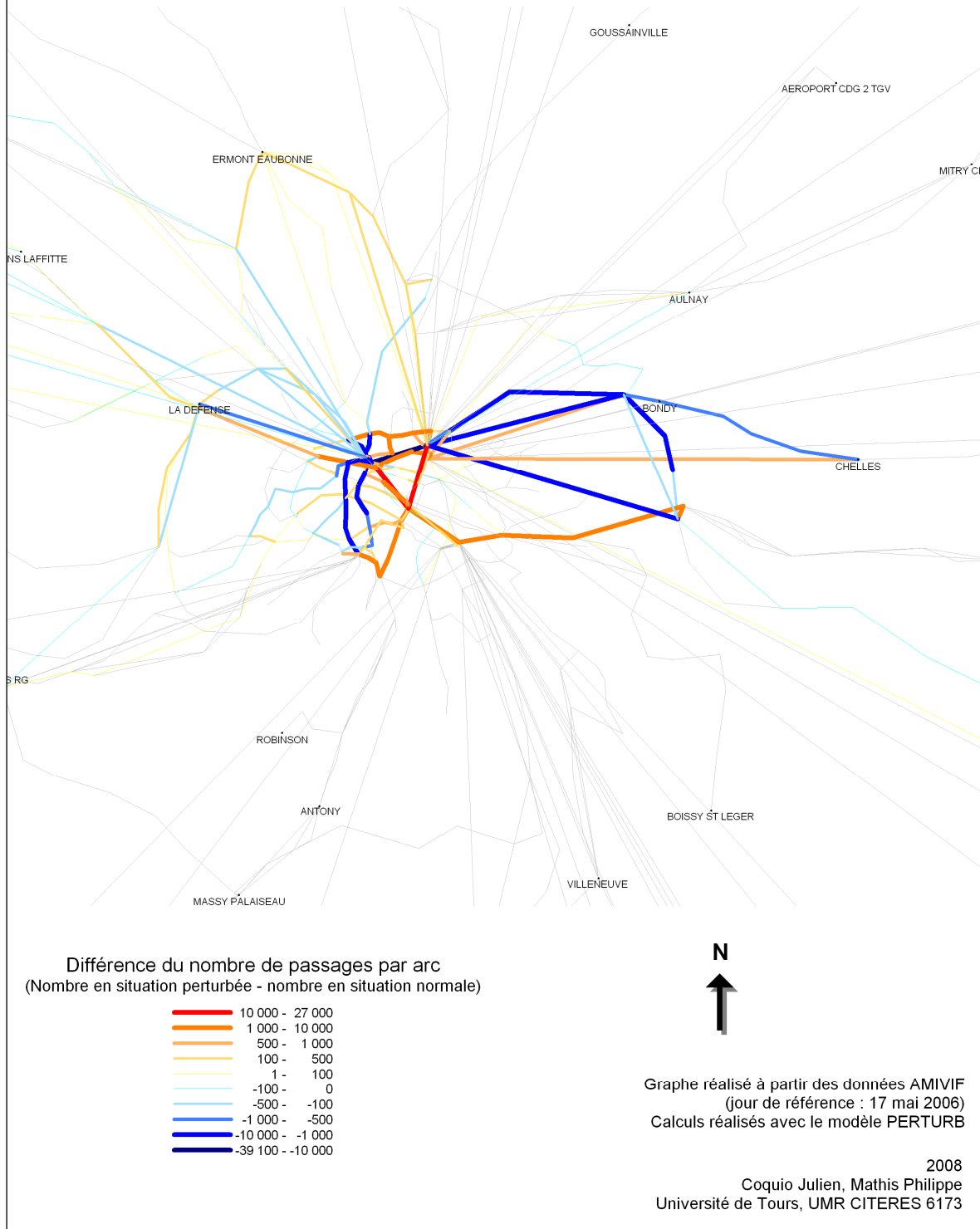
En cas de perturbation, de nombreux agents montent à Val de Fontenay (près de 900) et descendent ensuite à différentes stations. On peut aisément imaginer l'impact de ce report sur un train pouvant déjà être bien rempli si l'on tenait compte de l'ensemble des agents : forte

dégradation du confort, voire impossibilité pour certains de monter (à Val de Fontenay mais également plus en aval).

Enfin, les trois cartes des pages suivantes spatialisent les reports de flux pour une perturbation sur l'ensemble de la journée, à différents niveaux de zoom. On peut notamment observer les phénomènes suivants :

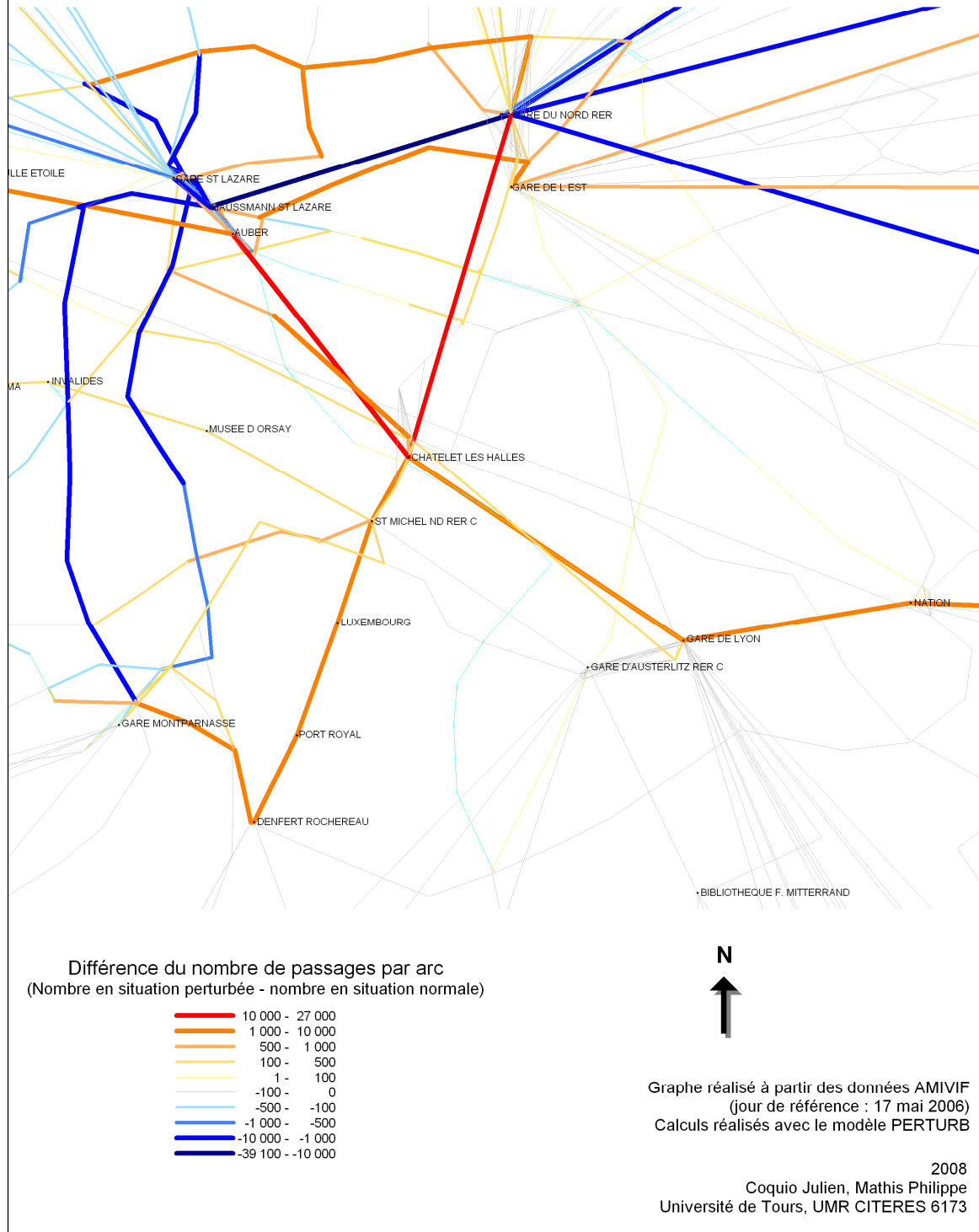
- augmentation des flux sur les axes Gare du Nord - Châtelet (RER-B ou D) avec prolongement sur le RER-B jusqu'à Denfert-Rochereau,
- augmentation des flux sur le RER-A (en particulier de Val de Fontenay à Auber),
- diminution des flux sur les lignes 12 et 13 du métro, en raison de l'absence d'arrivée d'agents à Hausmann-St-Lazare via le RER-E.

**REPORT DES ITINERAIRES LORS D'UNE INTERRUPTION
DE TRAFIC ENTRE HAUSSMAN ST-LAZARE ET MAGENTA
(SUR L'ENSEMBLE D'UNE JOURNEE)**



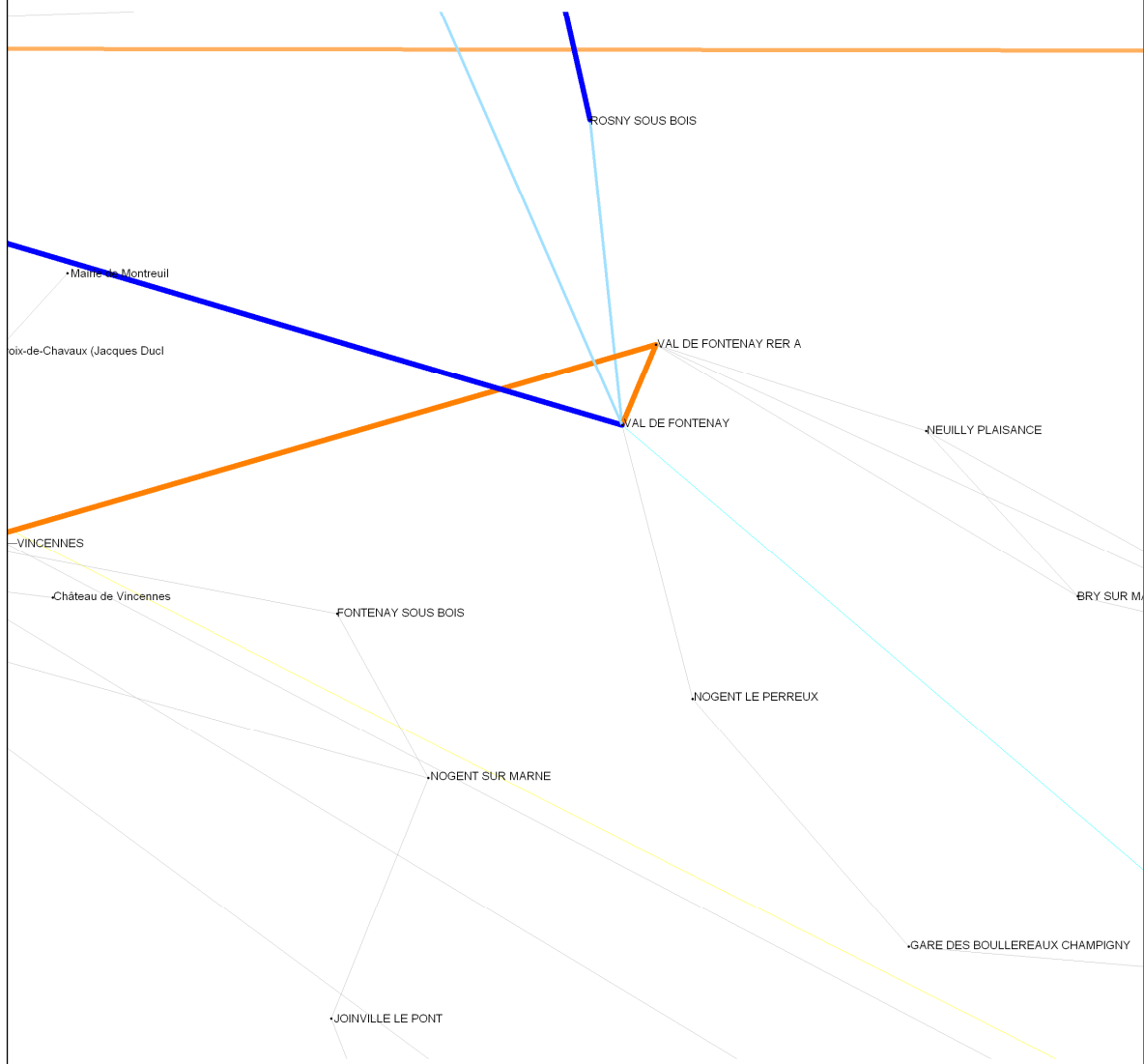
carte 16 Report des itinéraires lors d'une interruption de trafic entre Haussmann St-Lazare et Magenta (sur l'ensemble d'une journée) (1)

**REPORT DES ITINERAIRES LORS D'UNE INTERRUPTION
DE TRAFIC ENTRE HAUSSMAN ST-LAZARE ET MAGENTA
(SUR L'ENSEMBLE D'UNE JOURNEE)**

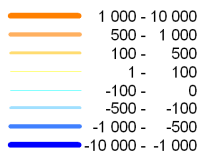


carte 17 Report des itinéraires lors d'une interruption de trafic entre Haussmann St-Lazare et Magenta (sur l'ensemble d'une journée) (2)

**REPORT DES ITINERAIRES LORS D'UNE INTERRUPTION
DE TRAFIC ENTRE HAUSSMAN ST-LAZARE ET MAGENTA
(SUR L'ENSEMBLE D'UNE JOURNEE)**



Différence du nombre de passages par arc
(Nombre en situation normale - nombre en situation perturbée)



Graphe réalisé à partir des données AMIVIF
(jour de référence : 17 mai 2006)
Calculs réalisés avzc le modèle PERTURB

2008
Coquio Julien, Mathis Philippe
Université de Tours, UMR CITERES 6173

carte 18 Report des itinéraires lors d'une interruption de trafic entre Haussmann St-Lazare et Magenta (sur l'ensemble d'une journée) (3)

2 - Simulations avec offre, demande et information

Nous avons également fait 4 simulations avec 820 agents en faisant varier les paramètres de diffusion de l'information. Ces 820 agents ont été extraits de la base de données issue des enquêtes origine-destination. Nous avons retenu ceux partant entre 6h30 et 8h30 et considéré une interruption de trafic de 8h à 10h. Nous ne tenons pas compte des pondérations effectuées sur la base des comptages de voyageurs. Ainsi, chaque voyageur interviewé est représenté par un seul agent.

La *figure 104* présente la somme des temps de parcours de ces agents en fonction des paramètres de diffusion de l'information. On constate que plus l'information est diffusée rapidement et en tous lieux, plus les temps de parcours sont globalement faibles. Les valeurs augmentent de manière régulière car elles correspondent à des moyennes mais nous avons vu au préalable qu'elles résultent d'augmentations ne répondant pas à cette logique.

Par ailleurs, lorsque le délai augmente, les différences liées aux lieux de diffusion ont tendance à s'atténuer voire à disparaître pour certaines d'entre elles. Cela est particulièrement le cas pour les écarts liés à la diffusion sur toutes les lignes du réseau ou uniquement sur le RER-E.

En l'absence de contraintes de capacité, une diffusion rapide de l'information est d'autant plus efficace qu'elle atteint de nombreux voyageurs, quelle que soit leur situation sur le réseau.

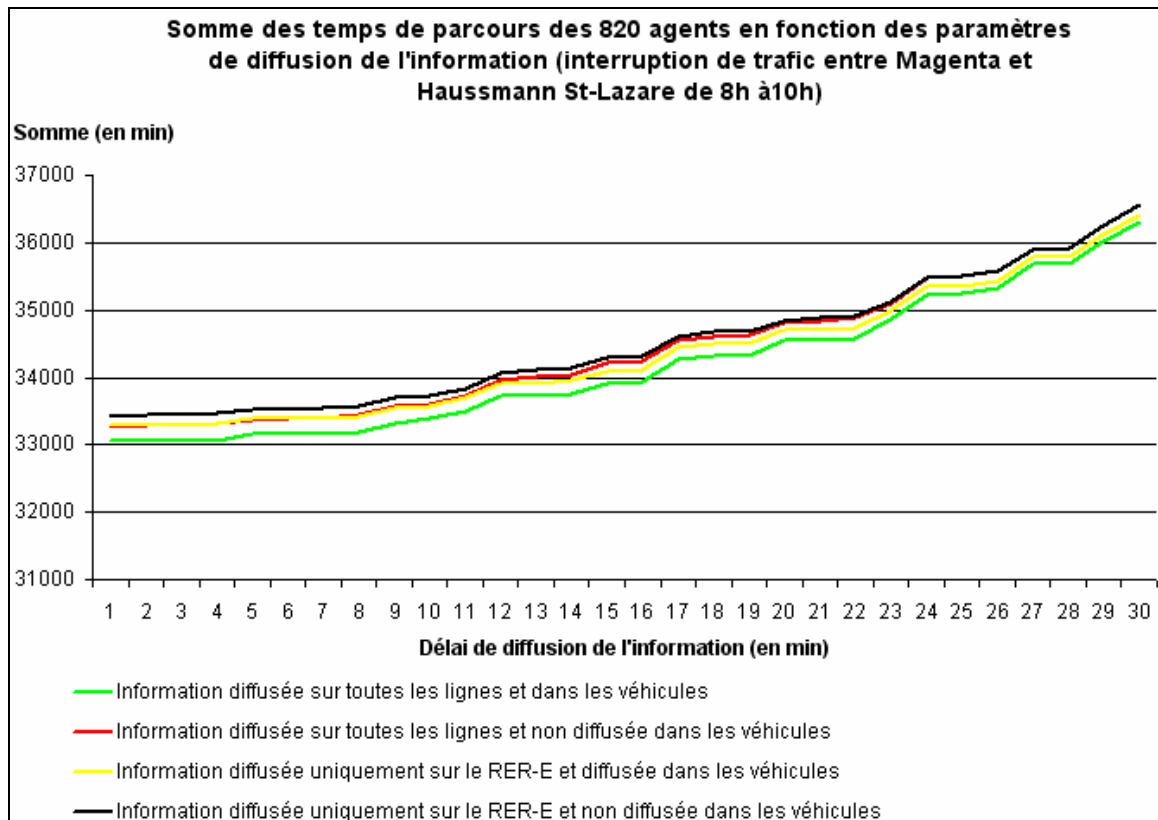


figure 104 Somme des temps de parcours des 820 agents en fonction des paramètres de diffusion de l'information

Section 7 - Valorisation monétaire du temps

Afin de compléter nos analyses, il semble pertinent de donner quelques informations relatives à la valorisation monétaire des temps gagnés ou perdus. Convertir en valeur monétaire les gains de temps constitue un élément essentiel de l'évaluation des coûts-bénéfices d'un investissement.

Ce type de données peut fournir des éléments intéressants pour des retours sur investissements possibles grâce à des améliorations dans la diffusion d'information aux voyageurs. Il donne également des informations sur les temps gagnés grâce à une nouvelle ligne de transport.

De nombreux travaux ont été menés sur la valorisation monétaire du temps. Nous nous sommes basés sur quelques références trouvées dans la littérature existante à ce sujet¹. Le cadre micro-économique standard est exploité et la valeur du temps est définie comme un taux marginal de substitution entre durée et coût du trajet. Dans le contexte particulier du choix d'un mode de transport, elle représente le montant monétaire qu'est prêt à investir l'utilisateur pour économiser sa dernière unité de temps de déplacement et conserver le même niveau d'utilité. La valeur du temps s'établit comme une relation d'équilibre entre prix et temps assurant le même niveau de satisfaction de l'individu (Lapparent de, 2003).

En raison de la diversité des caractéristiques de chaque région (réseaux et populations), il est nécessaire de disposer des valeurs du temps propres à chaque zone d'étude. Plusieurs facteurs sont en effet à prendre en compte :

- la zone d'étude : les valeurs varient en effet en fonction du contexte (taille des villes, pays...),
- le type de trajet (loisirs, domicile-travail, travail-domicile...) et sa durée,
- les caractéristiques des individus (revenus, âge,...),
- le type de transport (véhicule individuel ou transports collectifs, importance des correspondances et de critères liés au confort du voyage).

En 2001, A. de Palma et C. Fontan définissent, sur la base de l'Enquête Globale Transport de 1997, en utilisant un modèle de simulation de l'IAURIF² et dans le cadre des déplacements liés au travail en Île-de-France, les valeurs moyennes suivantes :

- usagers des transports en commun : 96F/H,
- usagers de la voiture particulière : 122F/H.

La différence entre la voiture particulière et les transports en commun est liée à la valeur de l'autonomie (pour la voiture) et à des perceptions différentes des coûts. Néanmoins, la valeur du temps est propre à chaque individu et dépend du revenu. En prenant le coefficient de transformation du franc en année (ici en 1997) en euro d'une autre année, on obtient une valeur de 17 € pour 2007.

¹ (Palma de et Fontan, 2000), (Palma de et Fontan, 2001) et (Lapparent de, 2003). Cette partie a par ailleurs été discutée avec M. de Lapparent, spécialiste du sujet.

² Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Île-de-France.

En utilisant l'enquête MADDIF¹ A. de Palma et C. Fontan (Palma de et Fontan, 2000), étudient par ailleurs les coûts de « déshorage » liés à l'arrivée en avance ou en retard (pour les déplacements du matin). Ceux-ci sont non linéaires, asymétriques (par rapport à l'heure d'arrivée souhaitée), différents entre voiture et transports en commun et dépendants des motifs de déplacement.

Lors d'une situation perturbée inopinée, les voyageurs arrivent en retard. Par conséquent, les actions pouvant leur faire économiser ce temps sont importantes mais il est difficile de les quantifier en valeur monétaire en raison de la multiplicité des paramètres à prendre en compte. Lors d'une perturbation prévue, le voyageur n'arrive pas nécessairement en retard mais doit parfois partir plus tôt. Lors des calculs de nœud à nœud, nous avons mis en évidence les variations de durées de connexion au cours du temps : le voyageur peut choisir de décaler légèrement son heure de départ. Il peut ainsi limiter sa perte de temps mais cela modifie son organisation. Il peut enfin décider de ne pas se déplacer. Les conséquences ne sont donc pas limitées à des pertes de temps.

Nous ne pouvons pas chiffrer ici d'un point de vue monétaire les temps gagnés ou perdus en fonction des paramètres de diffusion de l'information des voyageurs. Nous ne maîtrisons pas suffisamment le degré d'approximation des valeurs obtenues pour la monétarisation : celles issues de notre modélisation² et les données générales sur la monétarisation du temps. Il serait nécessaire de prendre en compte les spécificités des agents (ex : revenu) et leur type de trajet avec leur durée. Il faut veiller à ne pas dépasser le champ de « légitimité » de notre recherche.

Néanmoins, les temps gagnés représentent potentiellement des valeurs monétaires importantes, même si elles sont sans commune mesure avec ce qu'un voyageur serait prêt à payer. « *Le fait qu'il existe une forte demande pour une information trafic ne signifie pas que les voyageurs soient prêts à payer spécifiquement ce service* » (ITS France, 2002). L'information fait partie intégrante du service proposé. De plus, cela pose des questions éthiques et le droit à l'information doit être pleinement pris en compte. **Des valeurs monétaires élevées de gain grâce à l'information des voyageurs peuvent par contre légitimer des investissements au même titre que des renforcements de l'offre de transport car il s'agit d'améliorations du service de transport qu'il est possible de quantifier.**

Ainsi, l'information n'a pas un rôle uniquement qualitatif. Néanmoins, la valeur accordée à l'information par les voyageurs dépend de critères qualitatifs. Une étude récente a par exemple montré que l'information sur la cause d'un retard est plus valorisée par les voyageurs pour des trajets vers Paris que depuis Paris (Kouwnhoven, Caussade et Kroes, 2006).

Il s'agit là d'un champ de recherche qui demande à être approfondi par une coopération avec des économistes notamment.

¹ MultiMotif Adapté à la Dynamique des comportements de Déplacement en Île-de-France.

² Le modèle PERTURB et les données relatives à l'offre et à la demande de transport demandent à être enrichis et plus éprouvés pour produire des valeurs de ce type.

Conclusion

Les calculs et simulations effectués sur notre terrain d'étude (l'Île-de-France) ont permis la production de résultats quantitatifs en utilisant le modèle PERTURB. Des mesures ont été faites dans le champ de la vulnérabilité structurelle et fonctionnelle. Celles-ci fournissent de nombreux éléments pour la discussion des hypothèses définies à la fin de la première partie¹.

Les mesures de vulnérabilité structurelle (calculs de nœud à nœud, unipolaires, multipolaires) ont mis en évidence les points suivants :

- grande variabilité des conséquences d'une perturbation en fonction de l'heure (spécificité liée à la structure horaire des transports en commun) : hétérogénéité temporelle ;
- grande variabilité des conséquences d'une perturbation en fonction de la localisation des nœuds sur le réseau et de la situation par rapport à la perturbation : hétérogénéité spatiale,
- reports des chemins sur des lignes de contournement (par redondance partielle).

Les calculs multipolaires ont permis de comparer entre eux les différents scénarii de perturbation, leurs conséquences étant très diverses en fonction de leur localisation. Si les perturbations en zone centrale entraînent globalement plus de dysfonctionnements, ceux-ci sont moins extrêmes que dans des zones périphériques moins maillées. A ce niveau, l'analyse mériterait d'être complétée avec une prise en compte des lignes de bus (qui peuvent éventuellement venir compenser le maillage peu important du réseau ferroviaire) et l'étude de perturbations dans des zones de proche couronne, où le maillage est intermédiaire entre les deux cas étudiés ici.

Les analyses possibles avec PERTURB mettent en exergue des phénomènes de ségrégation temporelle et spatiale en situation perturbée (et en différentiel par rapport à la situation normale) pouvant venir compléter les analyses souvent faites sur la base d'une situation théorique, en l'absence de perturbation. Ces éléments seraient utiles dans le cadre d'analyses de la vulnérabilité aval², par exemple l'étude des conséquences sur la ville de tels dysfonctionnements³.

Les mesures de vulnérabilité fonctionnelle ont été faites en utilisant les module OD et ODI. Les simulations avec un agent ont le mérite de montrer les influences différentes que peut avoir l'information sur le cheminement d'un voyageur en particulier. On prend ainsi conscience de la sensibilité du modèle et de la nécessité d'une prudence dans l'interprétation des résultats. En prenant en compte plusieurs agents, il est possible d'obtenir des mesures

¹ Voir la discussion des hypothèses dans la conclusion de cette partie.

² Voir le chapitre IV de la deuxième partie.

³ Certaines conséquences de dysfonctionnements sont déjà connues. Par exemple, certains employeurs peuvent hésiter à recruter des personnes si elles sont desservies par une ligne connaissant beaucoup de dysfonctionnements. Il s'agit plus ici des conséquences d'aléas répétés, mais une faible vulnérabilité par rapport à ceux-ci (ex : lignes de substitution) permettrait de réduire ces conséquences négatives.

globales des conséquences des paramètres de diffusion de l'information, même si ces derniers demandent encore à être affinés. Ceci pourra s'avérer très utile par la suite pour effectuer des mesures monétaires, utiles dans le cadre d'évaluation d'investissements.

Ces analyses méritent d'être complétées par un travail sur des systèmes théoriques de transport. Celui-ci, outre le fait qu'il montre qu'il est possible de travailler sur d'autres cas, a pour objet d'étudier de manière plus libre et systématique l'influence du maillage du réseau et des contraintes de capacité.

CHAPITRE II APPLICATIONS SUR DES SYSTEMES THEORIQUES DE TRANSPORT

Introduction

Le travail présenté dans ce chapitre porte sur trois systèmes de transports collectifs théoriques possédant des caractéristiques variables (maillage du réseau, fréquences de desserte...) dans le but d'évaluer leurs liens avec les régulations lors de situations perturbées (adaptabilité du système de transport). Il s'agit de quantifications comparatives et les valeurs obtenues n'ont de valeur que dans ce cadre très précis.

La plate-forme de simulation autorise une combinaison quasi-illimitée de simulations. C'est pourquoi nous avons orienté les simulations en fonction des hypothèses définies et plus particulièrement celles pour lesquelles peu d'éléments de réponse avaient pu être apportés avec notre travail sur l'Île-de-France.

Nous avons ainsi effectué des simulations intégrant le paramètre « capacité des véhicules », contrairement au travail réalisé sur l'Île-de-France. Il s'agit ici de montrer l'influence de ce paramètre et donc tout l'intérêt de sa prise en compte sur des cas réels.

Le travail a été réalisé sur trois réseaux : réseau de 100 nœuds à maille triangulaire, réseau de 42 nœuds avec des rocares et réseau de 100 nœuds de forme arrondie.

Ces applications complètent le travail réalisé sur l'Île-de-France.

Section 1 - Applications sur un réseau de 100 nœuds à maille triangulaire

A- Le réseau initial et la création des lignes

Tout d'abord, un réseau de 100 nœuds à maille triangulaire est généré avec le programme *RES*. Chaque nœud se voit affecté un poids identique (2 000 agents). Le réseau est ainsi globalement homogène.

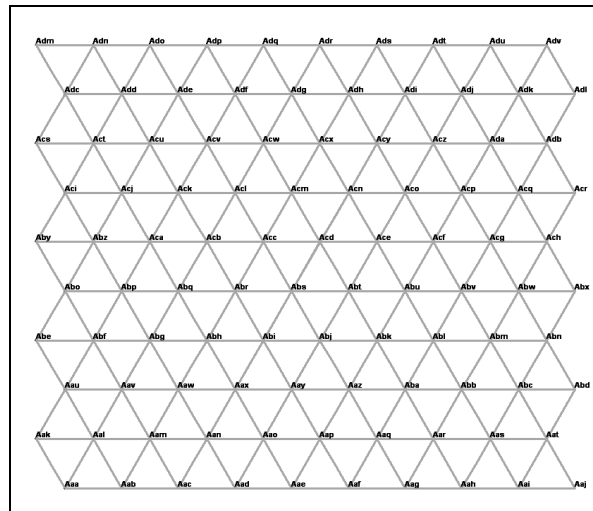


figure 105 *Le réseau initial*

Avec l'application *Créationlignes*, nous créons les lignes du réseau. Celles-ci doivent recouvrir l'ensemble des arcs, en évitant les superpositions. La plage horaire des circulations est 6h-12h. L'intervalle entre deux circulations est de 10 minutes (sauf la ligne 1 : 9 minutes) et le temps de parcours entre deux points de 5 minutes (4 pour la ligne 1). 38 lignes sont ainsi créées.

Le processus peut être visualisé de façon dynamique sur une animation vidéo (**CREAL-1**). La *figure 106* présente leur potentiel de trafic, par la somme des arcs-valeurs¹ de chaque arc des lignes. Plus on avance dans le processus, plus les lignes sont courtes (jusqu'à n'avoir qu'un seul arc) et ont un potentiel de trafic peu élevé.

¹ Ici : nombre de minutes par arc avec calcul multipolaire et pondération des relations suite à l'utilisation d'un modèle gravitaire (voir dans le chapitre IV de la Partie II).

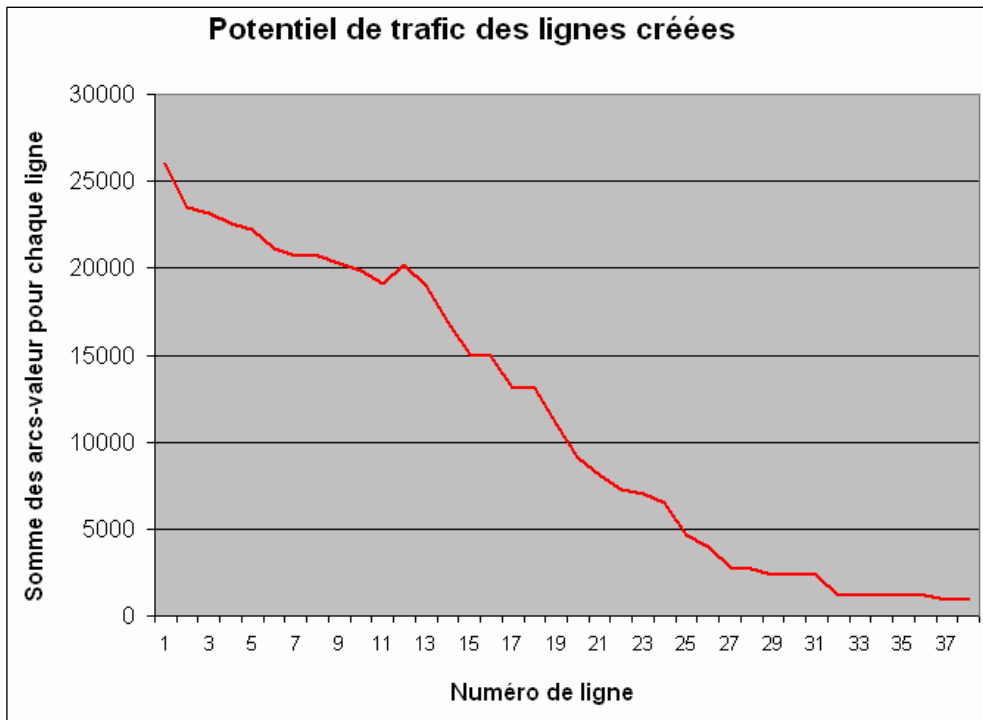


figure 106 Potentiel de trafic des lignes créées

Afin de travailler sur des réseaux différents tout en gardant la possibilité de les comparer facilement, on garde tous les états intermédiaires du processus de création des lignes. La figure 107 montre les réseaux à 10 et 20 lignes.

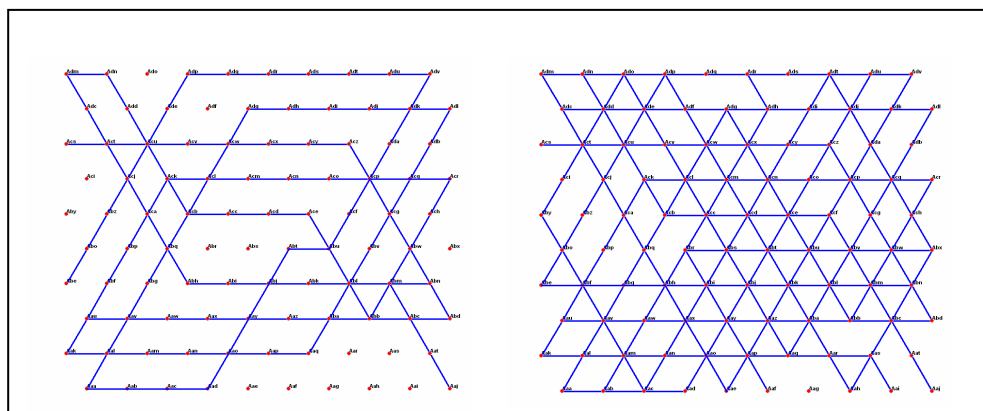


figure 107 Réseaux à 10 et 20 lignes

On fait ainsi varier le maillage sans utiliser l'application *Maillage*. Ceci permet d'avoir les mêmes caractéristiques de lignes. Par contre, tous les nœuds ne sont pas desservis lorsque le nombre de lignes conservées est faible. Sur la figure 107, on observe que certains nœuds ne sont pas desservis.

B- Perturbation étudiée

On considère une interruption de circulation sur la ligne 1 entre les nœuds ACA et ABL. La ligne 1 est la ligne partant du coin en haut à gauche (nœud ADM) de la figure pour se diriger vers celui en bas à droite (nœud AAJ).

Pour les calculs multipolaires, on ne tient pas compte des nœuds situés entre ces deux nœuds (afin d'obtenir des valeurs comparables dans la mesure où ils ne sont pas joignables dans certaines configurations de réseau).

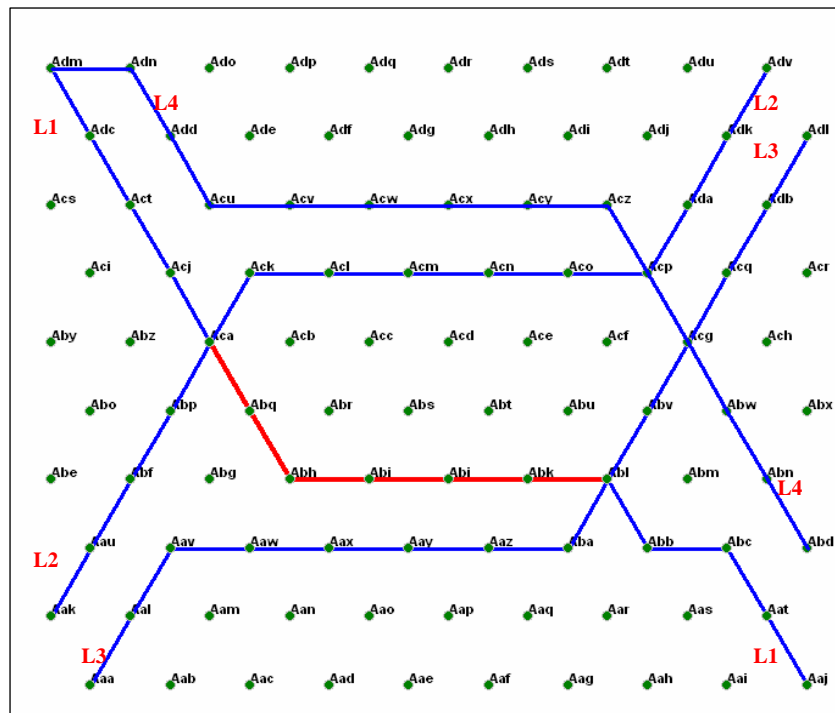


figure 108 Localisation de la perturbation : visualisation sur le réseau à 4 lignes

C- Calculs multipolaires : exploration systématique

Nous effectuons des calculs multipolaires à 8h pour les réseaux obtenus (de 4 à 38 lignes)¹. La figure 109 montre simultanément le pourcentage de temps supplémentaire lié à la perturbation et le maillage en fonction du nombre de lignes prises en compte dans les calculs. Ceci correspond à une mesure de la différence entre situation normale et perturbée et peut donc être considérée comme une mesure de la vulnérabilité structurelle du réseau.

Le maillage est mesuré ici par le nombre d'arcs divisé par le nombre de sommets.

¹ 4 lignes est le minimum de lignes possible. En effet, la perturbation sur un réseau à trois lignes a pour conséquence de rendre le graphe non connexe (sachant que les nœuds situés sur le tronçon perturbé sont déjà exclus).

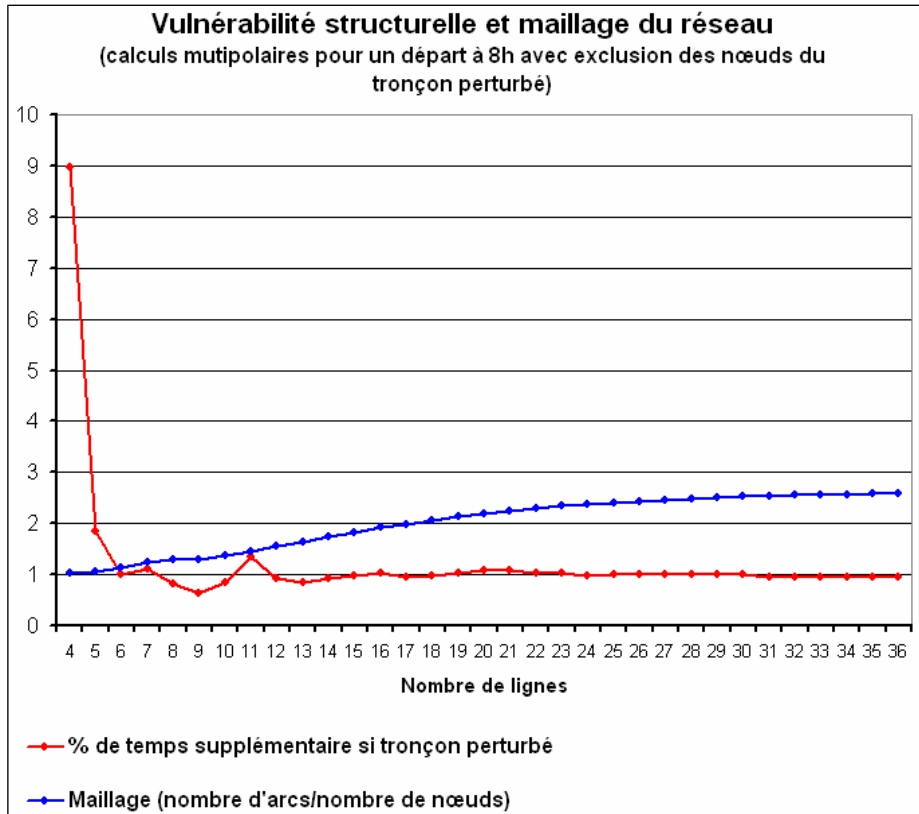


figure 109 Vulnérabilité structurelle et maillage du réseau (calculs mutipolaires pour un départ à 8h avec exclusion des nœuds du tronçon perturbé)

Une augmentation du maillage n’entraîne pas nécessairement une baisse dans le temps de parcours supplémentaire (en pourcentage) lié à la perturbation¹. En particulier, l’ajout des lignes 10 et 11 entraîne paradoxalement une augmentation du pourcentage de temps supplémentaire lié à la perturbation. On le voit avec un pic (valeur 1,34) sur la courbe représentant le pourcentage de temps supplémentaire lié à la perturbation.

Le graphique de la figure 110 donne des éléments d’explication. Il montre en effet que l’ajout de ces deux lignes renforce l’importance de la ligne 1... et donc la dépendance du réseau par rapport à celle-ci.

¹ Néanmoins, il faut garder à l’esprit le fait qu’un maillage plus important peut permettre de connecter les nœuds du tronçon perturbé, non pris en compte ici.

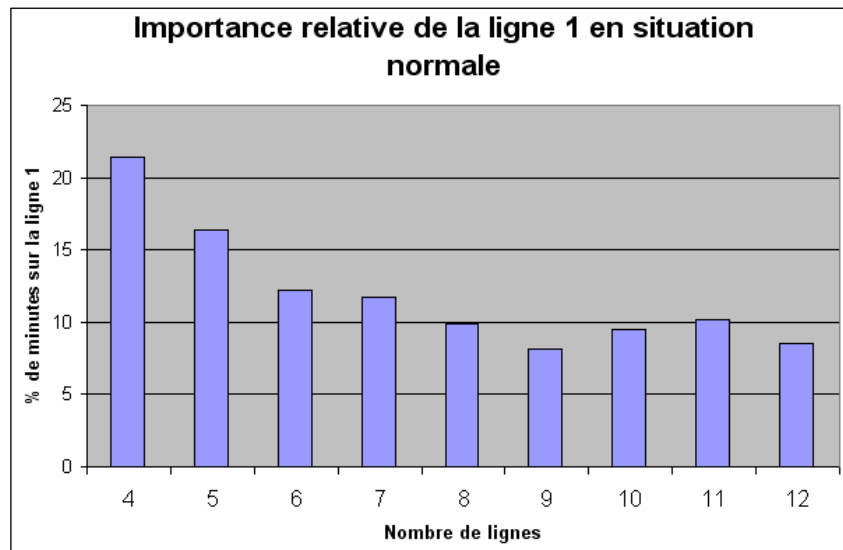


figure 110 *Importance de la ligne 1 en situation normale*

Ainsi, la vulnérabilité par rapport à une perturbation pourrait dans certaines conditions croître avec une augmentation du maillage du réseau. Nous allons approfondir ce point particulier.

D- Calculs multipolaires : travail sur le réseau à 4 lignes

Nous approfondissons la question de l'influence du maillage en travaillant sur le réseau à 4 lignes, auquel on ajoute ensuite d'autres lignes. Nous ne prenons pas en compte dans les calculs les nœuds supplémentaires induits par ces lignes (elles peuvent donc être considérées comme des navettes directes entre deux nœuds déjà existants sur le réseau). Leur fréquence est d'une circulation toutes les 10 minutes.

1 - Ajout d'une ligne renforçant la ligne 1

Nous ajoutons tout d'abord une ligne entre les nœuds ABL et ABN, représentée en vert sur la *figure 111*. Le nœuds ABM n'est pas desservi : le nombre de nœuds reste donc le même.

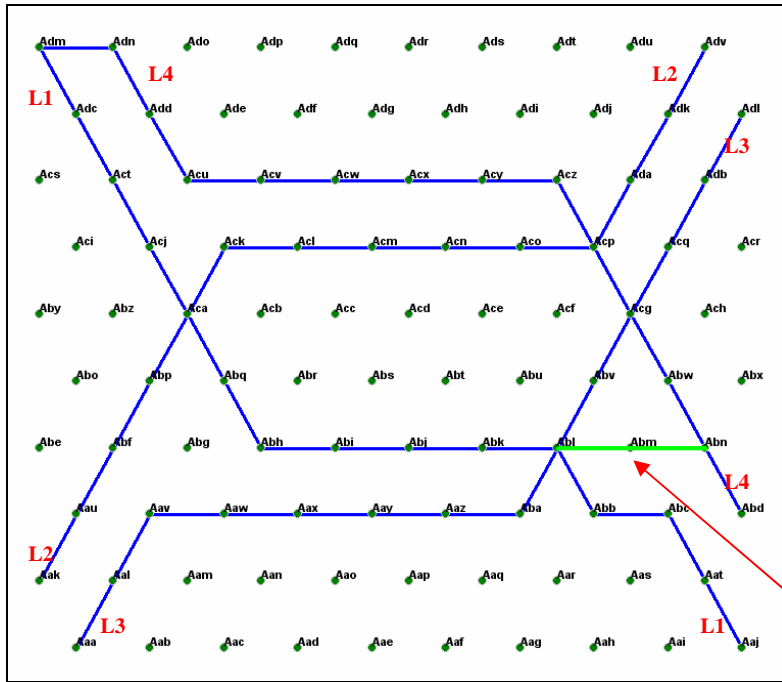


figure 111 Ajout de la ligne ABL-ABN

L'ajout de cette ligne a pour conséquence de renforcer l'importance de la ligne 1. On l'observe sur le graphique de la figure 112 : le nombre de minutes sur cette ligne pour des calculs multipolaires (ici à 8h) est plus élevé avec 5 lignes qu'avec 4 (17 520 contre 16 792). Ceci est logique dans la mesure où cette ligne peut être considérée comme une ligne de rabattement vers la ligne 1.

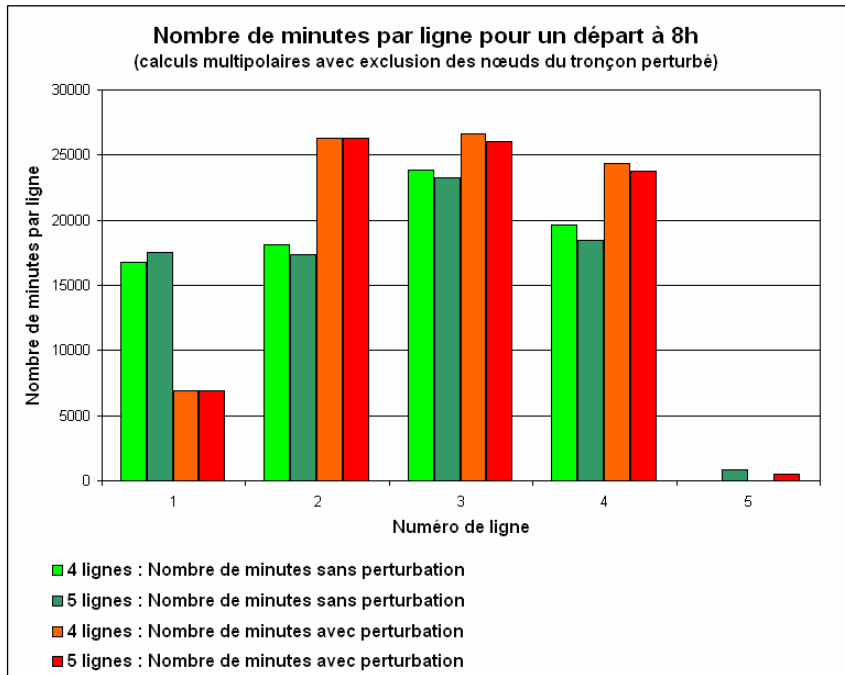


figure 112 Nombre de minutes par ligne pour un départ à 8h (calculs multipolaires avec exclusion des nœuds du tronçon perturbé)

Le résultat est une augmentation paradoxale, contre intuitive, de la vulnérabilité. Le pourcentage de temps supplémentaire lié à la perturbation est plus élevé lorsqu'il y a 5 lignes et ceci à toutes les heures. La différence est relativement faible mais réelle : 8,5 % contre 8,9 %. Nous prenons en compte ici toutes les relations (exceptées celles concernant les nœuds exclus des calculs). En nous focalisant uniquement sur les relations concernées par la perturbation¹, la différence serait plus nette. Cela n'aurait toutefois pas une grande signification dans le cas présent, l'important étant de montrer que ce type de cas peut se produire.

Ceci est mis en évidence sur le graphique de la *figure 113*.

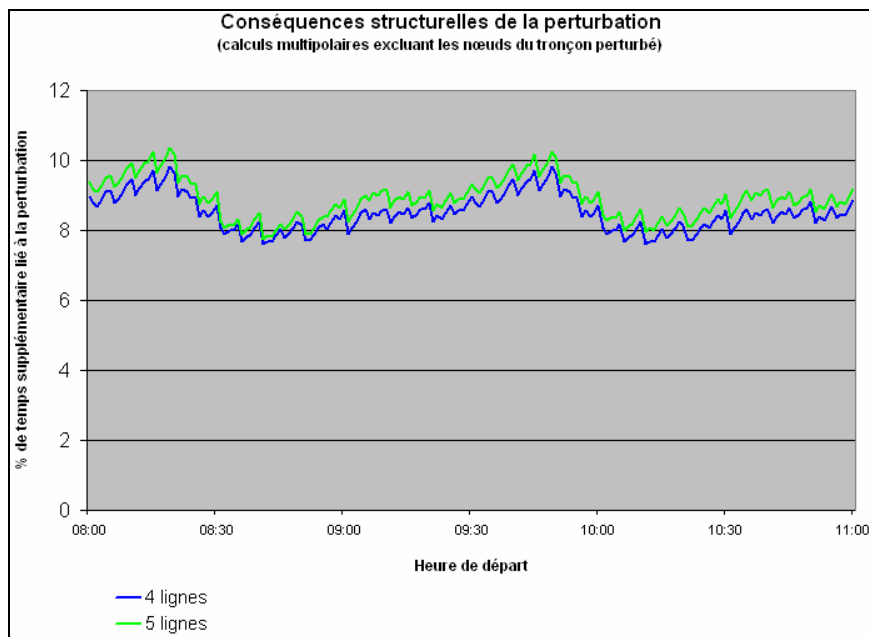


figure 113 Conséquences structurelles de la perturbation (calculs multipolaires excluant les nœuds du tronçon perturbé)

Par conséquent, l'écart entre la situation normale et la situation perturbée (et donc la vulnérabilité) augmente avec l'ajout de cette ligne. Signalons néanmoins que toute mesure de vulnérabilité est partielle et l'ajout de cette ligne peut baisser la vulnérabilité à d'autres perturbations. Par ailleurs, cela ne signifie pas que la situation avec 5 lignes est moins bonne (car le temps de parcours global est plus faible qu'avec 4 lignes) mais qu'elle fait augmenter l'écart entre situation normale et situation perturbée dans le cas étudié.

2 - Ajout d'une ligne diminuant l'importance de la ligne 1

Nous ajoutons une ligne entre les nœuds ACA et ACG, représentée en vert sur la *figure 114*. Comme dans le cas précédent, il s'agit d'une navette ne desservant pas les nœuds intermédiaires afin de conserver le même nombre de nœuds.

¹ Comme nous l'avons fait pour notre travail sur l'Île-de-France (voir le chapitre précédent).

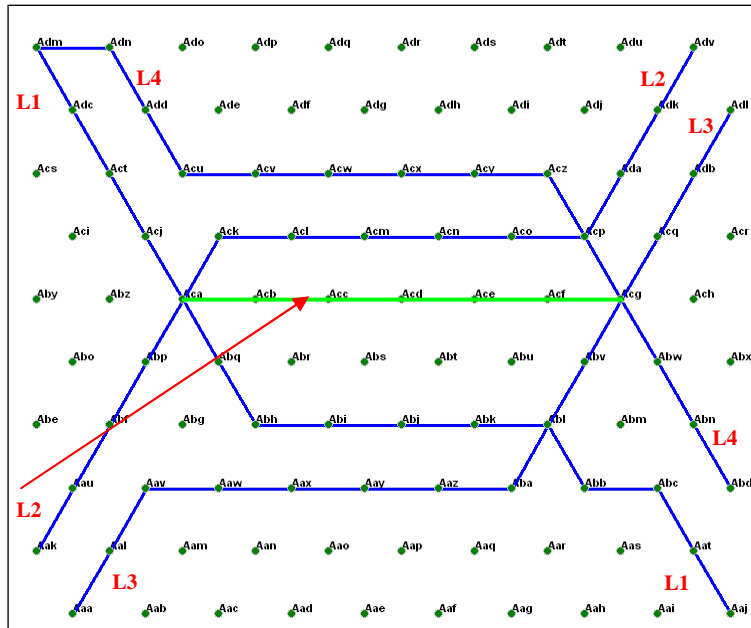


figure 114 Ajout de la ligne ACA-ACG

Contrairement au cas précédent, l'ajout de la ligne ACA-ACG a pour conséquence une diminution de l'importance de la ligne 1, mise en évidence dans le graphique de la figure 115. Le nombre de minutes sur la ligne 1 est plus faible avec la 5^{ème} ligne (15 992 contre 16 792).

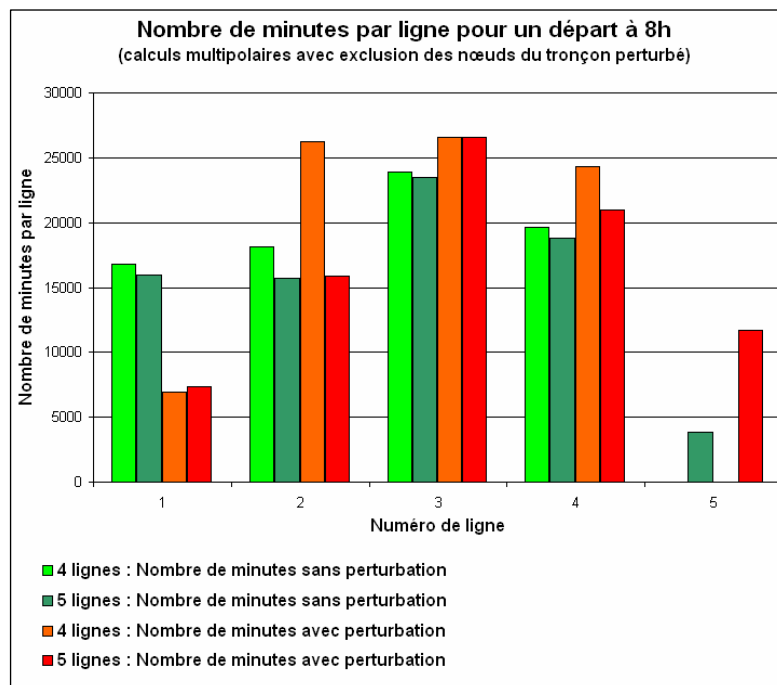


figure 115 Nombre de minutes par ligne pour un départ à 8h (calculs multipolaires avec exclusion des nœuds du tronçon perturbé)

Contrairement au cas précédent, le pourcentage de temps supplémentaire lié à la perturbation est plus faible lorsqu'il y a 5 lignes et ceci à toutes les heures. La différence est nette : 8,5 % contre 5,9 % en moyenne. La ligne 5 compense partiellement les dysfonctionnements de la ligne 1.

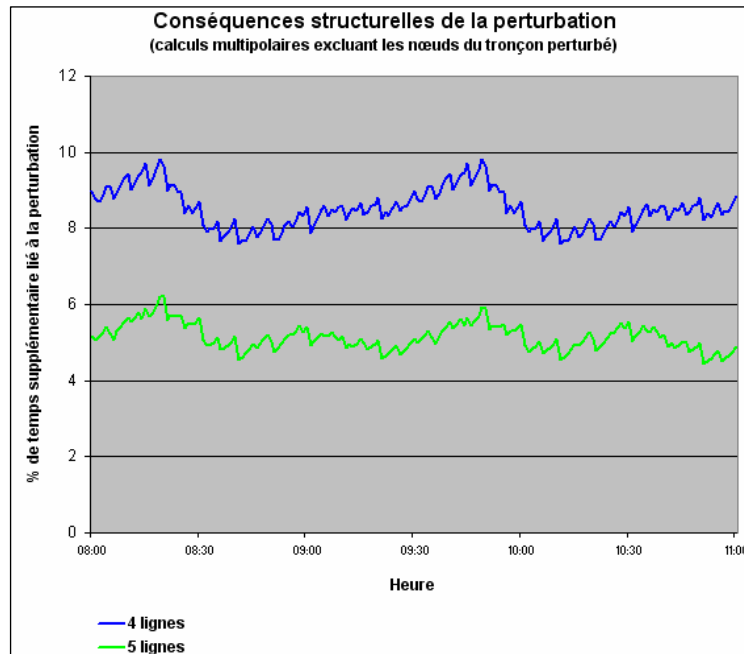


figure 116 *Conséquences structurelles de la perturbation (calculs multipolaires excluant les nœuds du tronçon perturbé)*

L'influence du maillage du réseau sur la vulnérabilité ne peut donc se limiter à une relation du type : augmentation du rapport nombre d'arcs/nombre de nœuds → baisse du maillage. Renforcer l'importance d'un axe par la création de lignes de rabattement peut avoir pour conséquence d'augmenter la vulnérabilité à des défaillances de celui-ci. Au contraire, certaines lignes participent à une certaine redondance partielle et diminuent la vulnérabilité à des défaillances possibles de lignes existantes.

E- Simulations avec plusieurs agents

En utilisant les modules ODI et ODIC, il est possible de simuler les déplacements d'agents et d'évaluer le rôle de l'information en situation perturbée.

1 - Réseau et perturbation étudiés

Toujours sur le même réseau initial (réseau à 4 lignes), nous ajoutons une ligne correspondant à une navette entre les nœuds ACT et ACU (en vert sur la *figure 117*). La capacité des véhicules est de 20 places. Nous faisons varier la fréquence de circulation sur cette ligne de 5 à 30 minutes. Ceci permet de faire varier son débit et donc de modifier les possibilités

d'écoulement des flux grâce à cette ligne. Les autres lignes ne sont pas concernées par les problèmes de capacité éventuels¹.

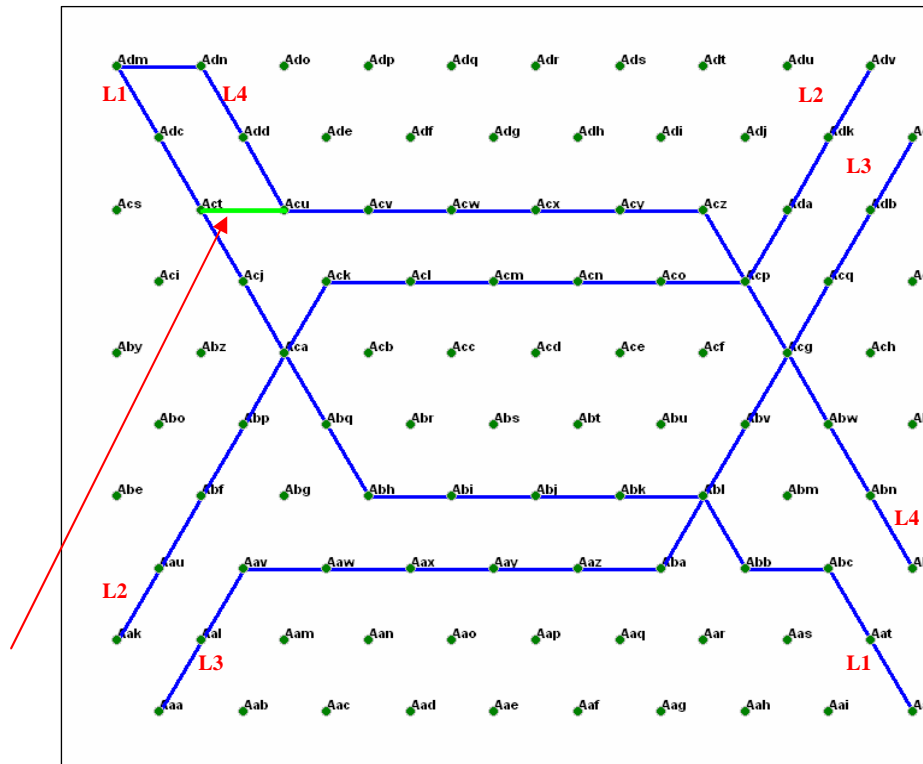


figure 117 Ajout de la navette ACT-ACU

50 agents partent du nœud ADM (en haut à gauche) à 8h00 et 50 du nœud ADC (nœud suivant sur la ligne) à 8h10 et se dirigent vers des nœuds situés au-delà du tronçon perturbé (toujours ACA-ABL). Ils ont une durée de trajet théorique plus ou moins élevée en fonction de leur nœud de destination. Ils doivent emprunter le tronçon ACA-ABL qui est perturbé en cours de simulation (début de la perturbation à 8h11).

La perturbation intervient lorsqu'ils sont entre les nœuds ADC et ACT. Ainsi, s'ils sont informés (si l'information est diffusée dans les véhicules et qu'il reçoivent l'information dans les véhicules), ils peuvent se réorienter sur la ligne ACT-ACU (que nous appellerons ligne 5) en descendant du véhicule. Il faut pour cela que cette ligne leur permette potentiellement de gagner du temps (cela peut être variable en fonction des horaires).

2 - 1^{er} cas : tous les agents reçoivent l'information dans les véhicules

La figure 118 montre le temps de parcours des agents en fonction de la fréquence de circulation sur la ligne 5. Pour les fréquences de ligne de 5 à 20 minutes, tous les agents descendent du véhicule pour emprunter la navette (ligne 5). Néanmoins, en raison des problèmes de capacité, de nombreux agents ne peuvent pas monter dans le premier ou deuxième véhicule. On peut remarquer que plus l'agent a un numéro élevé, plus il subit les

¹ On définit pour les véhicules de ces lignes une capacité de 100 places. Nous faisons ensuite (voir plus bas) des simulations avec 100 agents.

contraintes de capacité. Cela est lié aux règles de fonctionnement du modèle (voir le chapitre III de la Partie II)¹. A partir de 25 minutes, la structure horaire fait que les agents, même s'ils sont informés, ne se réorientent pas car le trajet avec la ligne 5 n'est pas plus rapide². Cela est identique à une situation où l'information n'est pas diffusée dans les véhicules. Le temps de parcours des agents dépend donc de leur destination finale, des fréquences de la ligne 5 et de leur numéro d'identifiant.

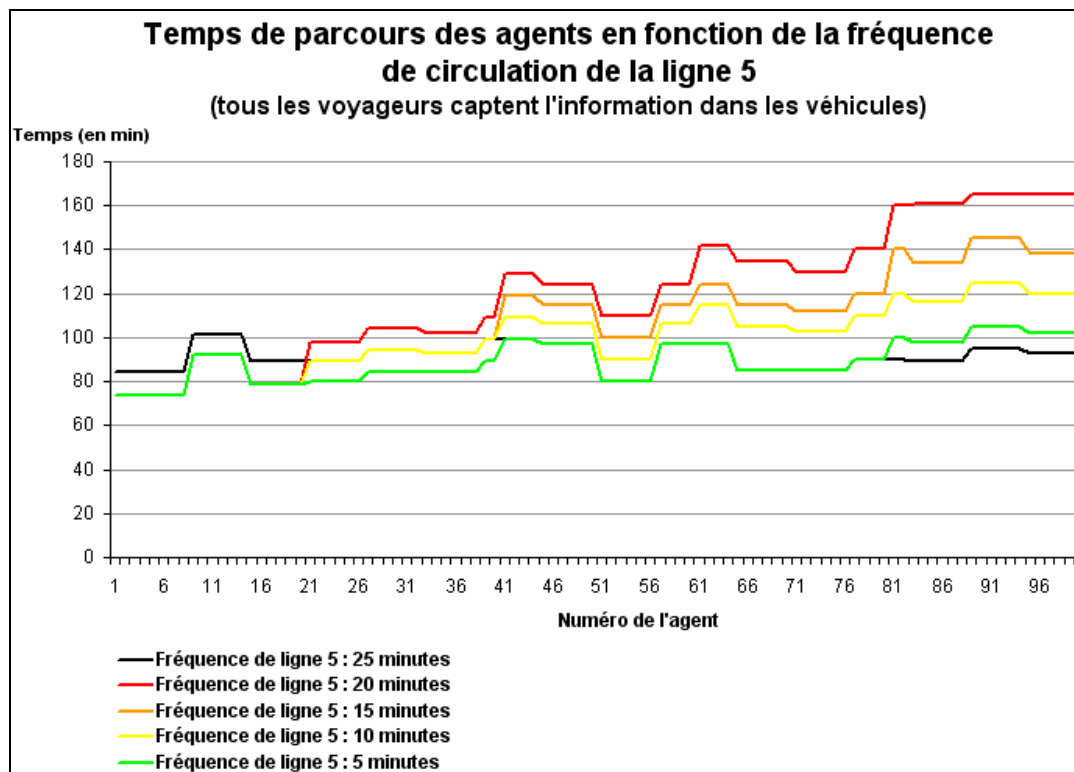


figure 118 Temps de parcours en fonction de la fréquence de circulation de la ligne 6 (tous les agents captent l'information dans les véhicules)

La figure 119, présentant le nombre d'agents en correspondance au nœud ACT (pour emprunter la ligne 5) montre que l'écoulement se fait plus ou moins vite en fonction de la fréquence de la ligne 5. En absence de contraintes de capacité (utilisation du modèle ODI), l'écoulement se fait totalement dès le premier véhicule. Cela correspondrait par exemple à un cas où les véhicules de cette ligne seraient dotés d'une plus grande capacité. On peut observer qu'en début de simulation, le nombre d'agents en correspondance pour une fréquence de la ligne 5 d'un véhicule toutes les 10 minutes est supérieur à celui obtenu avec un véhicule toutes les 15 minutes. Ceci correspond au fait que la structure horaire différente entraîne une possibilité pour monter dans le premier véhicule plus tôt.

¹ Lorsque plusieurs agents arrivent sur un même nœud, on débute le traitement par ceux ayant l'identifiant le plus petit. La définition de files d'attente au niveau des nœuds permet ensuite aux agents n'ayant pu monter dans un véhicule d'être prioritaires lorsque le suivant arrive.

² A une autre heure, cela peut être différent s'il y a un véhicule « au bon moment ».

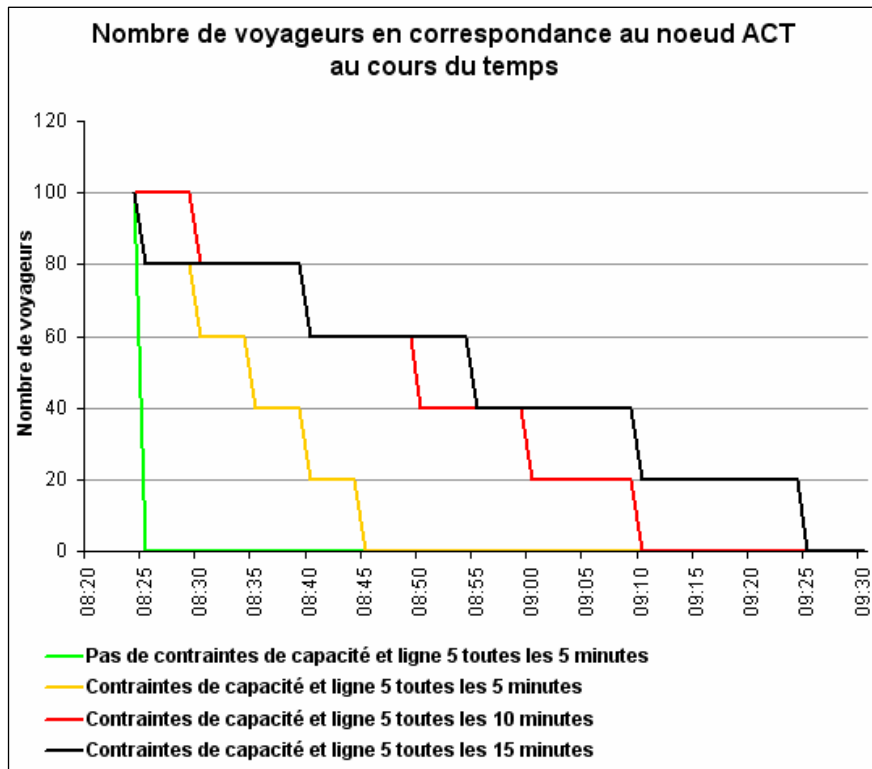


figure 119 Nombre d'agents en correspondance au nœud ACT au cours du temps

La figure 120 présente le temps de parcours global sur le réseau en fonction de la fréquence de la ligne 5. On remarque que pour des fréquences de 10 à 20 minutes, le temps de parcours global est plus faible si l'information n'est pas diffusée dans les véhicules. Néanmoins, certains agents sont gagnants (temps de parcours inférieur à une situation équivalent à une absence de diffusion d'information)...d'où l'intérêt de combiner des valeurs agrégées et désagrégées dans l'analyse des résultats.

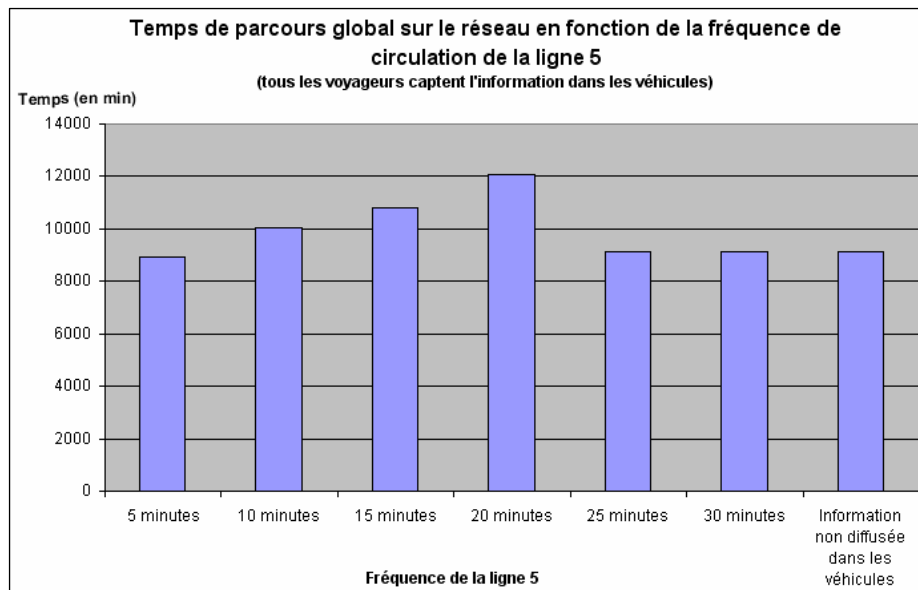


figure 120 Temps de parcours global sur le réseau en fonction de la fréquence de circulation de la ligne 5

Quatre animations vidéos montrent les cheminements des agents en fonction des paramètres de simulation :

- **RES1-1** : non prise en compte des contraintes de capacité et information diffusée dans les véhicules ;
- **RES1-2** : information diffusée dans les véhicules, fréquence de la ligne 5 de 5 minutes et prise en compte des contraintes de capacité ;
- **RES1-3** : information diffusée dans les véhicules, fréquence de la ligne 5 de 20 minutes et prise en compte des contraintes de capacité ;
- **RES1-4** : information non diffusée dans les véhicules.

3 - 2^{ème} cas : un agent sur deux ne capte pas l'information dans les véhicules

Les agents ne recevant pas l'information ne se réorientent pas. Par conséquent, les problèmes de capacité sur la ligne 5 sont moins importants car tous les agents ne descendent pas au nœud ACT.

La figure 121 montre par conséquent des différences de temps de parcours plus faibles que dans le cas précédent. Le temps supplémentaire moyen par agent dans le cas d'une fréquence de la ligne 5 de 20 minutes par rapport à une fréquence de 5 minutes est de 6 minutes alors qu'il était de 31 minutes dans le cas précédent.

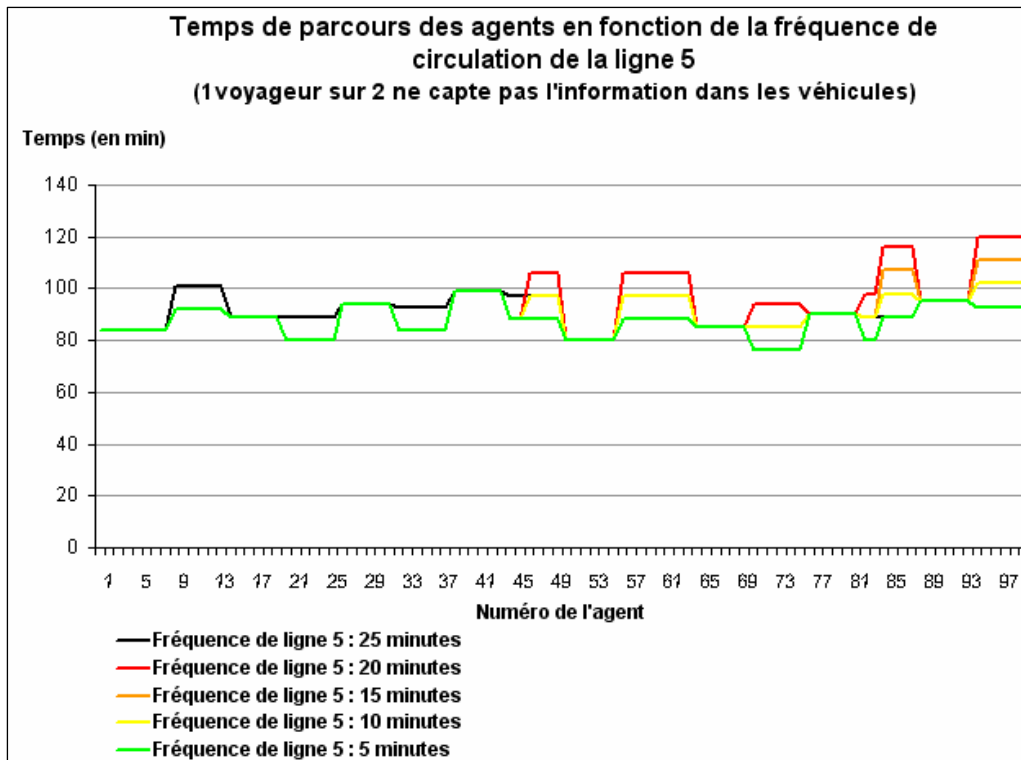


figure 121 Temps de parcours des agents en fonction de la fréquence de circulation de la ligne 6 (1 agent sur 2 ne capte pas l'information dans les véhicules)

Trois animations vidéos montrent les cheminements des agents en fonction des paramètres de simulation :

- **Vidéo RES1-5:** non prise en compte de capacité et information diffusée dans les véhicules ;
- **Vidéo RES1-6 :** information diffusée dans les véhicules, fréquence de la ligne 5 de 5 minutes et prise en compte des contraintes de capacité ;
- **Vidéo RES1-7 :** information diffusée dans les véhicules, fréquence de la ligne 5 de 20 minutes et prise en compte des contraintes de capacité.

4 - Comparatif des deux cas

La figure 122 permet de comparer les deux cas étudiés.

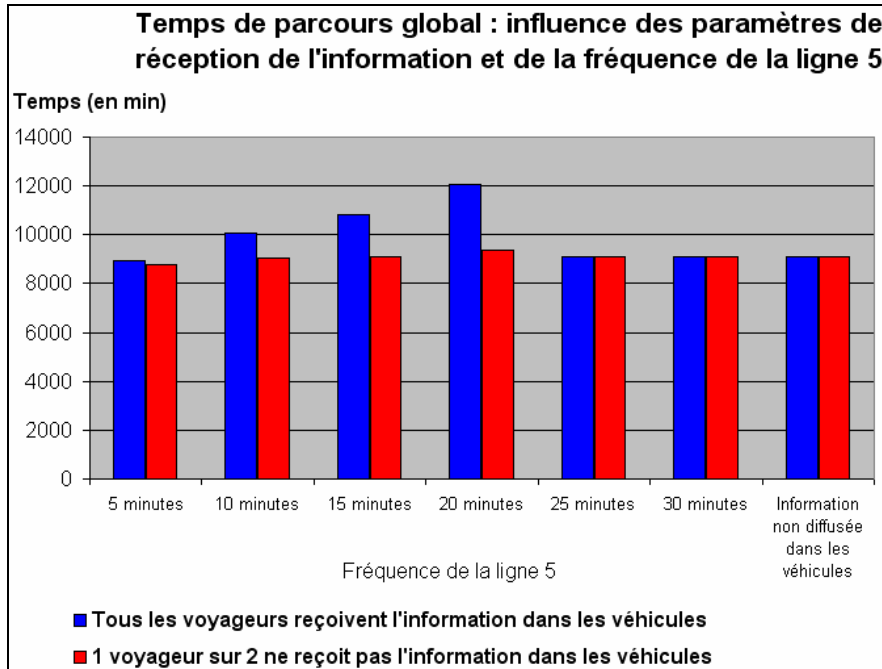


figure 122 Temps de parcours global : influence des possibilités de réception de l'information par les agents et de la fréquence de la ligne 5

On peut remarquer que le temps de parcours global le plus faible est obtenu lorsque la fréquence de la ligne 5 est de 5 minutes et que certains agents ne captent pas l'information (légèrement mieux qu'avec l'information non diffusée dans les véhicules). Avec un tiers d'agents recevant l'information, le temps de parcours global serait probablement encore plus faible.

De plus, plus la fréquence de la ligne 5 est faible (tout du moins de 5 à 20 minutes), plus la différence liée au fait que tous les agents ne captent pas l'information dans les véhicules est élevée.

A partir d'une fréquence de la ligne 5 de 25 minutes, les agents ne se réorientent pas (équivalent à une situation en l'absence de diffusion d'information dans les véhicules).

En intégrant les contraintes de capacité, une diffusion performante de l'information (rapide, en tous lieux) peut conduire à une situation non optimale. En effet, la réorientation massive des agents entraîne des problèmes de circulation des flux. Il y a alors diffusion des problèmes engendrés par la perturbation sur d'autres lignes. Cela peut engendrer des difficultés pour des agents non concernés au départ par la perturbation (dans le cas présent, des agents prenant la navette ACT-ACU à partir du nœud ACV ne pourraient pas monter dans le véhicule faute de place).

Section 2 - Applications sur un réseau avec des rocade

Nous avons constitué un réseau de transport sans utiliser les applications *RES*, *Maillage* et *Créationlignes*, afin de construire un réseau avec des rocade. En effet, de nombreuses réflexions ont lieu, par exemple en Île-de-France, sur le développement de lignes facilitant les déplacements entre périphéries sans avoir à passer par le centre.

A- Caractéristiques du réseau

Nous avons constitué un graphe de 42 sommets et 58 arcs (non orientés).

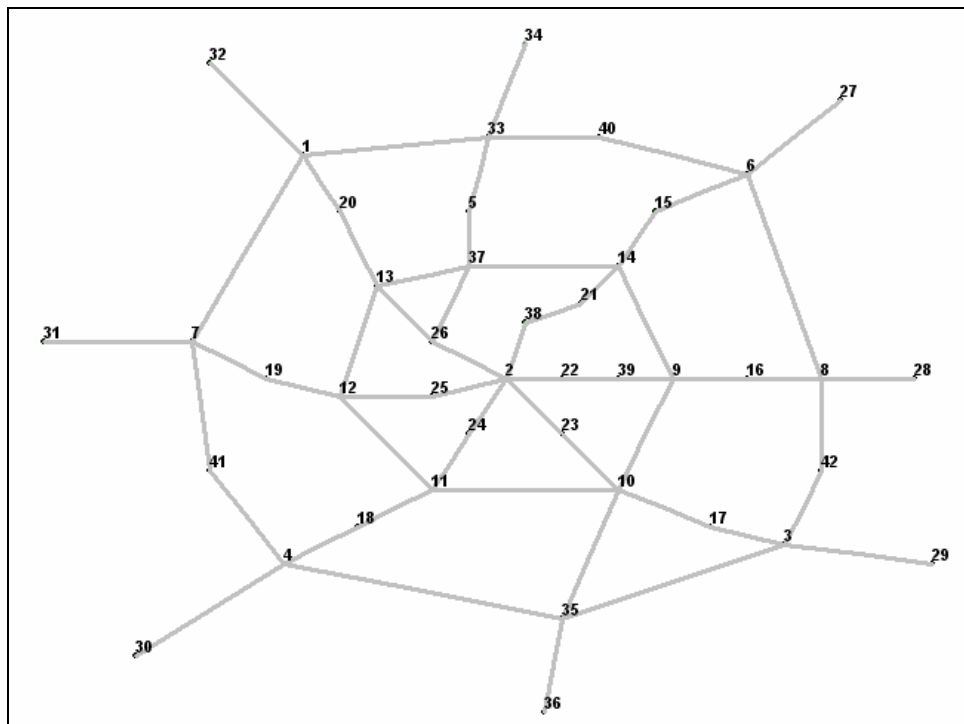


figure 123 Réseau de 42 sommets et 58 arcs

6 lignes ont été créées. Leur fréquence est de 10 minutes chacune et les circulations ont lieu sur la plage horaire 8h-13h. Les temps de parcours entre nœuds tiennent compte des distances des arcs les séparant. Les lignes 1 et 4 ont un tronçon commun : du nœud 26 au nœud 10. Les lignes 5 et 6 correspondent à des tangentiels. La ligne 6 est une rocade extérieure : nous la prenons en compte ou non lors des calculs et simulations, afin de mesurer son influence.

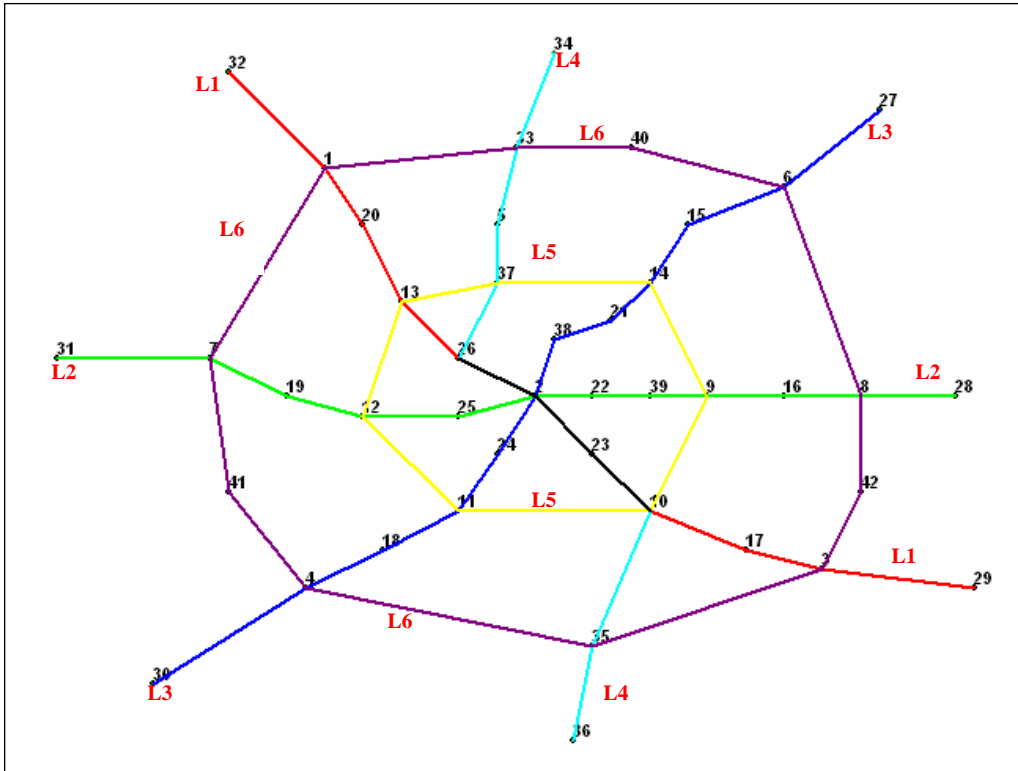


figure 124 Les 6 lignes du réseau

B- Calculs multipolaires

Nous avons déjà établi un lien entre le degré d'utilisation d'une ligne et la vulnérabilité à des défaillances de celle-ci. Nous avons par ailleurs vu que l'ajout de certaines lignes avait pour conséquence le renforcement de certaines lignes ou au contraire la baisse de leur importance relative.

1 - Calculs sans perturbation

La figure 125 présente un calcul multipolaire pour un départ à 10h sur trois cas : réseau à 5 lignes (sans la ligne 6), réseau à 6 lignes, réseau à 6 lignes sans tenir compte des nœuds 40, 41 et 42 (desservis uniquement par la ligne 6).

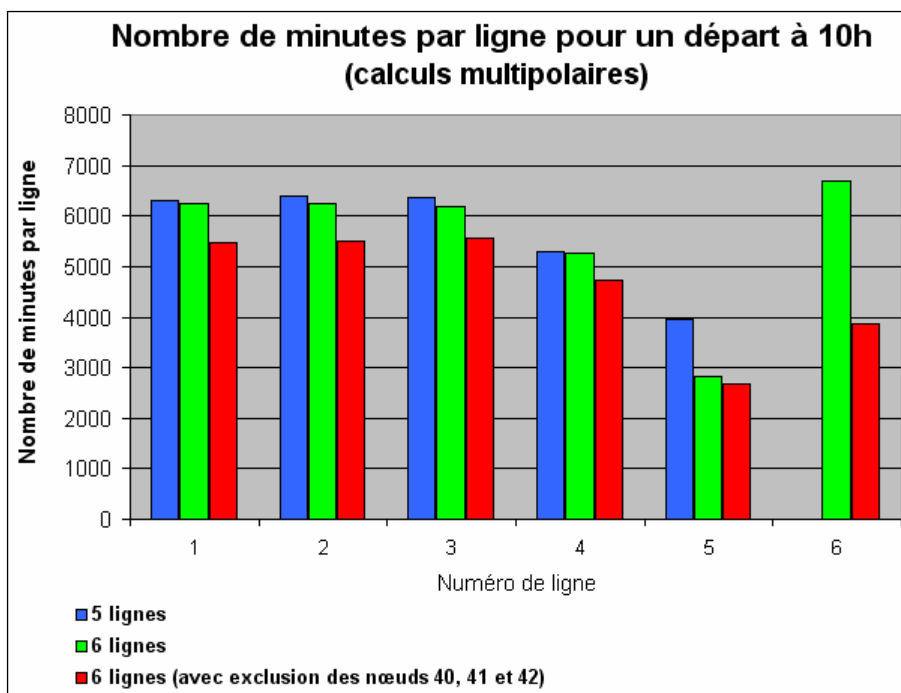


figure 125 Nombre de minutes par ligne pour un départ à 10h (calculs multipolaires)

On observe que le nombre de minutes sur chaque ligne diminue lorsque la ligne 6 est prise en compte. Ainsi, d'un point de vue structurel, l'ajout de cette ligne a pour conséquence de diminuer l'utilisation potentielle des 5 lignes (baisse d'un des facteurs de vulnérabilité).

La prise en compte des nœuds uniquement desservis par la ligne 6 (nœuds 40, 41 et 42) a par ailleurs tendance à conférer une plus grande importance à celle-ci. Nous ne les prendrons pas en compte pour les calculs avec perturbation. Gardons néanmoins à l'esprit que les résultats allant dans le sens d'un rôle important de cette ligne seraient encore renforcés si ces nœuds étaient pris en compte.

2 - Calculs avec perturbation

Nous effectuons des calculs multipolaires en considérant la perturbation suivante : interruption des lignes 1 et 4 entre les nœuds 26 et 10 (tronçon commun aux deux lignes) dans les deux sens de circulation.

Pour les calculs, nous excluons le nœud 23, qui est déconnecté suite à cette perturbation. Pour les calculs avec 6 lignes, nous excluons les nœuds 40, 41 et 42, afin de comparer les situations avec le même nombre de nœuds. Les calculs sont effectués pour toutes les minutes entre 9h et 10h. La figure 126 présente les résultats issus de ces calculs.

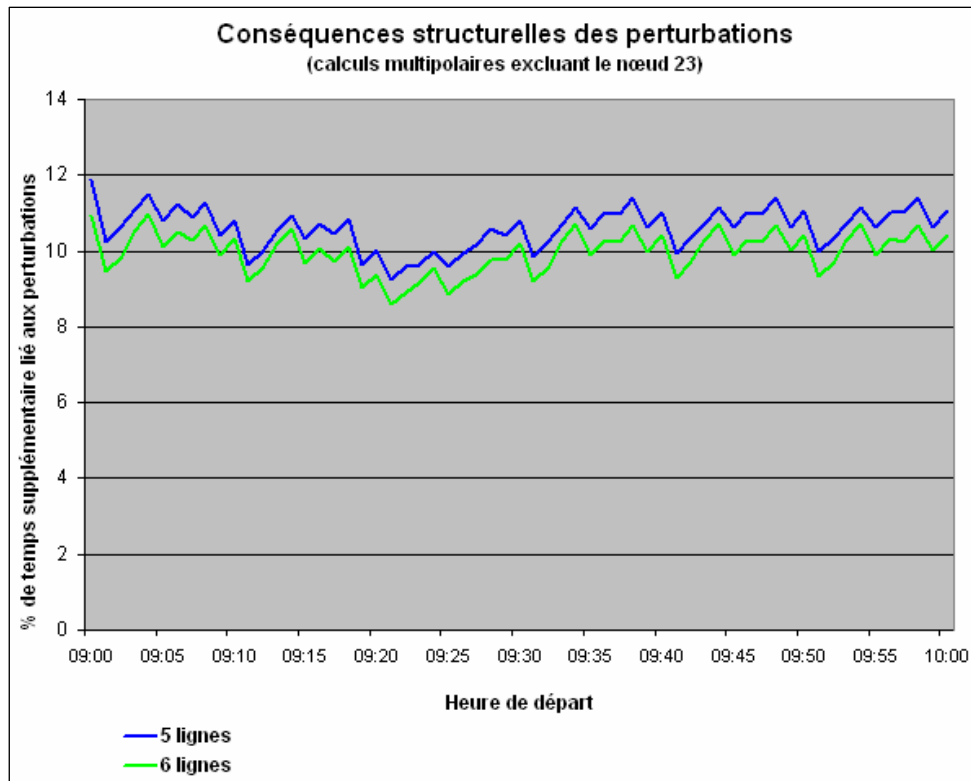


figure 126 *Conséquences structurelles des perturbations (calculs multipolaires avec exclusion du nœud 23)*

Le pourcentage de temps supplémentaire lié aux perturbations est plus important pour le réseau à 5 lignes, comparativement à celui à 6 lignes. Néanmoins, la différence est faible (moyenne de 10,61 % contre 9,98 %).

La *figure 127*, présentant le nombre de minutes par ligne pour un départ à 9h, donne des éléments d'explication. En effet, on remarque que la perturbation entraîne un report des plus courts chemins sur les lignes 5 et 6. Ce sont donc logiquement les deux rocadés qui sont susceptibles de devoir absorber la charge maximum. La ligne 2 voit également son volume augmenter mais de manière très légère.

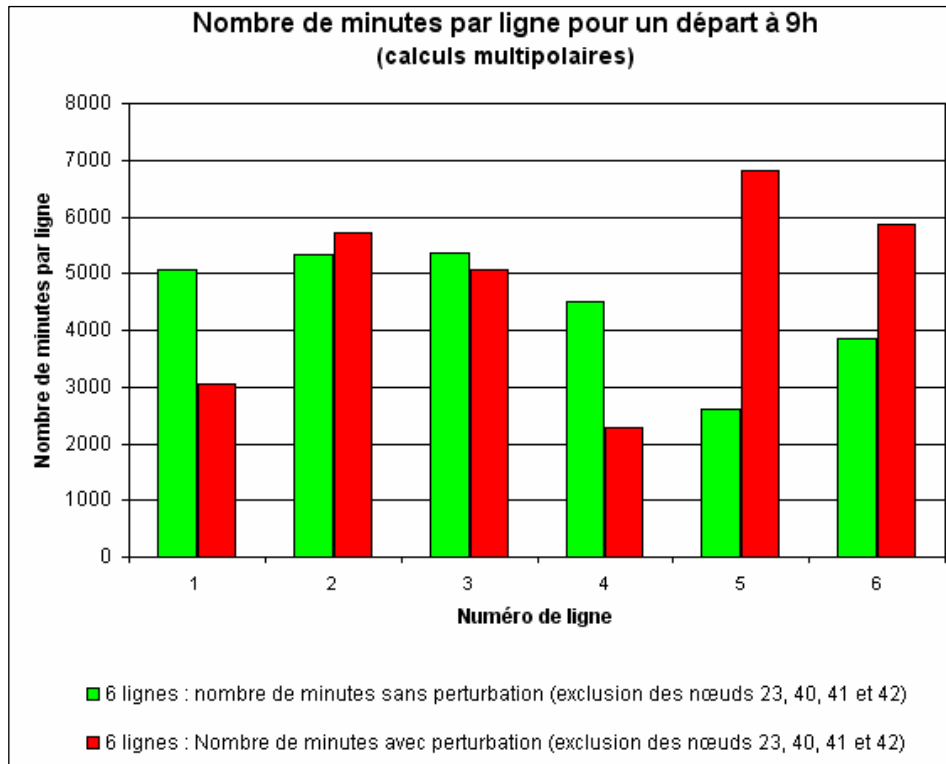


figure 127 Nombre de minutes par ligne pour un départ à 9h (calculs multipolaires)

C- Simulations avec offre et demande

Afin d'illustrer nos résultats obtenus à partir des calculs multipolaires, nous avons effectué des simulations où chaque agent effectue un trajet entre deux nœuds, de telle manière qu'il y ait un trajet entre chaque couple. Seules les relations impliquant les nœuds 23, 40 et 41 et 42 ne sont pas pris en compte. Tous les agents partent à 9h. Les perturbations étudiées sont les mêmes : interruptions de circulations entre les nœuds 26 et 10 sur les lignes 1 et 4.

Les vidéos suivantes présentent les résultats :

- **RES2-1** : pas de perturbation et pas de ligne 6 ;
- **RES2-2** : perturbations et pas de ligne 6 ;
- **RES2-3** : pas de perturbation et ligne 6 présente ;
- **RES2-4** : perturbations et ligne 6 présente.

On met en évidence le rôle important des rocade lorsque le tronçon central est perturbé. Par exemple, on observe que les flux sur la ligne 5 (rocade intérieure) sont nettement plus importants sur **RES2-2** que sur **RES2-1**. Dans une moindre mesure, les flux sur la ligne 6 (rocade extérieure) sont plus importants sur **RES2-4** que sur **RES2-3**.

D- Simulations avec offre, demande et information

1 - Variation du délai de diffusion de l'information

Le fait de diffuser de l'information rapidement favorise les réorientations en amont des perturbations. Nous considérons ici les mêmes perturbations (interruptions de circulation entre les nœuds 10 et 26 sur les lignes 1 et 4). 11 agents partent à 9h du nœud 32 (en haut à gauche à l'extrémité de la ligne 1) et se dirigent chacun vers un nœud : 24, 10, 22, 39, 17, 35, 42, 3, 29, 36, 38.

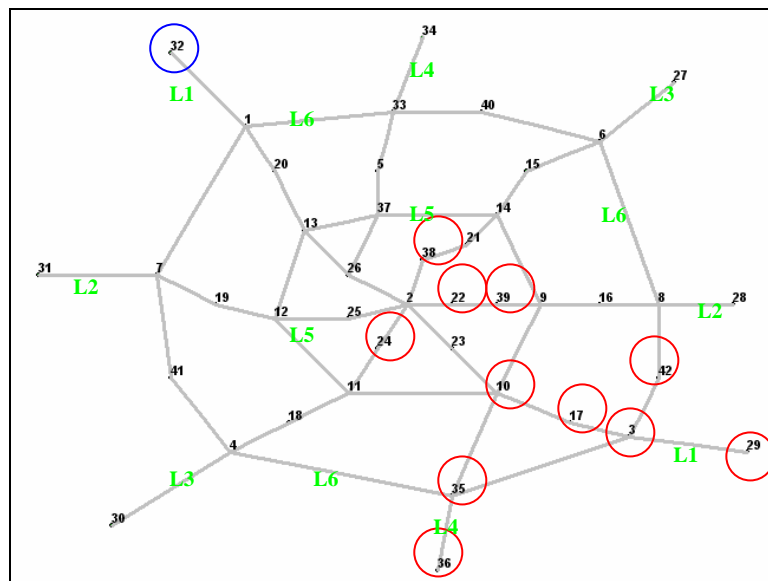


figure 128 Point de départ (en bleu) et destinations des agents (en rouge)

Ils doivent emprunter au cours de leur trajet tout ou partie du tronçon perturbé. Les perturbations débutent à 9h05, lorsque les agents sont dans un véhicule entre les nœuds 32 et 1. L'information est diffusée dans les véhicules, dans un délai plus ou moins court.

La figure 129 présente le temps de parcours moyen des agents en fonction du délai de diffusion de l'information, celle-ci étant diffusée dans tous les véhicules.

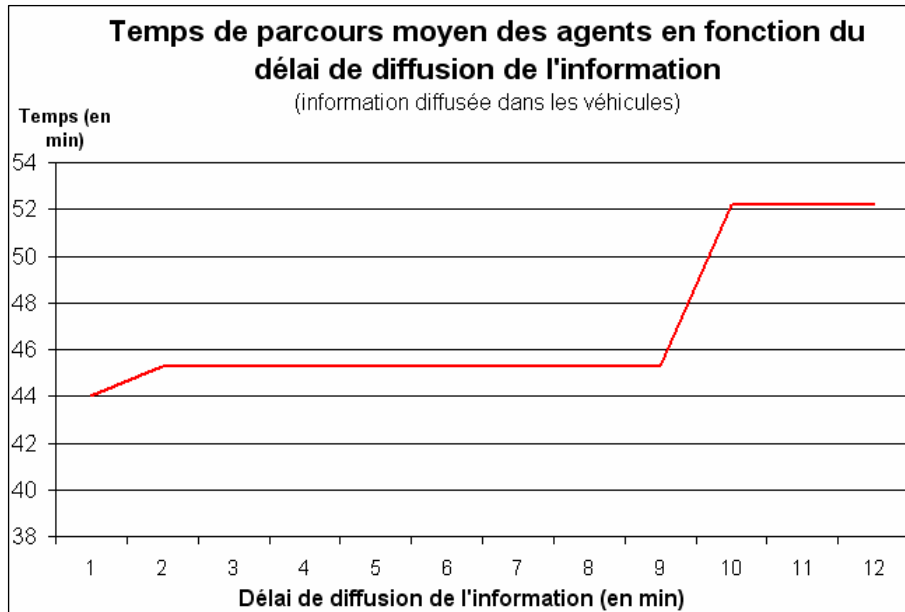


figure 129 Temps de parcours moyen en fonction du délai de diffusion de l'information (information diffusée dans les véhicules)

Les augmentations de temps de parcours entre les délais de 1 à 2 minutes et 9 à 10 minutes sont liées à la présence des rocade. Si l'information est diffusée très rapidement, quelques agents peuvent se réorienter dès la rocade extérieure (ligne 6). Si elle est diffusée avant un délai de 10 minutes après le début de la perturbation, d'autres agents se réorientent sur la rocade intérieure (ligne 5). A partir de 11 minutes, ils vont jusqu'au tronçon perturbé et doivent ensuite faire demi-tour avant de rejoindre leur destination finale.

Les vidéos suivantes présentent quelques simulations :

- **RES2-5** : absence de perturbation ;
- **RES2-6** : perturbations. Délai de diffusion de l'information : 1 minute ;
- **RES2-7** : perturbations. Délai de diffusion de l'information : 8 minutes ;
- **RES2-8** : perturbations. Délai de diffusion de l'information : 12 minutes.

La figure 130 présente les différences des temps de parcours pour chaque agent en fonction du délai de diffusion de l'information. La différence la plus importante est surtout entre les délais 8 et 12 minutes. Si l'information est diffusée au bout d'1 minute, seuls 3 agents se réorientent sur la rocade extérieure. De plus, on peut remarquer que pour certains agents, il n'y a pas de différence entre les délais de diffusion 8 et 12 minutes (ex : agent se dirigeant vers le nœud 3), ce qui peut sembler surprenant. Ces agents arrivent en réalité à la même heure. Néanmoins, si l'information est diffusée rapidement, leur nombre de correspondances est moins important et leur trajet de meilleure qualité.

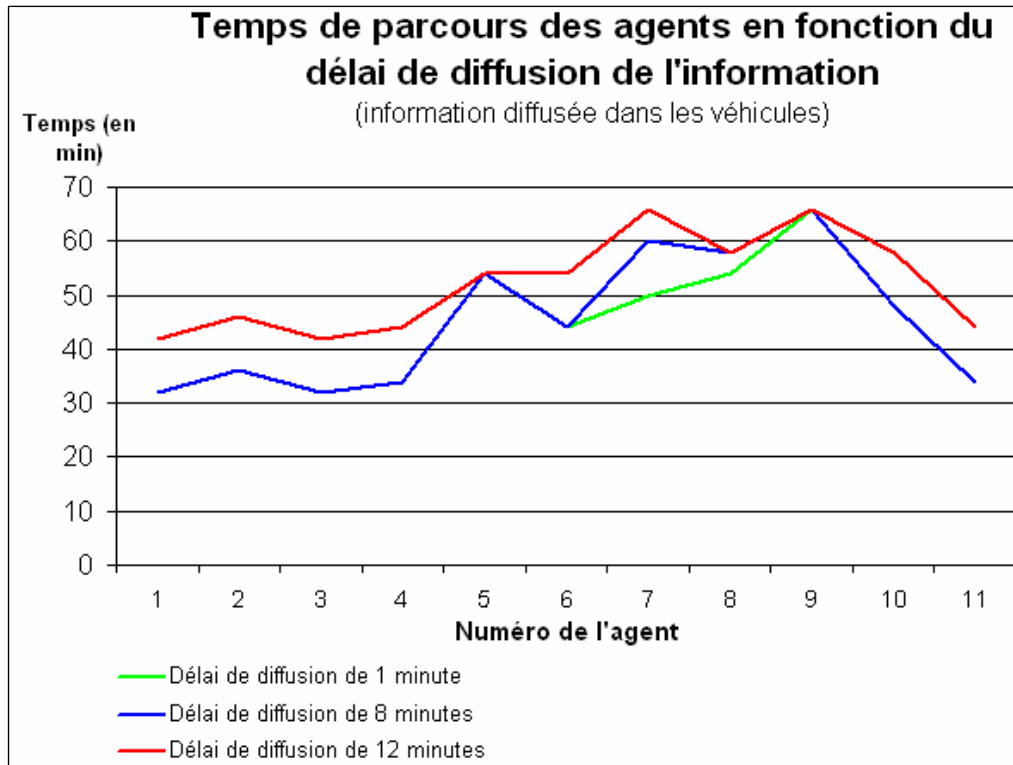


figure 130 Temps de parcours des agents en fonction du délai de diffusion de l'information (information diffusée dans les véhicules)

On peut à nouveau remarquer à quel point il est nécessaire de coupler des analyses sur des valeurs moyennes et sur des valeurs par agent. Il s'agissait d'un des objectifs définis pour le développement de PERTURB.

2 - Diffusion de l'information sur les lignes perturbées ou sur tout le réseau

Le fait de diffuser de l'information sur toutes les lignes du réseau favorise également les réorientations en amont des perturbations.

Nous allons faire varier ce paramètre au cours des simulations suivantes. Nous considérons 12 agents. 6 d'entre eux partent du nœud 27 situé en haut à droite à l'extrémité de la ligne 3 et 6 partent du nœud 6. Ils se dirigent vers les nœuds 10, 17, 3, 29, 35 et 36. Leur heure de départ est 9h (cela peut être quelques minutes plus tard en fonction des heures de circulation des véhicules).

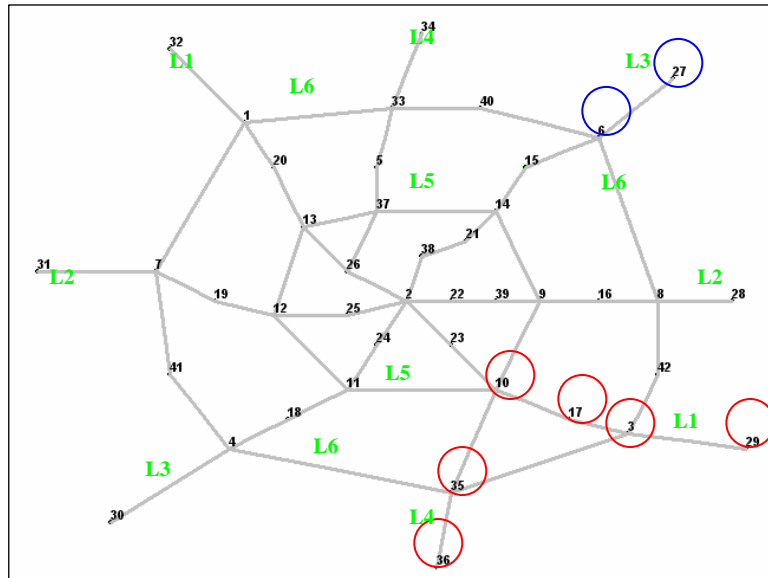


figure 131 Points de départ (en bleu) et destinations des agents (en rouge)

Les perturbations sont identiques aux simulations précédentes : interruptions des lignes 1 et 4 entre les nœuds 26 et 10 à partir de 9h05. L'information est diffusée dans un délai de 1 minute et est accessible dans les véhicules.

Nous faisons 6 simulations :

- Non prise en compte de la ligne 6 (rocade extérieure) :
 - Pas de perturbation. **Vidéo RES2-9.**
 - Perturbations. Information diffusée uniquement sur les lignes perturbées. **Vidéo RES2-10.**
 - Perturbations. Information diffusée sur toutes les lignes. **Vidéo RES2-11.**
- Prise en compte de la ligne 6
 - Pas de perturbation. **Vidéo RES2 -12.**
 - Perturbations. Information diffusée uniquement sur les lignes perturbées. **Vidéo RES2-13.**
 - Perturbations. Information diffusée sur toutes les lignes. **Vidéo RES2-14.**

Les animations vidéos montrent que le fait de ne pas diffuser l'information sur toutes les lignes entraîne la chose suivante : les agents descendent au nœud 2 (nœud central) pour prendre leur correspondance avec la ligne 1. C'est à ce moment qu'ils sont informés de la perturbation. Ils attendent alors un nouveau véhicule de la ligne 3 (10 minutes plus tard) pour continuer leur trajet.

Lorsque la ligne 6 est prise en compte, on constate que certains agents, même en absence de perturbation ne choisissent pas un trajet passant par le tronçon perturbé. Les pertes de temps liées aux perturbations sont donc déjà réduites de cette manière. De plus, dans le

cas où l'information est diffusée sur toutes les lignes, un agent se réoriente pour emprunter cette ligne.

La *figure 132* présente une synthèse de ces simulations. De manière logique, le temps de parcours moyen avec perturbation est :

- le plus faible lorsque la ligne 6 est prise en compte et que l'information est diffusée sur toutes les lignes,
- le plus élevé lorsque la ligne 6 n'est pas pris en compte et que l'information est diffusée uniquement sur la ligne perturbée.

L'écart est significatif : 18 minutes.

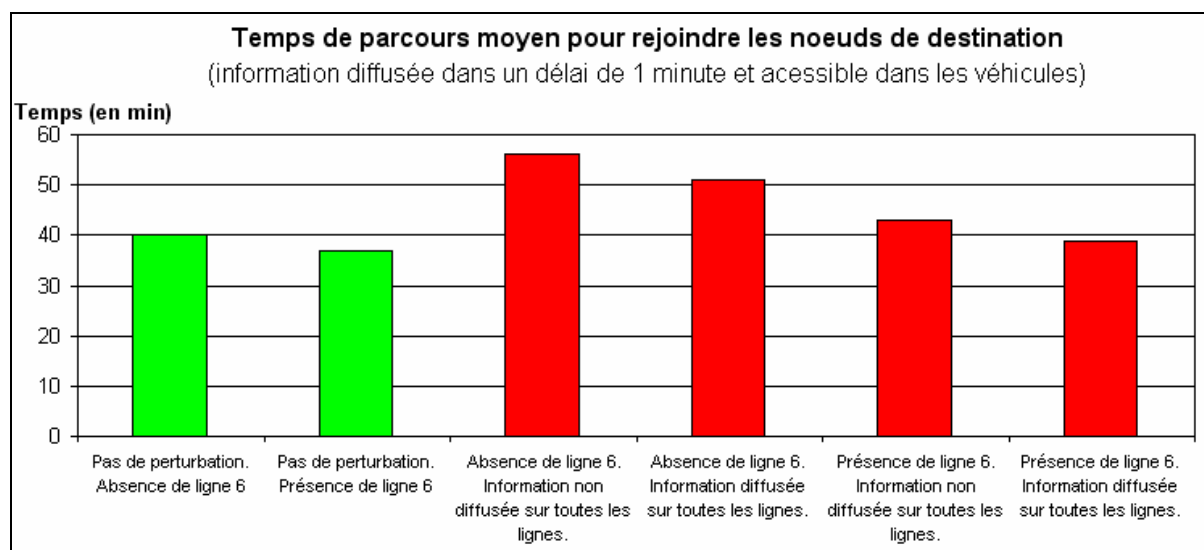


figure 132 Durée moyenne pour rejoindre les nœuds de destination (information diffusée dans un délai de 1 minute et accessible dans les véhicules)

E- Simulations avec offre, demande, information et capacité

Nous considérons la situation suivante. En plus des agents des simulations précédentes (partant des nœuds 32, 6 et 27), nous considérons 28 agents supplémentaires. Ils partent à 9h10 ou 9h15 selon les cas des nœuds 34, 33, 5 et 37. Ils se dirigent vers les nœuds 23,10, 17, 3, 29, 35 et 36. On considère une situation sans ligne 6 (rocade extérieure).

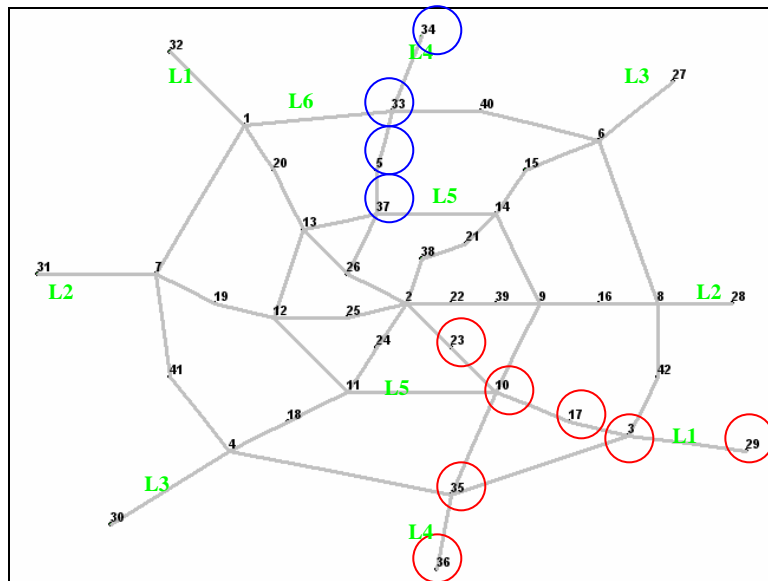


figure 133 Points de départ (en bleu) et destinations (en rouge) des nouveaux agents

La vidéo **RES2-15** présente leur cheminement en l'absence de perturbation. Ils empruntent tous le même véhicule (ligne 4). Celui-ci se remplit au fur et à mesure que le véhicule se dirige vers le centre. Certains agents descendent ensuite au nœud 23 (destination finale). D'autres descendent au nœud 10 pour une correspondance avec la ligne 1 ou continuent sur la même ligne.

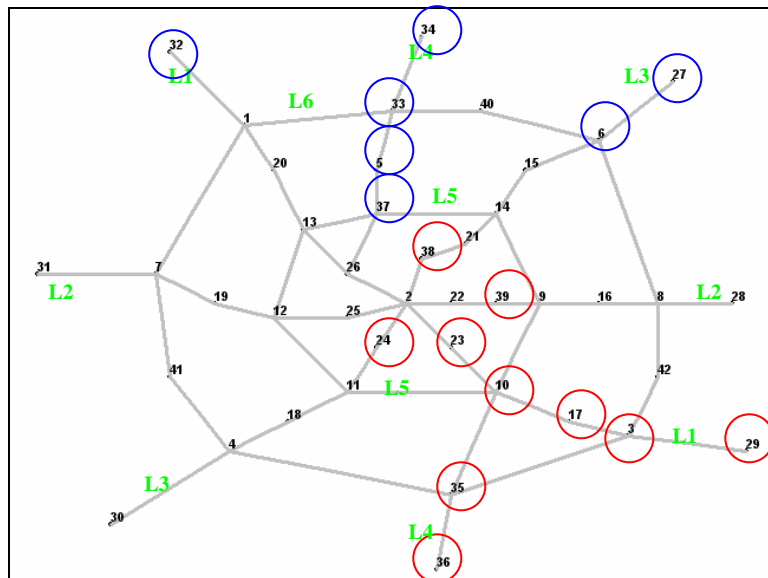


figure 134 Points de départ (en bleu) et destinations (en rouge) de l'ensemble des agents

La vidéo **RES2-16** présente les flux avec l'ensemble des agents, en l'absence de perturbation. On observe que les nouveaux agents arrivent plus tard au centre du réseau. Ceci va avoir des conséquences lors des simulations avec perturbation...

La perturbation étudiée est maintenant la suivante : entre les nœuds 26 et 10, seule la ligne 1 est interrompue. La ligne 4 continue de fonctionner normalement. Les véhicules de la ligne 4 ont une capacité de 30 places.

4 simulations sont réalisées :

- Non prise en compte des contraintes de capacité
 - information diffusée dans un délai de 1 minute, accessible dans les véhicules et *sur toutes les lignes* (vidéo **RES-2-17**),
 - information diffusée dans un délai de 1 minute, accessible dans les véhicules et *uniquement sur la ligne 1* (vidéo **RES2-18**).

- Prise en compte des contraintes de capacité
 - information diffusée dans un délai de 1 minute, accessible dans les véhicules et *sur toutes les lignes* (vidéo **RES-2-19**),
 - information diffusée dans un délai de 1 minute, accessible dans les véhicules et *uniquement sur la ligne 1* (vidéo **RES-2-20**).

Le *tableau 23* présente de manière synthétique les résultats obtenus.

	Absence de perturbation	Pas de contraintes de capacité et information diffusée sur toutes les lignes.	Pas de contraintes de capacité et information diffusée uniquement sur la ligne 1.	Contraintes de capacité et information diffusée sur toutes les lignes.	Contraintes de capacité et information diffusée uniquement sur la ligne 1.
Durée moyenne par agent (en min)	38,2	47,7	47,7	48,6	50,9

tableau 23 Durée moyenne par agent pour atteindre leur destination finale

Les écarts en valeur moyenne sont faibles car 28 agents (ceux de la ligne 4) ne sont pas concernés par la perturbation. D'autres combrent leur retard grâce à une correspondance. C'est pourquoi on n'observe pas de différence, en l'absence de contraintes de capacité, entre une la simulation avec diffusion de l'information sur toutes les lignes et celle avec diffusion uniquement sur la ligne 1.

L'écart le plus intéressant à commenter correspond aux différences entre simulations avec contraintes de capacité. Lorsque celles-ci sont prises en compte, les temps de parcours de certains agents sont rallongés, notamment lorsque l'information est diffusée uniquement sur la

ligne perturbée. Ceci est en grande partie lié aux agents de la ligne 3 (partant des nœuds 6 et 27). Ils descendent prendre leur correspondance avec la ligne 1 au nœud 2 (voir dans la sous-section précédente). Cette ligne ne fonctionnant plus, ils doivent emprunter la ligne 4 mais le premier véhicule qui arrive est déjà plein. Certains agents venant de la ligne 1 doivent également attendre le deuxième véhicule. Ceci peut être observé sur l'animation vidéo **RES2-20** (en comparaison avec l'animation vidéo **RES2-19**). Ainsi, la ligne 4, même si elle est redondante avec la ligne 1 sur le tronçon central, absorbe difficilement la charge supplémentaire induite par les agents de la ligne 1.

La *figure 135* présente de manière désagrégée (par agent) les résultats obtenus avec prise en compte des contraintes de capacité. Les valeurs des durées par agent sont placées sur les rayons du cercle. A partir de l'agent 23, les agents ne sont pas impactés par la perturbation. Il s'agit des agents de la ligne 4. On visualise les quelques agents dont le temps de parcours est péjoré si l'information n'est pas diffusée sur toutes les lignes.

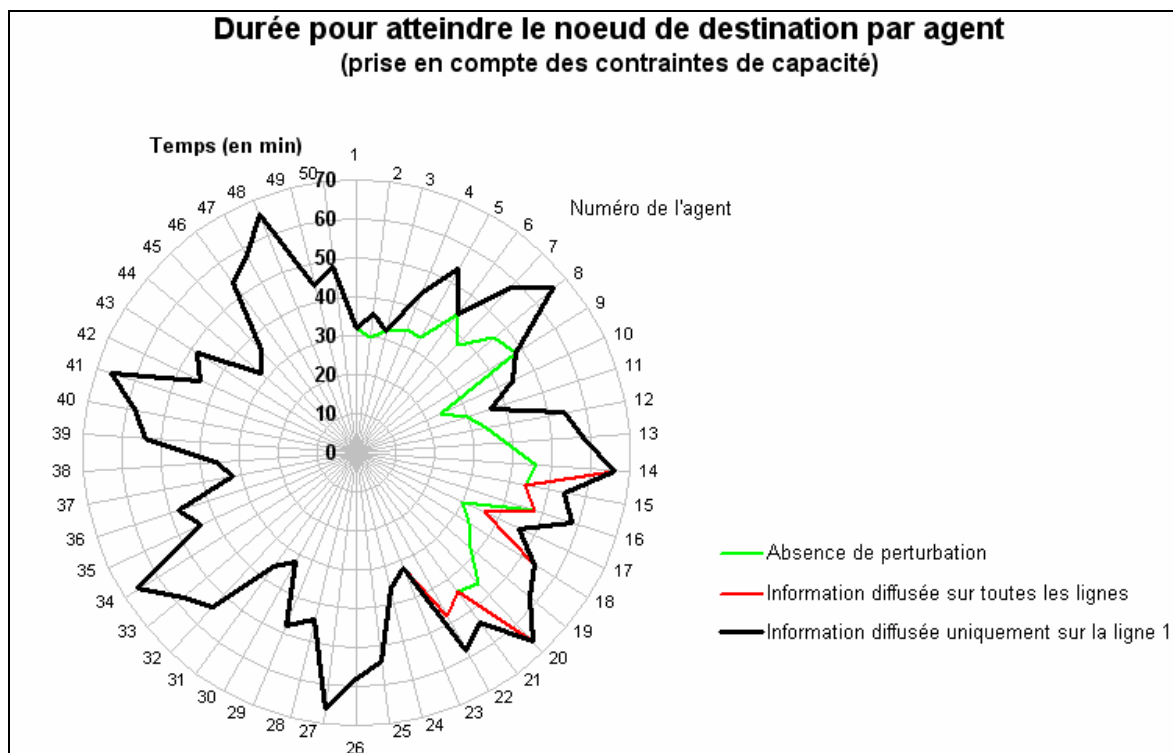


figure 135 Durée pour atteindre le nœud de destination par agent (prise en compte des contraintes de capacités)

Le graphique de la *figure 136* met en évidence ce phénomène en présentant la charge de deux véhicules de la ligne 4 au cours de leur trajet (dans le cas où l'information n'est pas diffusée sur toutes les lignes). Le véhicule 193 est celui partant à 9h10 du nœud 34. Il se remplit progressivement. Arrivé au nœud 26, les deux derniers agents pouvant monter le font. Ensuite au nœud 2, d'autres agents ne peuvent pas monter. Le véhicule 194 circule 10 minutes après le véhicule 193 et est vide. Aux nœuds 26 et 2, il prend les agents n'ayant pas pu monter dans

le véhicule précédent. Les agents concernés ont donc perdu 10 minutes comparativement à une situation où il n'y aurait pas de contraintes de capacité.

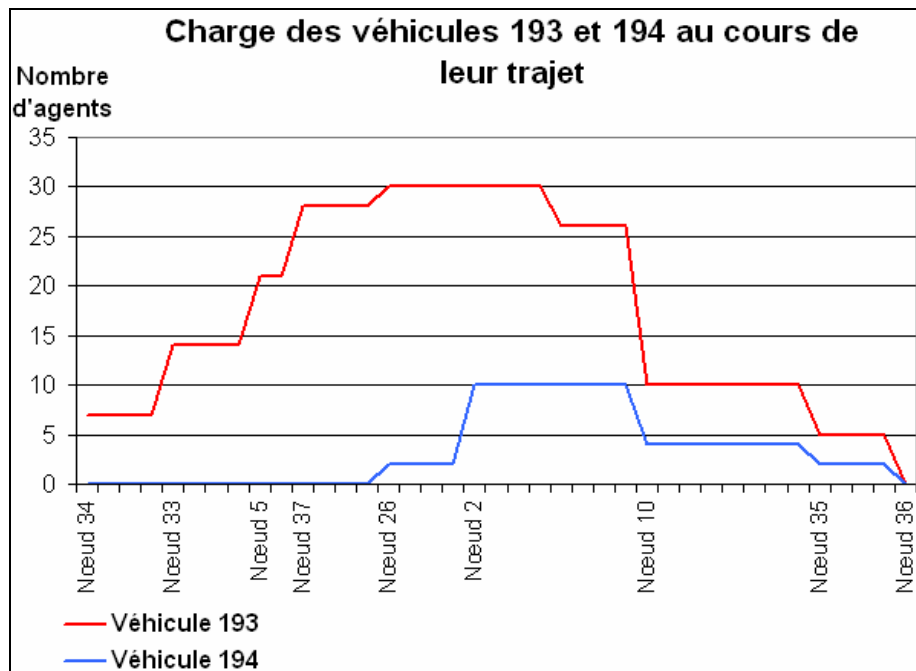


figure 136 Charges des véhicules 193 et 194 au cours de leur trajet

Cet exemple très simplifié montre que les redondances dans les réseaux de transports en commun ne peuvent être efficaces qu'à condition que les lignes disposent de réserves de capacité suffisantes. Dans le cas présent, contrairement aux simulations effectuées en section 1 dans ce chapitre, l'information diffusée de manière non performante a entraîné une double sanction. Les agents n'ont pas pris l'itinéraire le plus pertinent et se sont en plus retrouvés bloqués, en raison de problèmes de capacité.

Section 3 - Réseau de 100 nœuds de forme arrondie

A- Ouverture sur l'étude de l'encombrement dans les transports collectifs

Afin de compléter nos analyses, nous procédons ici à quelques simulations correspondant à des perturbations d'un autre type que celles que nous avons étudiées jusqu'ici. Il s'agit d'une ouverture sur d'autres analyses possibles en matière de vulnérabilité, non liées aux hypothèses formulées dans le cadre de cette thèse.

En effet, nous nous sommes focalisés au cours de cette recherche sur les perturbations de l'offre de transport et l'analyse des conséquences sur les mises en relations des nœuds et les temps de parcours des voyageurs. Néanmoins, les perturbations peuvent également avoir pour origine une non-adéquation (structurelle ou conjoncturelle) de l'offre de transport à la demande de mobilité.

Il en résulte des problèmes de capacité et une qualité de service dégradée pour les voyageurs. Plusieurs facteurs peuvent être à l'origine de tels phénomènes : grèves¹, événements ponctuels ou augmentation progressive de la demande dans le temps avec des difficultés à augmenter les capacités. Le dernier cas risque de se produire de plus en plus fréquemment dans les réseaux de transports collectifs qui voient leur trafic croître depuis quelques années et pour lesquels les marges de manœuvre sont faibles pour augmenter les capacités.

L'encombrement peut être défini comme un « *effet externe² entre des personnes consommant un même service* », en raison de la rareté de l'espace-temps (Kolm, 1968). Ainsi, la qualité d'un service dépend du nombre de personnes l'utilisant. Il y a un effet de masse : chaque consommation a un effet d'encombrement négligeable mais le grand nombre fait que l'effet global est notable. Il s'agit ici d'un encombrement d'occupation : les agents se disputent l'espace où les services seront rendus. L'effet d'encombrement d'une consommation sur une autre peut faire réagir la demande de cette dernière et conduire ainsi à un équilibre général d'encombrement³.

B- Conception du système de transport

En utilisant *RES*, nous créons tout d'abord un réseau de 100 nœuds avec triangulation de Delaunay. La population totale compte 60 000 agents et la valeur de l'élasticité est de 0,4. Nous avons ainsi une répartition différenciée mais pas trop polarisée. Le nombre maximum d'agents est de 2 365.

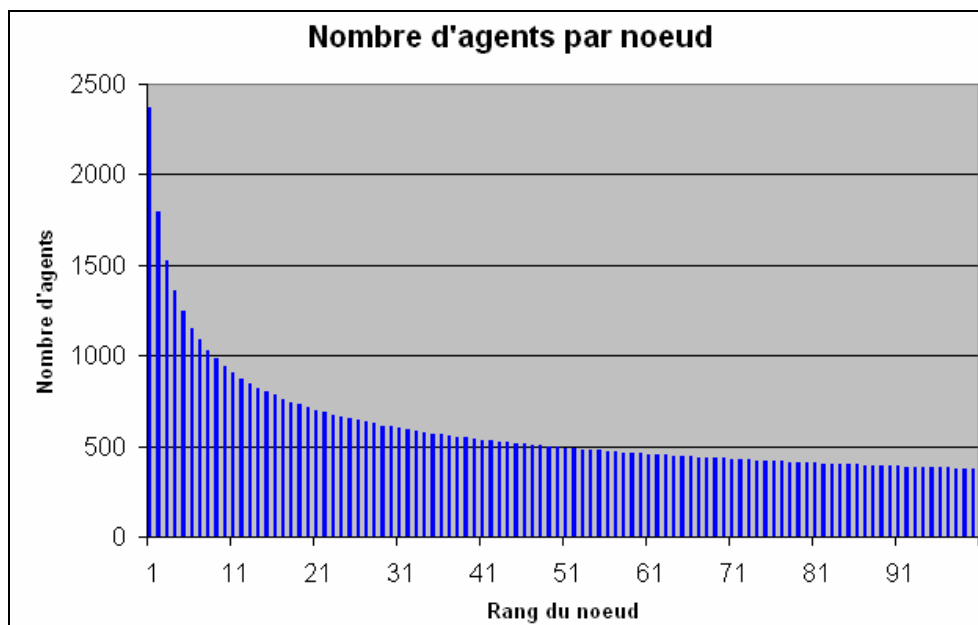


figure 137 Nombre d'agents par nœud

¹ Avec des données suffisamment précises, nous aurions pu faire ce type d'analyse pour notre travail sur les perturbations en Île-de-France.

² « Il y a effet externe d'une personne sur une autre quand une décision de la première concerne la seconde sans que l'acte qui transmet l'influence fasse l'objet d'une entente entre elles » (Kolm, 1968).

³ Lors de mouvements sociaux, le nombre de voyageurs à transporter est moins important car de nombreuses personnes décident de ne pas voyager, en partie parce qu'elles savent qu'elles auront des difficultés à monter dans les véhicules. En situation perturbée inopinée, le nombre de voyageurs à transporter reste le même, ce qui complique encore les choses.

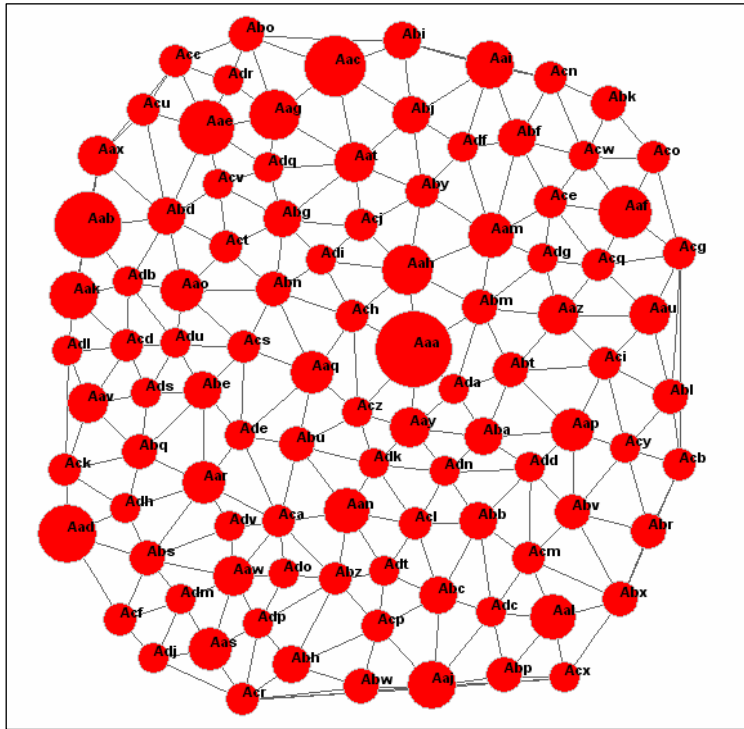


figure 138 *Maillage du réseau et répartition spatiale des agents*

Nous procédons tout d'abord à la suppression des arcs du réseau. Le processus peut être visualisé sur l'animation vidéo **MAILLAGE-3**. Il y a 279 arcs au départ. Nous choisissons de retenir le maillage correspondant à la suppression de 140 arcs. Nous obtenons ainsi le réseau suivant.

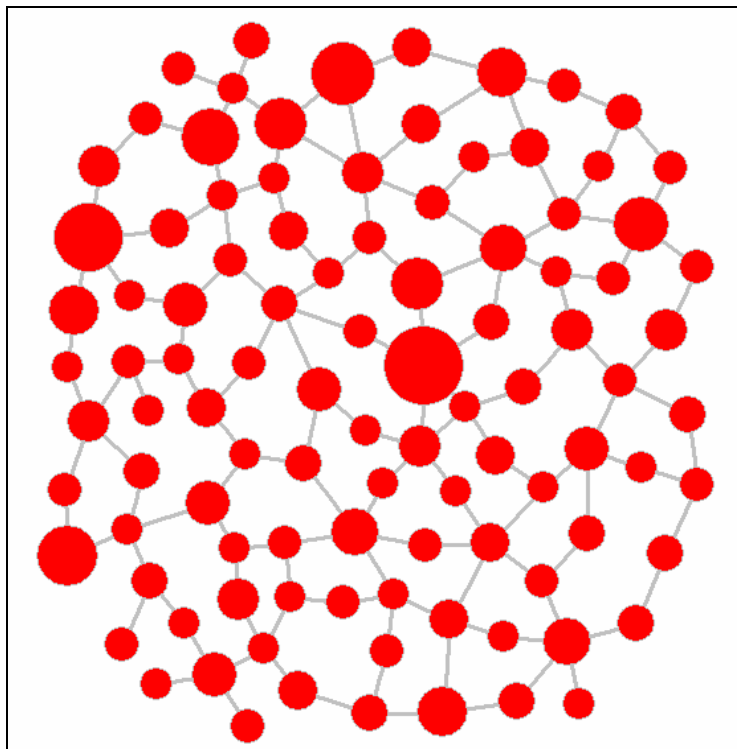


figure 139 *Réseau après 140 suppressions d'arcs*

Nous procédons ensuite à la création des lignes. Les paramètres sont les suivants :

- longueur minimale : 1 arc,
- pas de superposition de lignes sur un même arc,
- plage horaire : de 6h à 12h,
- intervalle de circulations entre deux véhicules : de 5 à 10 minutes (facteur de hiérarchisation pour les fréquences égal à 2),
- temps de parcours minimum entre deux nœuds : 4 minutes.

32 lignes sont ainsi créées. Le processus de création peut être visualisé sur l'animation vidéo **CREAL-3**.

Les agents sont ensuite créés avec l'application *Générationdemande*. Les paramètres sont les suivants : départs toutes les 5 minutes de 7h à 9h. En fonction de la demande existante entre deux nœuds du réseau, le nombre d'agents générés par pas de temps est différent. De plus, le nombre de personnes générés décroît au fur et à mesure. En effet, s'il existe par exemple seulement 5 agents se déplaçant du nœud A au nœud B, ils partiront à 7h, 7h05, 7h10, 7h15 et 7h20. La demande est donc hétérogène dans le temps. Nous verrons par la suite que cela permet de bien mettre en évidence les différences de répartition temporelle en fonction des problèmes de capacité.

Le nombre d'agents générés est de 54 855. En effet, comme nous l'avons expliqué au préalable, nous ne prenons pas en compte les nombres après la virgule (pas de demi-agent !). Ceci n'est pas très pénalisant ici dans la mesure où nous cherchons juste à concevoir ex-nihilo un système avec une offre et une demande de mobilité.

C- Simulations avec différentes capacités de véhicules

Nous effectuons des simulations avec différentes capacités pour les véhicules : 300, 150, 100 et 50 places (il aurait également été possible de faire varier les valeurs selon les lignes). Avec des véhicules de 300 places, il n'y a aucun problème de capacité. La *figure 140* présente le nombre d'agents sur les principales lignes au cours du temps dans cette configuration. On visualise bien le fait que la demande n'est pas distribuée de façon homogène dans le temps. Elle est plus importante au début de la simulation.

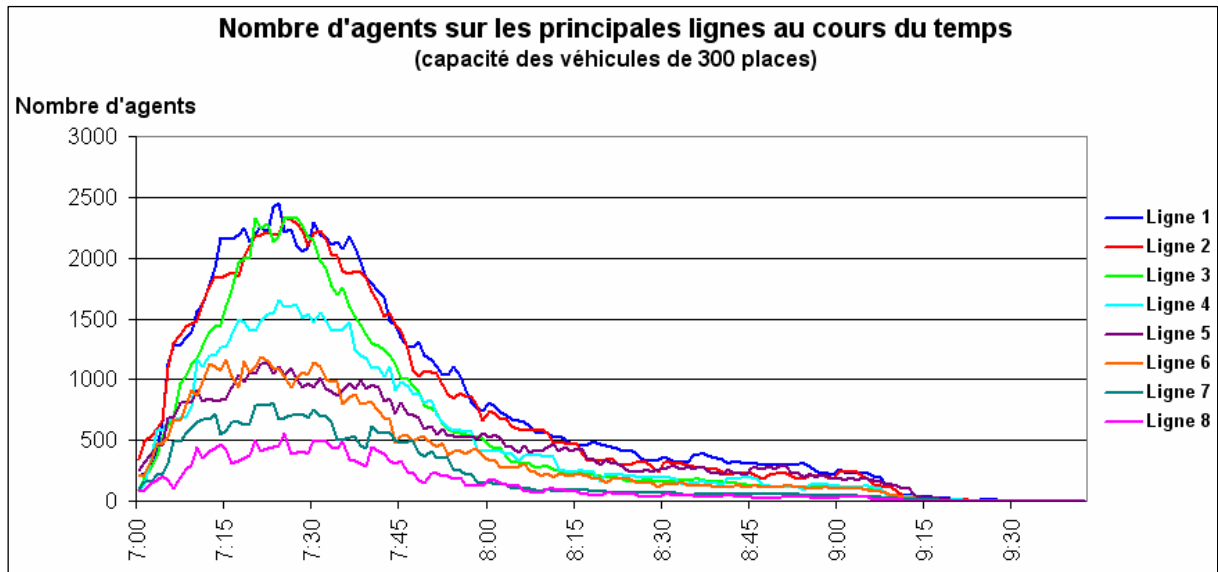


figure 140 Nombre d'agents par ligne au cours du temps sur les principales lignes

Lorsque l'on diminue la capacité, certains agents voient leur temps de parcours augmenter en raison de la congestion. Cela prend des proportions importantes dans le cas où la capacité n'est que de 50 places : 706 000 minutes, soit plus de 13 minutes en moyenne par agent (et un maximum de plus de 2h). L'offre n'est alors pas du tout adaptée à la demande.

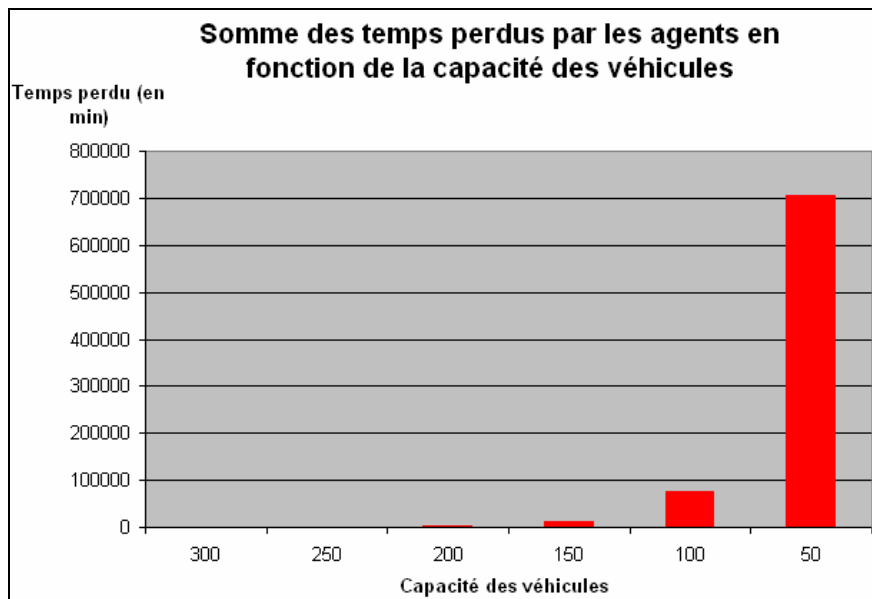


figure 141 Somme des temps perdus par es agents en fonction de la capacité des véhicules

Les animations vidéos présentent les cheminements des agents :

- **RES3-1** : capacité de 300 places,
- **RES3-2** : capacité de 150 places,
- **RES3-3** : capacité de 100 places,
- **RES3-4** : capacité de 50 places.

Elles montrent que plus les contraintes de capacité sont élevées, plus les nœuds sont chargés. Ceci est également mis en évidence sur la *figure 142*.

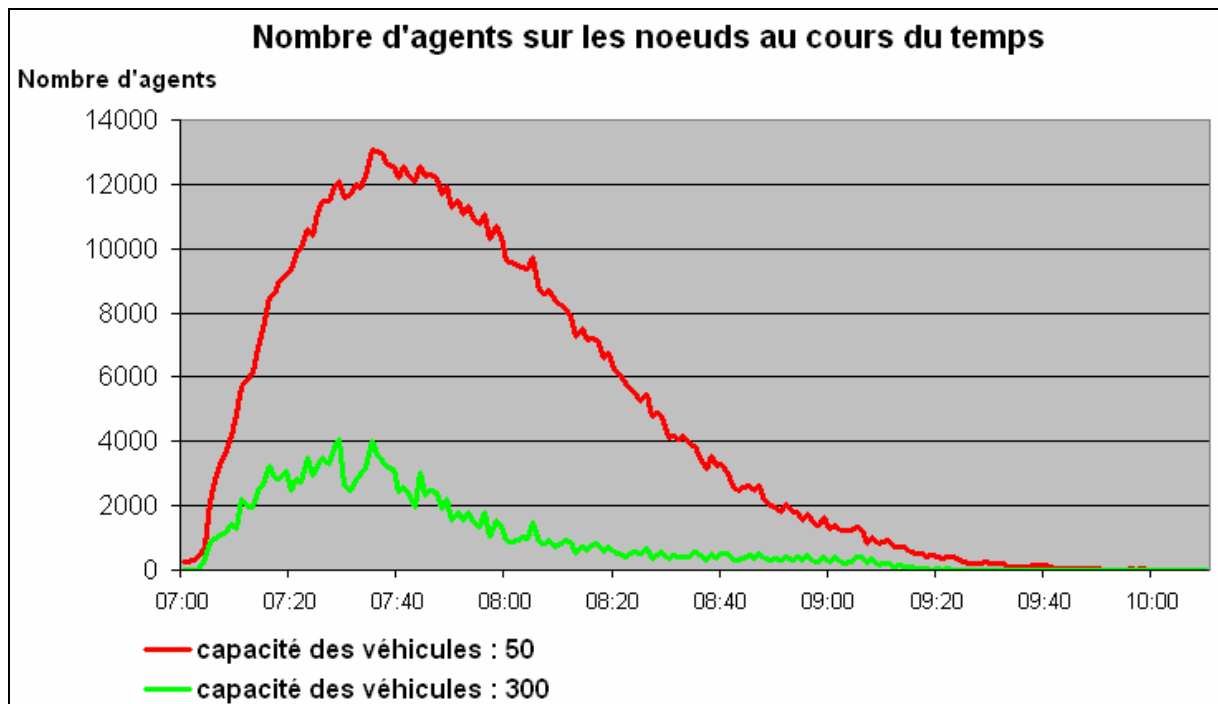


figure 142 Nombre d'agents sur les nœuds au cours du temps

On peut alors penser aux images généralement associés aux grèves : des quais vides (lorsqu'aucun train ou métro de circule) ou surchargés car il est difficile de trouver des places et de quitter les gares ou stations.

Par ailleurs, outre les temps perdus par les voyageurs, ils subissent des dégradations du confort de leur voyage. Par ailleurs, les fortes affluences peuvent également entraîner des retards. En effet, si la montée des voyageurs dure plus longtemps que les temps prévus à chaque gare, les trains accumulent des retards qui peuvent rapidement dégrader la situation.

Conclusion

Le travail sur les systèmes théoriques a permis de compléter les analyses faites sur notre terrain d'étude : l'Île-de-France.

Nous avons en particulier montré que des augmentations de maillage pouvaient paradoxalement conduire à des augmentations de la vulnérabilité à certaines perturbations. En effet, si une nouvelle ligne renforce l'importance d'une ligne pré-existante, le système est plus dépendant de cette dernière. Les rocade ont tendance à faire diminuer l'importance des lignes du réseau et auraient ainsi une influence positive sur la diminution de la vulnérabilité (car elles permettent également de trouver plus facilement des itinéraires de contournement).

Les simulations réalisées ont permis de tenir compte des contraintes liées à la capacité des véhicules, que nous n'avons pu faire sur notre terrain d'étude. Nous avons ainsi observé que lorsque les contraintes de capacité sont importantes, l'information, si elle est diffusée rapidement et en tous lieux, peut entraîner des pertes de temps pour certains voyageurs en raison de reports trop massifs des flux (car chaque agent prend sa décision sans prendre en compte celle des autres). Dans d'autres situations, une information diffusée de manière moins large ou moins rapidement peut amener les agents à ne pas se réorienter en amont et se trouver en plus confrontés à des problèmes de capacité lorsqu'ils arrivent à proximité du tronçon perturbé.

Nous avons également fait quelques simulations non liées directement à nos hypothèses, en considérant des situations où l'offre ne répond pas à la demande de mobilité car la capacité n'est pas suffisante. Les agents subissent alors des perturbations liées à la non-adéquation de l'offre de transport avec la demande. Leur temps de parcours réel est supérieur au temps théorique car ils doivent attendre plus longtemps avant de monter dans un véhicule. Au-delà du temps de parcours, des critères plus qualitatifs (ex : confort) pourraient être intégrés.

Les simulations faites ici dans une perspective heuristique montrent que de nombreuses applications sont possibles. La génération de systèmes théoriques de transport peut faciliter le test d'hypothèses dans des cadres différents du nôtre en enlevant les contraintes liées au travail sur un terrain d'étude déterminé. Elle permet plus facilement un travail exploratoire visant à produire des résultats qu'il est dans un premier temps préférable ne pas rattacher à un terrain d'étude pour éviter les mauvaises interprétations.

CONCLUSION

En utilisant le modèle PERTURB avec en entrée des données sur l'Île-de-France ou des systèmes théoriques de transport, nous avons effectué des calculs et simulations afin de faire des analyses multi-niveaux : réseau, arcs, nœuds, lignes, agents et véhicules. Nous avons également travaillé sur différentes temporalités (matinée, journée, calculs à une date précise, plage horaire de simulation). Plusieurs scénarii de perturbations, plus ou moins graves, ont été étudiés.

Les analyses de vulnérabilité structurelle et fonctionnelle ont ainsi été faites à plusieurs niveaux sur le plan spatial et temporel : ceci constitue un des apports les plus importants de ce travail. En effet, c'est par la possibilité d'effectuer plusieurs mesures, à différentes échelles, que l'on est en mesure de mieux comprendre les conséquences de perturbations et le rôle de régulation de certaines actions (ici l'information des voyageurs).

En raison de la quantité importante de données pouvant être obtenues en sortie de PERTURB, il serait possible d'étudier plus en profondeur chacun des scénarii retenus. Néanmoins, le but principal est ici d'être en capacité d'apporter les éléments permettant une discussion des sept hypothèses définies à la fin de la Partie I.

Discussion des hypothèses

➤ Champ de la vulnérabilité structurelle

H1. Une augmentation du maillage permet de diminuer la vulnérabilité structurelle à des perturbations.

Les calculs multipolaires effectués sur trois scénarii de perturbation en Île-de-France ont montré l'importance du maillage. On a ainsi pu observer que les conséquences en zone peu maillée sont plus « extrêmes » : nœuds du réseau déconnectés et temps moyens supplémentaires élevés sur les relations perturbées. Néanmoins, il faut également tenir compte du nombre de relations concernées par une perturbation, qui peut être très élevé en zone centrale maillée.

Nous avons également mis en évidence l'influence de la mise en place de nouvelles lignes sur les connexions des nœuds du réseau. Les conséquences de celles-ci peuvent être presque nulles en situation normale mais être importantes en situation perturbée (par augmentation de la redondance partielle) en limitant les temps de parcours supplémentaires.

Néanmoins, les calculs multipolaires effectués sur les réseaux théoriques ont montré qu'une augmentation du maillage pouvait entraîner paradoxalement une augmentation de la vulnérabilité structurelle à certaines perturbations. En effet, l'ajout de lignes entraînant un renforcement d'autres lignes contribue à augmenter l'importance relative de ces dernières. Par conséquent, les conséquences de leurs dysfonctionnements (mesurées en comparaison avec une situation normale) peuvent être plus fortes. Néanmoins, elles entraînent probablement une baisse des conséquences négatives liées à d'autres perturbations. Chaque mesure de vulnérabilité est unique et correspond à une situation bien particulière. Le travail réalisé sur les roades semble montrer que celles-ci diminuent l'importance des autres lignes du réseau et ont ainsi une influence positive sur la baisse de la vulnérabilité.

Cette hypothèse n'est pas complètement validée. Il existe des liens entre le maillage et la vulnérabilité structurelle mais ceux-ci doivent être approfondis car les relations ne sont pas aussi évidentes que ce que l'on pourrait penser de manière intuitive.

H2 : Les conséquences des perturbations varient fortement en fonction de la situation des nœuds du réseau : localisation par rapport à la perturbation, nombre de lignes les desservant.

En fonction de la situation par rapport à la perturbation, les relations avec certains nœuds peuvent être très, moyennement ou pas perturbées. Au niveau de la gestion des risques (au-delà de la minimisation des conséquences des aléas), il y a donc un vrai enjeu à être éloigné des perturbations les plus récurrentes.

Nous avons par ailleurs montré le rôle spécifique des lignes de contournement pour les relations avec des nœuds importants du réseau (par exemple Pontoise avec trois lignes de trains : ligne J du réseau Paris St-Lazare, ligne H du réseau Paris Nord et RER-C). Les pôles d'échanges sont avantagés car il existe plusieurs possibilités pour s'y rendre ou pour en partir.

Au-delà du nombre de lignes, leurs caractéristiques sont très importantes. Nous l'avons vu dans le cas des calculs unipolaires au départ d'Austerlitz où les durées supplémentaires pour atteindre certains nœuds au nord de la région Île-de-France sont élevées car la ligne les desservant a une fréquence peu élevée.

Ceci signifie qu'un nombre de lignes élevé n'est pas suffisant : les lignes doivent être suffisamment performantes pour pouvoir véritablement jouer un rôle. Le maillage est important mais il faut bien tenir compte du niveau de service offert. Il s'agit d'une spécificité des transports collectifs.

La bonne formulation est ainsi la suivante : les conséquences des perturbations varient fortement en fonction de la situation des nœuds du réseau : situation par rapport à la perturbation, nombre et caractéristiques des lignes les desservant. La redondance doit être spatiale (topologie) et temporelle (fréquence).

H3. Les conséquences structurelles des perturbations varient dans le temps.

Cette hypothèse est largement vérifiée. Nous avons mis en évidence les variations au cours du temps des augmentations de durées nécessaires pour connecter les nœuds du réseau en raison de la structure horaire de l'offre, propre aux transports en commun.

Nous avons ainsi constaté qu'à une minute près, les conséquences peuvent être importantes ou nulles et observé (notamment en cas de mouvement social) des différences entre heures creuses et heures de pointe. Ceci est logique dans la mesure où la demande varie dans le temps et que l'offre est conçue pour y répondre.

Ceci est spécifique aux transports en commun. En effet, les conséquences de perturbations sur la circulation routière ne sont généralement pas variables dans le temps si on ne tient pas compte des phénomènes de congestion (approche fonctionnelle).

Les animations vidéos montrent par ailleurs les possibles variations d'itinéraires au cours du temps.

Les conséquences structurelles des perturbations peuvent donc varier fortement dans le temps.

Un aspect non étudié ici concerne les différences entre les périodes de l'année. Ainsi en été, les fréquences des dessertes sont moins élevées en Île-de-France. Les conséquences des perturbations sont donc nécessairement différentes¹.

H4. Les conséquences d'un mouvement social sont très variables en fonction des ressources disponibles, des priorités de circulation retenues.

Nous avons vérifié cette hypothèse en effectuant des calculs avec trois programmes de grève sur le RER-C. Nous avons ainsi mesuré les différences dans la baisse de performance du réseau, avec prise en compte ou non des autres lignes du réseau. Plus le mouvement social est important, plus les choix de desserte ont tendance à privilégier les périodes de pointe et les axes et nœuds les plus fréquentés. Certaines gares sont moins bien desservies ou pas du tout pendant toute ou partie de la journée. Si une ligne est perturbée, les autres lignes peuvent compenser partiellement les dysfonctionnements induits.

Il serait intéressant de poursuivre ces analyses en considérant un mouvement social affectant l'ensemble du réseau.

¹ Au niveau structurel mais aussi fonctionnel, la demande de déplacement étant moins importante. C'est la raison pour laquelle des travaux de grande ampleur sont souvent programmés à cette période (ex : travaux Castor sur le RER-C).

➤ **Champ de la vulnérabilité fonctionnelle**

H5. Les conséquences de la diffusion d'information aux voyageurs sont fortement liées au maillage du réseau et à la structure horaire des axes constitutifs du réseau.

Les simulations de flux de voyageurs effectuées sur l'Île-de-France et sur les systèmes théoriques de transport permettent de valider cette hypothèse. En effet, en fonction de la présence d'une ligne de contournement de la perturbation, de ses horaires, l'information a un rôle potentiel plus ou moins important, plus ou moins décisif. Dans certains cas, l'information permet aux voyageurs de se réorienter mais dans d'autres situations cela n'est pas le cas car l'offre alternative ne ferait pas gagner de temps. Le rôle potentiel de l'information est ainsi directement lié aux caractéristiques de l'offre de transport et au contexte dans lequel se trouve le voyageur.

Par conséquent, il est très difficile d'évaluer les effets des paramètres relatifs à l'information des voyageurs tant il est lié à ces deux critères et à la caractéristique de la perturbation.

Globalement, la sensibilité liée à ces paramètres est très variable d'une situation à l'autre.

H6. L'information des voyageurs leur permet d'optimiser leurs trajets grâce à une connaissance des dysfonctionnements du réseau et une adaptation de leur comportement.

Les éléments de réponse à l'hypothèse H5 trouvent une résonance ici. L'influence de l'information des voyageurs est liée à des critères dépendant de l'offre de transport et est par conséquent très variable. Néanmoins, l'information a potentiellement un rôle important. On a observé à quel point le cheminement des voyageurs peut être modifié (et des minutes gagnées) grâce à une diffusion performante d'information (rapidement et en tous lieux). Mais outre les critères évoqués, cela dépend également de la capacité des itinéraires de contournement....

H7. Les problèmes de capacité des itinéraires de substitution peuvent fortement diminuer le rôle de la diffusion d'information, voire annuler les effets positifs.

Les travaux sur les systèmes théoriques de transport ont mis en évidence l'importance de la prise en compte des contraintes de capacité. En raison de problèmes de capacité, certains voyageurs peuvent voir leurs conditions de déplacement dégradées s'ils se réorientent « grâce » à l'information diffusée, même si celle-ci peut leur être parfois très utile.

Il est donc possible de valider cette hypothèse et même d'aller plus loin. Les problèmes de capacité peuvent avoir pour conséquence le fait qu'une information rapide et transparente dégrade les conditions de trajet pour une partie des voyageurs. Nous avons indiqué que la redondance devait être spatiale et temporelle. Elle doit également être attributive (avoir un nombre de places suffisant).

La prise en compte des contraintes de capacité induit une concurrence entre les voyageurs pour l'accès aux véhicules. Par conséquent, l'Intérêt Général (qui pourrait ici être la

minimisation globale des temps de parcours sur le réseau, recherché par l'opérateur) n'est plus égal à la somme des intérêts individuels. L'information permet à certains voyageurs d'optimiser leur trajet. Mais elle peut également le dégrader (temps de parcours plus élevé qu'en absence d'information). L'information peut donc être bénéfique ou au contraire néfaste pour le voyageur.

L'accroissement des rationalités individuelles des agents peut aboutir à une solution globale non optimale (temps de parcours global sur le réseau plus élevé). En effet, les voyageurs ne sont pas asservis au système. Leur but n'est pas que celui-ci fonctionne bien mais d'atteindre leur propre objectif (dans notre cas : arriver le plus rapidement à destination).

Une solution pour l'opérateur pourrait être de jouer sur des rationalités différenciées grâce à l'information. Mais cela pose des problèmes éthiques importants, outre les difficultés techniques¹. En effet, si l'on a montré qu'il peut y avoir un intérêt pour l'opérateur à avoir une stratégie de diffusion de l'information, cela peut être assimilé à de la manipulation des voyageurs grâce à l'information. Or, la relation d'un opérateur avec les voyageurs doit être basée sur la confiance. En pratique, cela peut pourtant être le cas quand une information n'est pas diffusée sur tous les médias (ex : ne pas diffuser l'information sur Internet mais ne la diffuser qu'au niveau des lieux d'arrêt pour éviter un afflux de voyageurs trop important).

Cela nécessite au niveau de l'opérateur une responsabilité dans ses choix. Doit-il essayer d'atteindre un optimum global au détriment de certains voyageurs, pénalisés² ? Doit-il assurer une transparence totale dans l'information, pouvant elle aussi conduire à des allongements de temps de parcours pour certains voyageurs ?

Les critères d'optimisation de l'opérateur doivent être définis. Doit-il essayer de diminuer simplement le temps de parcours global sur le réseau ? Doit-il éviter ou limiter des situations extrêmes ? Doit-il tenir compte de la répétition des incidents afin d'éviter de pénaliser toujours les mêmes voyageurs ?

Toutes ces questions méritent d'être approfondies et nécessitent la poursuite des développements d'outils apportant des éléments de réponse de nature quantitative.

¹ Comme nous l'avons indiqué dans le chapitre V de la première partie, l'information sur les perturbations est difficile. Par conséquent, avoir une stratégie consistant à envoyer systématiquement des informations différentes pour chaque voyageur en fonction de sa situation est difficilement envisageable à court terme.

² Cette problématique est également présente dans la régulation par l'offre. Exemple : décisions de ne plus desservir certaines gares pour que les trains combrent leur retard.

CONCLUSION GENERALE

Nous revenons tout d'abord dans cette conclusion générale sur la démarche effectuée, les questions posées, les outils développés pour y répondre et les réponses apportées. Ces dernières permettent ensuite d'effectuer quelques préconisations. Enfin, l'aboutissement de ce travail est aussi, nous l'espérons, un des points de départ d'autres recherches qui viendront le compléter, de même que nous l'avons fait avec des travaux préexistants. Nous présentons ainsi quelques perspectives possibles.

Retour sur le travail effectué

Cette recherche avait pour objectif général l'étude de l'adaptabilité et de la vulnérabilité des transports en commun à des perturbations et plus spécifiquement l'évaluation du rôle de l'information des voyageurs dans la régulation des situations perturbées.

Nous avons tout d'abord présenté (Partie I) la construction de la problématique et des questionnements afin de cadrer le sujet et de l'inclure dans des problématiques plus globales : déséquilibre modal dans les transports, actions possibles en matière d'Aménagement des transports. Pour structurer les questionnements, sept hypothèses à discuter ont été définies.

Le choix méthodologique a été la modélisation. Le modèle PERTURB a été conçu et implémenté en réponse à nos questionnements. C'est pourquoi il a été réalisé en tenant compte des spécificités des transports en commun. Ses cinq modules autorisent des calculs et simulations pour effectuer des mesures de vulnérabilité structurelle et fonctionnelle. La conception de PERTURB a reposé sur trois champs théoriques : théorie des systèmes, théorie des graphes et systèmes multi-agents.

Une plate-forme de simulation, intégrant PERTURB, a également été développée sur la base des travaux déjà réalisés au Laboratoire. L'adaptation du Logiciel MAPNOD a notamment consisté à mettre en place un module de visualisation dynamique. La plupart des résultats de PERTURB peuvent être directement lus dans MAPNOD. Par ailleurs, des programmes ont été développés afin de générer facilement des systèmes de transport théoriques et donc de faire varier les données en entrée de PERTURB.

Nous avons ensuite présenté des applications de PERTURB sur le réseau de transports en commun ferré en Île-de-France et sur des systèmes théoriques de transport. Elles ont été faites dans le but de répondre aux questionnements. Il a ensuite été possible de discuter les sept hypothèses.

Les simulations effectuées ne permettent d'émettre que des conclusions partielles et provisoires. Les éléments que nous apportons seront ou non confortés par d'autres études et simulations et avec d'autres modèles. Néanmoins, nous avons pu mettre en évidence les principaux points suivants :

- Des augmentations du maillage peuvent conduire à de plus fortes vulnérabilités à certaines perturbations, notamment lorsque des nouvelles lignes renforcent la dépendance à des lignes déjà existantes. L'obligation d'adaptabilité semble toutefois

se concrétiser le plus souvent par la nécessaire redondance (même partielle) des éléments. L'absence de maillage et de surcapacité peut être très contraignante pour l'opérateur comme pour les voyageurs lorsque certaines parties du réseau connaissent des dysfonctionnements car il n'y a pas de report possible sur des itinéraires de contournement. Les liens entre maillage et vulnérabilité doivent être approfondis.

- Les conséquences des perturbations varient fortement en fonction de la situation des nœuds du réseau : localisation par rapport à la perturbation, nombre et caractéristiques des lignes les desservant.
- Les conséquences des perturbations varient sensiblement dans le temps et sont donc dépendantes du moment où intervient la perturbation (heure de la journée, période de l'année..), ainsi que de sa durée. Les variations sont très rapides en fonction des horaires de circulation et sont d'autant plus importantes que les fréquences de circulations sont faibles.
- La sensibilité liée aux paramètres de diffusion de l'information est très variable et dépend des caractéristiques de l'offre de transport et de la perturbation, ainsi que de la situation du voyageur. La situation de chaque voyageur est spécifique dans l'espace comme dans le temps. Le maillage (et donc la redondance possible) et la structure horaire sont différents selon les lieux et principalement entre la périphérie et le centre, même sans prise en compte des contraintes de capacité. En conséquence, les perturbations affectent différemment les individus et le rôle de l'information est très variable.
- Néanmoins, les gains de temps liés à une diffusion performante de l'information rapidement et en tous lieux, peuvent être importants car les réorientations en amont d'une perturbation permettent de contourner celle-ci et de limiter la gêne occasionnée.
- Les problèmes de capacité du réseau conduisent à des situations où une diffusion rapide et transparente de l'information entraîne des temps de parcours supplémentaires pour certains voyageurs, comparativement à une diffusion moins performante.
- Les intérêts de l'opérateur et des voyageurs peuvent parfois être divergents. L'opérateur a comme objectif d'assurer le meilleur fonctionnement possible du réseau de transport, y compris en cas de perturbation, ce qui implique un raisonnement en terme de flux favorisant la majorité des voyageurs transportés aux dépens éventuels de quelques uns. La conséquence peut être un accroissement des inégalités de traitement et l'incapacité éventuelle pour certains voyageurs d'obtenir une solution satisfaisante. Ceux-ci poursuivent leur propre objectif : se déplacer rapidement et dans de bonnes conditions.

Au-delà des hypothèses formulées, nous nous étions posés la question suivante : **dans quelle mesure l'information des voyageurs contribue-t-elle à la régulation des situations perturbées grâce aux réorientations au niveau des nœuds du réseau ?**

Plusieurs possibilités existent en matière de régulation (Lange, 1976) :

- correction des écarts enregistrés entre la valeur de consigne et la valeur réelle de la variable considérée grâce à des régulateurs (action modératrice),
- compensation des perturbations (assurance),
- suppression des perturbations grâce à des amortisseurs, tampons, écrans isolants (prévention dans le but d'améliorer la fiabilité).

Nous nous situons ici dans le cadre d'une régulation par correction des écarts. En effet, nous avons mesuré dans différentes situations l'influence de l'information des voyageurs sur les temps de parcours, l'objectif étant que ceux-ci soient les plus proches possibles de la valeur de référence. Néanmoins, ce type de régulation suppose un feed-back avec une adaptation des actions en fonction de leurs effets. Or, nous n'avons pas considéré de stratégies de diffusion de l'information, qui pourraient évoluer en fonction de l'évolution de la situation. Ainsi, dans ce cadre, l'information des voyageurs s'insère dans des mécanismes de régulation plus globaux et y contribue donc, mais n'est pas véritablement une action de régulation en soi.

Si des stratégies de diffusion d'information sont définies, la question de la manipulation par l'information se pose. Il conviendrait alors de définir les critères d'optimisation de ce type de régulation et d'y inclure des questions éthiques. Par ailleurs, les régulations sont en règle générale organisées. En effet, la hiérarchie dans les mécanismes de régulation :

- augmente le domaine de l'homéostasie (le système peut faire face à une variété plus considérable de l'environnement),
- augmente la fiabilité de la régulation (des boucles de régulation peuvent tomber en panne),
- contribue à l'efficacité : chaque moyen employé est adapté à l'ampleur (Lesourne, 1976).

Dans la hiérarchie des actions de régulation des situations perturbées, quelle peut être la place de l'information des voyageurs ? Celle-ci est nécessairement de niveau hiérarchique inférieur à la régulation par l'offre (gestion des circulations). Pour un opérateur, l'information peut être un moyen d'optimiser l'utilisation de ces circulations. Pour un voyageur, elle doit augmenter la variété de ces choix possibles par augmentation du champ sur lequel sa rationalité s'exerce (si l'information est diffusée de manière transparente).

Néanmoins, l'information des voyageurs peut avoir pour conséquence d'accroître la propagation des perturbations sur d'autres lignes par les reports de flux sur des lignes ne disposant pas des capacités suffisantes. L'effet sur la régulation peut donc être négatif. Des reports de flux importants sur d'autres lignes peuvent également dégrader le déplacement d'autres voyageurs non concernés par la perturbation initiale.

Il est fondamental de poursuivre le développement d'outils d'analyse des conséquences des perturbations et du rôle des actions de régulation dans toute leur complexité et en prenant bien compte les deux points de vue (opérateur et voyageur). Ceci pourrait ainsi aller jusqu'à des évaluations monétaires des bénéfices liés à l'amélioration des systèmes d'information.

Préconisations

A la lumière des résultats obtenus, il est possible d'effectuer des préconisations générales. Même si nos expérimentations sont en grande partie de nature exploratoire, elles permettent de tirer quelques enseignements et d'apporter une contribution plus opérationnelle. Ceci constitue un objectif de toute recherche se situant dans le domaine de l'Aménagement-Urbanisme, discipline n'étant par nature pas uniquement descriptive.

Selon la façon dont on envisage le réseau au sein du territoire, on peut influencer sur différentes dimensions de la performance d'un système de transport : économique et commerciale, territoriale, adaptative. De manière générale, il nous semble pertinent d'**intégrer des éléments relatifs à la performance adaptative dans l'évaluation de projets d'Aménagement**. En effet, cela permet d'intégrer des éléments sur le fonctionnement et les dysfonctionnements possibles des systèmes de transport très en amont, dès l'évaluation d'un projet. Des analyses basées uniquement sur l'offre théorique de transport fournissent des informations capitales mais n'embrassent pas l'ensemble des conséquences possibles de modifications de l'offre de mobilité. Il conviendrait ainsi d'ajouter cette dimension dans les analyses multi-critères effectuées dans le cadre de l'évaluation de projets d'Aménagement. Ainsi, la question de l'optimum d'un système de transport pourrait pleinement prendre en compte des aspects liés à l'adaptabilité à des dysfonctionnements possibles. En cas d'incident grave, il est par exemple possible d'organiser des dessertes de substitution. Néanmoins, cela est souvent compliqué en pratique : plus le système de transport a les capacités de s'adapter sans avoir besoin de recourir à de telles actions, moins il est vulnérable. Cela pose des difficultés dans la mesure où des redondances, même partielles, ne sont pas toujours économiquement viables. Même si l'objectif d'une bonne performance adaptative ne peut être l'unique finalité, celle-ci doit malgré tout être pleinement prise en compte.

Cela suppose d'avoir à disposition des outils facilitant cette analyse. Nous avons travaillé à la mise en place d'un modèle informatique (PERTURB) utile pour effectuer des mesures de vulnérabilité et donc susceptible de s'intégrer dans de tels processus de décision. Mais **la palette d'outils à disposition des aménageurs doit s'élargir, en intégrant d'autres éléments que ceux que nous avons retenus ici**. Nous revenons sur ce point dans les perspectives pouvant être envisagées sur la base de cette recherche.

Il est délicat d'effectuer des préconisations liées à l'information des voyageurs dans la mesure où l'on a pu observer que son influence est très variable et peut être positive ou négative, selon les voyageurs et les situations. L'opérateur, compte tenu de ses capacités disponibles, peut parfois avoir tendance à diffuser de manière partielle l'information pour ne pas provoquer des effets de report massif lors de perturbations. En effet, le voyageur, s'il

bénéficie d'une information complète et transparente, recherche le trajet optimal. Mais tous les voyageurs pour les mêmes destinations sont dans le même cas et il peut y avoir des reports importants vers des lignes ne pouvant pas absorber le flux supplémentaire. En conséquence des voyageurs peuvent être pénalisés et la solution n'est pas optimale non plus pour eux.

Les principes de service public sont basés sur des droits individuels et l'Intérêt Général. Le droit individuel à une information fiable est important. Mais lorsque des problèmes de capacité existent, faut-il diffuser une information parfaite à tous les voyageurs ou avoir une stratégie pour répartir au mieux les flux sur le réseau ? Les obligations de service public imposent à l'opérateur une égalité dans le traitement des utilisateurs. Mais comment satisfaire cette obligation dans le cas où il est impossible d'assurer une solution optimale à chacun ? Le développement des outils d'information pose la question de la redéfinition des stratégies de régulation qui ne peuvent plus être basées uniquement sur l'offre. Il faut intégrer pleinement les voyageurs dans la régulation des situations perturbées.

Une réponse possible à tester est l'intégration des données sur les capacités dans l'information diffusée aux voyageurs, comme c'est de plus en plus le cas dans les transports routiers¹. Ainsi, les voyageurs feraient leur choix avec une rationalité plus importante que celle que nous avons étudiée ici (et avec une égalité de traitement) et pourraient par exemple décider de ne pas se réorienter vers une ligne si le risque de saturation est important. Il s'agirait alors d'évaluer comment leurs choix permettent de se rapprocher d'un optimum global. Ceci nécessite également d'approfondir les questions liées aux optimums possibles pour le(s) opérateur(s) afin de les comparer avec les résultats orientés agents. La prise en compte de l'apprentissage des voyageurs est fondamentale.

Il convient d'étudier comment les données sur les capacités disponibles peuvent s'intégrer dans le **développement de calculateurs d'itinéraires temps réel**, qui permettraient de trouver l'itinéraire le plus pertinent en fonction de l'état du trafic (circulations en temps réel, charge du réseau). Ces itinéraires seraient alors proposés aux voyageurs. Le projet OGESPER sur lequel nous avons travaillé (voir sur le CD de la thèse) va dans ce sens. Il consiste notamment à alimenter en informations conjoncturelles un moteur de recherche d'itinéraires. Il est ensuite possible de calculer des itinéraires avec des données multimodales (SNCF, RATP et OPTILE) mais en excluant les lignes dont le trafic est interrompu, afin de renseigner les voyageurs sur les itinéraires de substitution possibles en Île-de-France (voir une présentation sur le CD accompagnant la thèse).

La présence de plusieurs opérateurs complexifie le problème : l'information sur les itinéraires de contournement possibles peut conduire à une réorientation des voyageurs vers des lignes perturbées ou saturées d'un autre opérateur. Dans ce cas la situation des voyageurs est péjorée par manque d'information globale sur les différents réseaux et sur la capacité des lignes qui pourraient faciliter la bonne gestion des flux de voyageurs. **Les échanges d'information entre transporteurs doivent être encouragés.** Le développement des normes (ex :

¹ Un individu peut effectuer un calcul d'itinéraires sur un site Internet mais également se renseigner sur des conditions de trafic.

TRIDENT pour les informations théoriques et SIRI pour les informations conjoncturelles et temps réel) pourrait faciliter les choses à ce niveau.

En raison du caractère innovant de certaines informations, des frais liés à leur mise en place, la question du coût peut être posée. Néanmoins, **faire payer l'information aux voyageurs afin de jouer sur leurs rationalités est difficilement envisageable**. Les questions d'éthique, liés à la dimension de service public des transports collectifs, se posent indéniablement. Même si certaines formes d'information sont déjà payantes à l'heure actuelle (ex : principe du SMS+...), les utiliser dans le but d'introduire des différences de comportement et une meilleure régulation n'est pas souhaitable, au-delà des difficultés techniques induites.

En revanche, **la personnalisation de l'information est très prometteuse et doit être développée**. De nombreux services se développent à l'heure actuelle. Nous avons mis en évidence les possibilités offertes par l'information sur les itinéraires de substitution, en particulier lorsque le maillage facilite les réorientations des voyageurs. Toute la difficulté consiste à **proposer l'itinéraire pertinent pour chaque voyageur**, au-delà de lui signaler qu'il y a une perturbation. Des solutions techniques doivent être trouvées mais un enjeu important consiste également à donner la possibilité aux agents chargés de l'information des voyageurs d'avoir accès à cette information et d'être ainsi en mesure d'informer de manière performante les voyageurs¹.

Afin de pouvoir renseigner rapidement le maximum de voyageurs en fonction de leurs préférences et quelle que soit leur situation sur le réseau, de nombreux médias de diffusion existent. Il est fondamental d'**assurer une diffusion large et rapide de l'information en utilisant tous les médias disponibles**.

Mais il faut **assurer la cohérence et la fiabilité des informations diffusées**. Nous n'avons pas considéré dans cette recherche la vulnérabilité pouvant intervenir au niveau des systèmes d'information en envisageant leur rôle uniquement par rapport à la régulation des perturbations. Néanmoins, les dysfonctionnements existent et peuvent nuire à la gestion des perturbations et plus généralement à l'image des transports en commun. Une information erronée peut également générer des perturbations².

A ce niveau, les évolutions en cours vont compliquer encore plus la problématique. En effet, de nouveaux acteurs émergent. Des sociétés comme Google, déjà très présentes sur le secteur aux Etats-Unis, commencent à investir en France (ex : Bordeaux et Maubeuge) le champ de l'information multimodale en proposant des services (pour le moment) gratuits, avec Google Transit.

¹ Il s'agit d'un des objectifs du projet OGESPER.

² Exemple : si un train court est annoncé long, les voyageurs se répartissent sur l'ensemble du quai et mettent ensuite plus longtemps à monter. Ceci peut retarder le train.

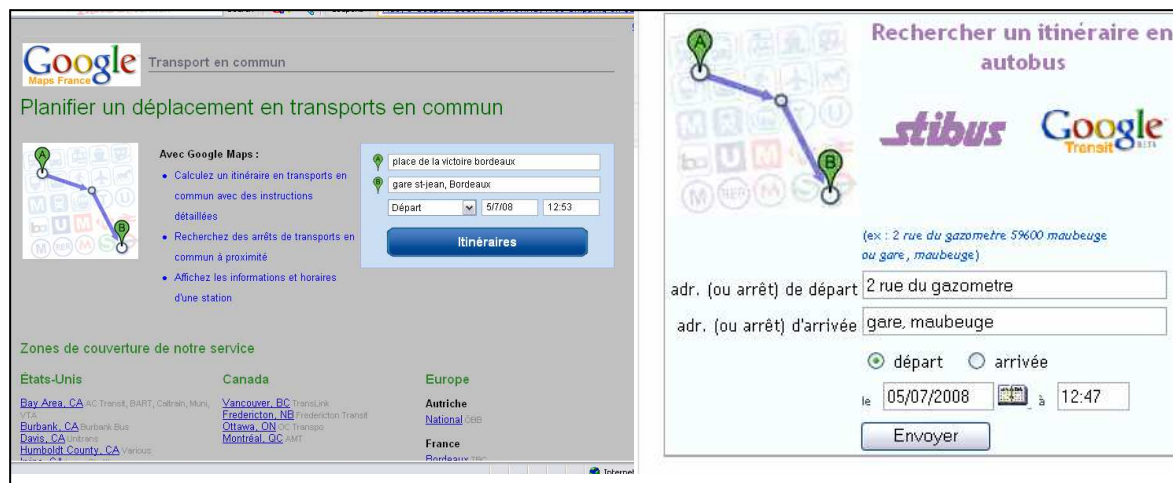


figure 143 Google : nouvel acteur de l'information multimodale

La question générale de l'ouverture des données publiques, qui peut être considéré comme une bonne chose pour le transport public pose également la question des modalités pratiques et équitables de mise à disposition de ces données.

Des particuliers développent également des « widgets », petites applications informatiques pouvant être installées sur un ordinateur et récupérant via des appels automatiques et de façon plus ou moins légale, les données des sites Internet des opérateurs¹. Dans le cas de la *figure 144*, ce widget donne les prochains trains au départ des gares en Île-de-France en récupérant les informations temps réel proposées sur les sites Internet www.ratp.fr et www.transilien.com. **La multiplication possible des sources d'informations peut faciliter l'accès à l'information mais la question de la fiabilité et de la cohérence selon les sources doit être pleinement prise en compte, en particulier en situation perturbée.** Nous avons mis en évidence quelques apports possibles de l'information des voyageurs pour la régulation des situations perturbées. Si les opérateurs ne maîtrisent plus la diffusion de ces informations, comment aborder la question de la régulation grâce à l'information des voyageurs ? Celle-ci devient nécessairement plus complexe : plus de sources d'informations, moins de prévisibilité des voyageurs. Il faut de plus prendre en compte l'apprentissage de ces derniers : ils consulteront les sources les plus fiables et les plus pratiques pour eux. Si un opérateur adopte une stratégie, celle-ci doit tenir compte de ces paramètres.

¹ Certains opérateurs développent également leurs propres widgets que l'on peut télécharger depuis leur site Internet.



figure 144 Les widgets : une nouvelle manière de surfer sur Internet ?

Les champs d'action et de recherche sont nombreux et leur coordination est essentielle. En France, la PREDIM (Plate-forme de Recherche et d'Expérimentation pour le Développement de l'Information Multimodale)¹ a vocation à structurer les actions allant dans le sens d'un développement de l'information multimodale, en situation normale mais également lors de perturbations.

Aménagement et information dans les transports

Notre recherche se situe dans le domaine de l'Aménagement-Urbanisme et nous avons étudié de manière spécifique le rôle de l'information des voyageurs dans des actions de régulation. Nous avons en particulier souligné son rôle dans les phénomènes de régulation lors de perturbations.

En dépit des nombreuses questions soulevées, on mesure à quel point il y a un intérêt à développer des systèmes de transport dits « intelligents ». Ceci suppose la mise en place de nombreux outils informatiques au niveau opérationnel, qui doivent être bien alimentés afin d'être pleinement efficaces. Nous avons évoqué l'outil OGESPER, sur lequel nous travaillons, qui permet de calculer des itinéraires de contournement des perturbations afin de les proposer aux voyageurs.

Selon nous, les actions à mener en matière d'information des voyageurs font partie intégrante d'actions en matière d'Aménagement-urbanisme. On passe ainsi d'une logique d'offre de transport à une logique de service de mobilité sur un territoire. Mais il faut alors développer des outils pour mesurer les retours sur investissements. Or, « l'approche économique reste un point dur du développement de l'information multimodale » (Uster, 2008). Nous avons donné

¹ Voir www.predim.org

quelques pistes ici mais le travail à réaliser à ce niveau est considérable¹. Il est d'autant plus important que les coûts relatifs à des projets d'information des voyageurs représentent des sommes conséquentes.

Nous avons développé le modèle PERTURB qui permet des applications au niveau stratégique et souligné l'importance du développement de ce type d'outil, pour des éclairages intéressants sur l'adaptabilité et la vulnérabilité des transports collectifs. En développant le modèle PERTURB, nous avons constaté les difficultés à obtenir et à traiter les données relatives aux systèmes de transport (offre et demande). Au niveau de l'offre, nous avons utilisé une base spécifiquement conçue pour l'information des voyageurs².

Ceci nous conduit au constat suivant : **les données constituées pour les besoins d'information des voyageurs doivent être utilisées pour analyser les systèmes de transport aux niveaux stratégique et tactique.** Elles sont régulièrement mises à jour et contiennent la plupart des informations très utiles : arrêts géocodés, correspondances, horaires, lignes, transporteurs, etc. De plus, ces bases sont amenées à contenir de plus en plus d'informations : données sur la circulation en temps réel des trains, données tarifaires, comptages voyageurs, etc. Le temps que nous avons passé à formater les données pour les rendre compatibles avec PERTURB a représenté un investissement conséquent. Mais les données changent en fonction de l'évolution de l'offre (dans notre cas : prolongement des lignes de métros, modifications de dessertes, refonte des programmes de circulation les jours de grève) et il faudrait être en mesure de les mettre à jour continuellement.

Par conséquent, développer des applications proposant des fonctionnalités telles que celles de PERTURB, mais « branchées » à des systèmes industrialisés de traitement des données semble pertinent. Cela pose évidemment à nouveau des questions liées aux échanges de données lorsque des informations concernant plusieurs transporteurs sont nécessaires.

Un exemple intéressant est celui proposé sur le site www.navitia.com (figure 145). Des calculs d'accessibilité sont proposés à partir de données et d'un moteur de recherche d'itinéraires utilisé pour l'information des voyageurs. Dans la mesure où des recherches d'itinéraires sont proposées aux voyageurs, l'adaptation des fonctions permet en effet de proposer des calculs utiles pour d'autres usages, se rapprochant de ceux que nous avons effectués ici. Il n'y a alors pas de problème de mise à jour des données.

¹ Voir à la fin du chapitre I de la Partie III.

² Base AMIVIF : voir le chapitre I de la Partie III.

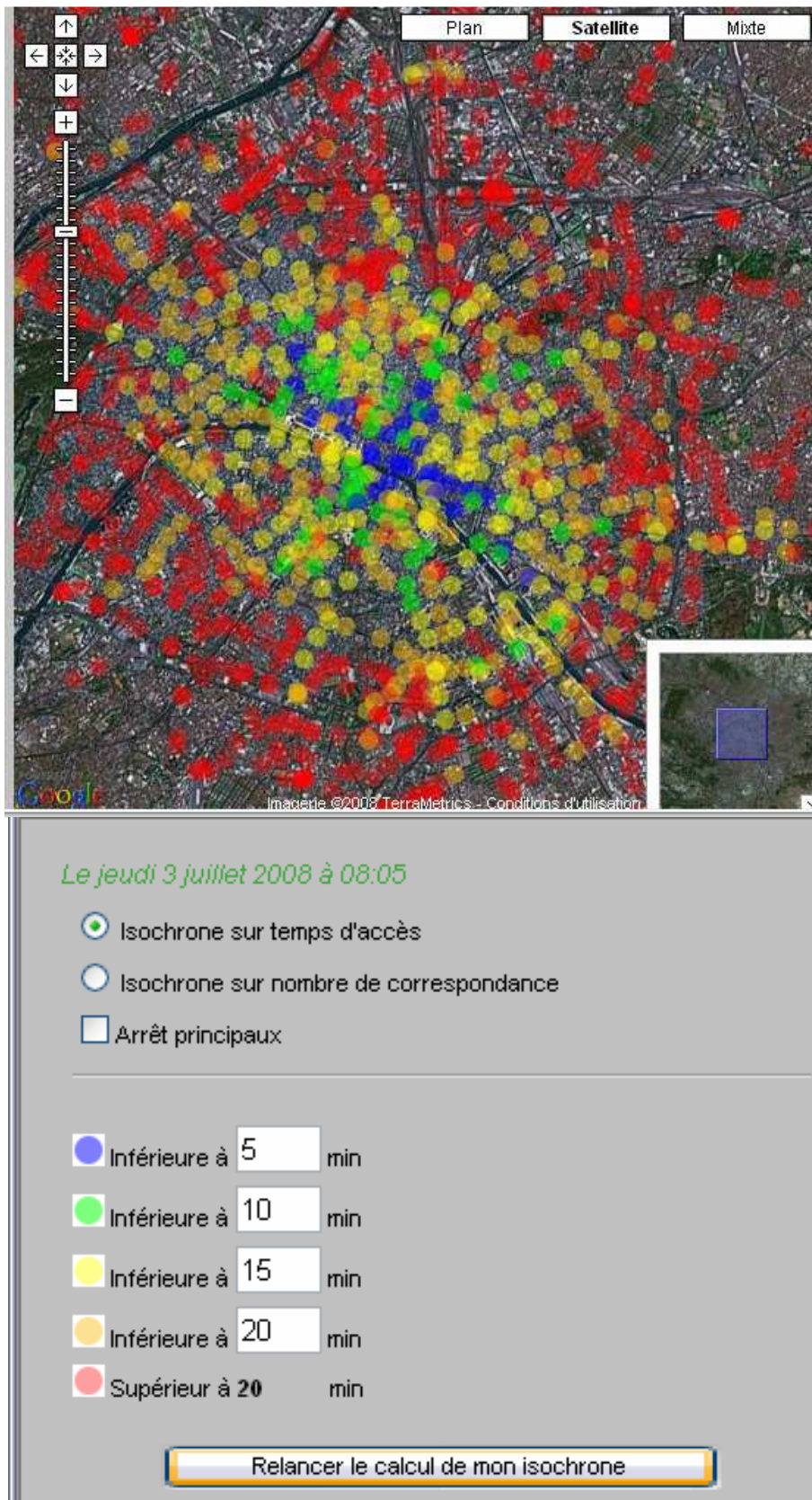


figure 145 Calculs d'accessibilités sur Paris avec le site www.navitia.com

Les données constituées pour l'information des voyageurs peuvent intervenir dans des phénomènes de régulation à différents niveaux : opérationnel (ex : OGESPER) mais aussi tactique et stratégique (ex : PERTURB).

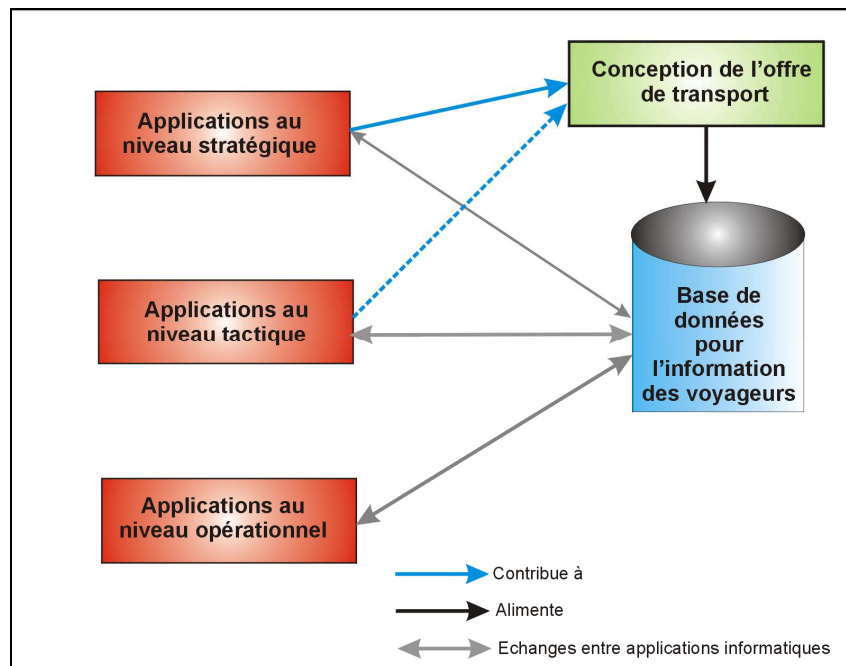


figure 146 L'utilisation de l'information multimodale à différents niveaux d'intervention

Ainsi, **information des voyageurs et Aménagement** sont amenés à être de plus en plus liés à différents niveaux d'intervention.

Perspectives

Notre recherche a permis d'obtenir un certain nombre de résultats et d'effectuer quelques préconisations. Nous avons également souligné les difficultés et la nécessité d'approfondir certains points. Une thèse correspond à un travail cadré, finalisé, mais elle s'inscrit dans une démarche de recherche toujours en mouvement. Ce travail offre un certain nombre de perspectives.

Modélisation

Au niveau de la modélisation, des évolutions pourraient être faites afin de mieux répondre à nos questionnements et d'élargir ceux-ci. Elles pourraient être réalisées dans PERTURB ou dans le cadre de modèles basés sur des systèmes plus industrialisés, afin de garantir une plus grande pérennité des développements.

➤ Offre de transport

- Prendre en compte les modifications du Plan de Transport en fonction de l'évolution de la situation perturbée (régulation par l'offre). Ceci permettrait également de mieux traiter la diversité des situations perturbées (retards, modifications de desserte, etc.) et de traiter ainsi la régulation des situations d'un point de vue plus global (adaptation de l'offre et de la demande). Il serait intéressant de prendre en compte les temps de montée et descente des véhicules pouvant entraîner des retards. Ces développements iraient dans le sens d'une approche « système » prenant pleinement en compte les interactions entre l'offre et la demande.
- Prendre en compte l'intermodalité de manière plus large en intégrant les véhicules individuels. Sur ce point, la difficulté est liée au fait que de nombreuses différences existent dans la modélisation des véhicules personnels comparativement aux transports collectifs. Les modes d'interaction sont totalement différents.
- Effectuer des calculs unipolaires inversés. Au lieu de calculer les trajets au départ d'un nœud à une heure donnée, il s'agirait de calculer les itinéraires permettant d'arriver à une heure donnée en partant le plus tard possible. Nous avons utilisé ce type de méthode pour retrouver les heures de départ des voyageurs pour notre travail sur l'Île-de-France¹. Le proposer directement dans PERTURB serait intéressant pour compléter les analyses de vulnérabilité structurelle.

➤ Voyageurs-information

- Intégrer d'autres critères que le temps pour les calculs d'itinéraire (coût, confort du trajet..). Il serait également utile d'intégrer des éléments sur les perturbations possibles (ex : privilégier les lignes les plus fiables pour les calculs d'itinéraires). Ceci serait lié à l'apprentissage du réseau.
- Prendre en compte les possibilités d'apprentissage des agents (connaissance du réseau et adaptation aux nouveaux médias de diffusion d'information). L'agent utiliserait différents types d'information : connaissances propres et information sur la situation en cours. On pourrait à ce niveau intégrer l'information sur les capacités des lignes. Les agents, en fonction de leurs connaissances (qui seraient complémentaires de celles constituées sur la base des informations relatives à la perturbation en cours), pourraient avoir des stratégies différentes. Certains pourraient prendre volontairement la décision de ne pas se réorienter s'ils estiment que des problèmes de capacité entraîneront probablement un trajet non optimal. A ce niveau, des éléments de la théorie des jeux pourraient être intégrés. L'agent effectuerait des choix en tenant compte de ceux pouvant être faits par les autres agents.
- Etudier d'autres types d'effets sur le comportement des agents : changement d'heure de départ, modification du lieu de départ...décision de ne pas voyager.

¹ Voir dans le chapitre I de la Partie III.

- Donner aux agents des comportements pro-actifs : aller chercher l'information en cas de perturbation.
- Intégrer la variété des individus (aussi bien au niveau de leur processus de décision que de leurs actions). Ceci est possible grâce à l'approche multi-agents et pourrait aller jusqu'à la prise en compte des divers handicaps¹.
- Prendre en compte la capacité des nœuds et simuler les cheminements pédestres des voyageurs, tel que cela est fait dans d'autres modèles². Néanmoins, ceci nécessite une grande précision dans les données, plus fine par exemple que celles auxquelles nous avons pu avoir accès. Cela requiert également l'intégration d'un module d'animation des piétons au sein de PERTURB. L'approche multi-niveaux serait alors développée sur le plan spatial mais également temporel car il faudrait avoir un pas de temps à la seconde pour le cheminement dans les nœuds du réseau.
- Affiner les paramètres de diffusion de l'information (ex : avoir un décalage dans le temps selon les lignes) et tester des stratégies de diffusion d'information (approche systémique type opérateur). L'opérateur pourrait affiner les stratégies de diffusion de l'information par de l'apprentissage (de même que les agents). Il serait alors possible de mieux intégrer l'information des voyageurs dans l'étude de la régulation des situations perturbées.
- Modéliser les flux d'informations internes aux opérateurs et entre ceux-ci afin d'avoir une modélisation plus complète. Il y aurait alors des agents dont la fonction serait de diffuser l'information aux « agents-voyageurs ». L'information des voyageurs est en effet étroitement liée à la qualité des échanges au niveau opérationnel.

➤ Plate-forme de simulation

Afin de pouvoir obtenir des résultats intéressants grâce à PERTURB, des améliorations de la plate-forme de simulation pourront consister à :

- améliorer la visualisation des flux, notamment si les cheminements pédestres sont modélisés. En effet, les visualisations dynamiques sont nécessaires pour comprendre les phénomènes.
- progresser dans la méthode de génération de systèmes de transport théoriques afin de se rapprocher de systèmes réels (au niveau de l'offre et de la demande). Exemple : avoir des distances inter-arrêts différentes selon les modes, générer des rocares...

¹ Il est à noter que les données relatives à l'information des voyageurs contiennent de plus en plus de données liées aux handicaps (ex : lignes et arrêts accessibles aux personnes à mobilité réduite) afin de proposer des services adaptés (ex : recherche d'itinéraire pour une personne en fauteuil roulant). Exemple du service Infomobi (service d'information sur les transports pour les personnes handicapées en Île-de-France).

² Ex : modèle de W. Daamen évoqué dans la Partie II, pour les piétons.

La modélisation est liée à un modèle et à des données¹. Au-delà du développement d'autres fonctionnalités, utiliser des données directement issues des systèmes « industriels » de gestion des données pour l'information des voyageurs est également une perspective intéressante. Comme nous l'avons déjà souligné, toutes les améliorations possibles sont contraintes par la précision des données (offre, demande) en entrée du modèle. Au niveau de la demande, le comptage automatique des passagers devrait permettre une meilleure précision et d'intégrer plus facilement les problématiques de capacité. Néanmoins, les données sont souvent stratégiques et l'accès à celles-ci est difficile en pratique.

Applications dans le domaine de l'Aménagement

Cette thèse a porté sur la performance adaptative des transports collectifs. Il serait particulièrement intéressant d'évaluer les liens entre les types de performance et de poser la question de l'optimum à trouver. Intuitivement, la recherche de performance adaptative semble compatible avec la performance territoriale mais pas nécessairement avec la performance économique. En effet, les redondances et surcapacités garantissent une plus grande adaptabilité mais engendrent des coûts plus élevés. Il faudrait également inclure le risque dans toute sa dimension en intégrant les aléas et la fiabilité. En effet, l'optimum recherché doit tenir compte de la fréquence des dysfonctionnements possibles, en plus de la vulnérabilité.

Nous avons travaillé ici sur l'offre de transports en commun en Île-de-France et sur des systèmes de transport théoriques. Nous avons constaté que la vulnérabilité était variable d'un réseau à l'autre et entre les différentes parties d'un réseau. Il serait utile de poursuivre l'approche sur des réseaux de transports en commun d'agglomérations moins importantes et de faire des analyses comparatives (en particulier l'étude des conséquences du développement des réseaux de tramways, impliquant une forte hiérarchisation du réseau et donc une dépendance par rapport à quelques axes, à la fois au niveau structurel et fonctionnel). Le VAL² de Rennes a par exemple transporté dès sa première année de mise en service environ 40 % du trafic de l'agglomération sur 8,6 km (CERTU, 2004). Le VAL peut être fiable mais le système de transport est vraisemblablement vulnérable, car très dépendant du fonctionnement d'une ligne.

La question de la valorisation des temps gagnés grâce à l'information doit être développée. Cela peut en effet légitimer des investissements dans ces systèmes d'information au même titre que des améliorations de l'offre de transport proprement dite. Cela est d'autant plus nécessaire que les coûts de tels systèmes sont élevés.

La vulnérabilité des transports en commun s'inscrit dans le contexte plus général de vulnérabilité urbaine induisant des phénomènes de dépendance entre sous-systèmes constitutifs du système urbain. Il conviendrait donc de traiter la vulnérabilité aval des transports collectifs³. La hiérarchie (dans les structures et fonctions) d'un système fait que la vulnérabilité d'un élément correspond à un aléa de l'élément de niveau hiérarchique

¹ Voir la présentation faite dans le chapitre I de la Partie II.

² Véhicule Automatique léger, métro sans conducteur.

³ Voir le chapitre IV de la Partie I.

supérieur. Il existe des dépendances entre réseaux qui se traduisent par des effets dominos entre réseaux et des difficultés dans la gestion des dysfonctionnements. A ce niveau, les perturbations des transports collectifs correspondraient à des aléas. Cette question est fondamentale, notamment dans une perspective de développement des transports collectifs : si leur importance croît, il faut pouvoir évaluer les conséquences de leurs dysfonctionnements possibles.

Les enjeux liés à la performance adaptative des transports collectifs nécessitent ainsi la poursuite des recherches dans ce domaine, encore peu développées aujourd'hui. Nous espérons que les conclusions faites ici seront complétées par d'autres études, recherches et simulations avec d'autres modèles...

**GLOSSAIRE, SIGLES ET
BIBLIOGRAPHIE**

GLOSSAIRE

AMENAGEMENT-TRANSPORTS

Aménagement-Urbanisme : part d'une insatisfaction quant à l'état présent de l'espace et/ou à son évolution supposée. C'est une action qui vise à modifier cet état ou à contrecarrer une évolution considérée comme non satisfaisante. L'action porte principalement sur l'espace et le temps et l'objectif est un état futur de cet espace dans le temps.

Aménagement des transports : consiste à mettre en adéquation l'offre avec les demandes existantes sur le territoire et leurs évolutions possibles.

Aménagement par les transports : consiste à agir sur les transports pour contribuer à l'organisation du territoire, en fonction des objectifs retenus (ex : développement d'une zone géographique pour un rééquilibrage).

Autorité Organisatrice : « *collectivité territoriale dans l'exercice de sa compétence transport, est responsable de l'organisation des transports publics dans l'agglomération, le département ou la région. [...] Elle définit l'offre de transport, le niveau de qualité de service, les tarifs et planifie l'organisation des déplacements* » (ITS France, 2002).

Binôme fonctionnel : associe à un type de véhicule et un réseau partiel infrastructurel donnés, une vitesse de circulation distincte » (Chapelon, 1997).

Correspondance : tout changement de véhicule nécessaire à l'accomplissement de la suite du trajet en cours, et ce, si possible dans une logique de coordination des horaires lorsqu'elles font intervenir un seul opérateur ou, plus rarement, lorsqu'une concertation a pu être menée entre plusieurs opérateurs (Chapelon, 1997).

Déplacement : succession de séquences (utilisation d'un mode de transport, marche à pied terminale, attente, correspondance...) qui se déroulent entre le départ d'une origine et l'arrivée à une destination. Un déplacement peut comporter l'utilisation successive de plusieurs modes de transport (ITS France, 2002).

Développement durable : « *mode de développement veillant au respect de l'environnement par une utilisation prudente des ressources naturelles afin de les rendre durables dans le long terme* »¹. Il s'agit de satisfaire les besoins de développement des générations présentes sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs.

¹ Encyclopédie Universelle Larousse, 2004.

Droit au transport : doit permettre aux citoyens de se déplacer dans des conditions raisonnables d'accès, de qualité et de prix ainsi que de coût pour la collectivité, notamment par l'utilisation d'un moyen de transport ouvert au public. Dans cet esprit, des mesures particulières peuvent être prises en faveur des personnes à mobilité réduite (LOTI).

Droit à l'information : droit pour les usagers d'être informés sur les moyens qui leur sont offerts et sur les modalités de leur utilisation (LOTI).

Encombrement : « *effet externe entre des personnes consommant un même service* » (Kolm, 1968).

Infrastructures : installations réalisées au sol ou en souterrain à l'usage du transport de personnes ou de marchandises (Baptiste, 1999).

Interaction spatiale : principe selon lequel tout ce qui se trouve ou se passe dans un lieu donné est en partie au moins déterminé par tout ce qui se passe ou se trouve dans un ensemble de lieux en relation avec le lieu considéré (Durand-Dastès, 2001).

Interconnexion nodale : rapproche des réseaux techniques par des lieux d'échanges, des lieux d'interface entre les réseaux et les territoires. Lieu au niveau duquel les voyageurs devront effectuer une correspondance impliquant parfois un changement de mode (Thévenin, 2002).

Interconnexion organisationnelle : correspond à tous les mécanismes de coordination entre modes, transporteurs, permettant à un système de transport de fonctionner.

Interconnexion réticulaire : met en relation des infrastructures. Il existe donc un point de jonction. Mais, à travers une coopération institutionnelle ou financière, un service direct est mis en place qui emprunte indifféremment les réseaux-soutiens articulés et qui banalise ainsi ce point dans le nouveau réseau interconnecté. Il pourra être conservé en tant qu'arrêt mais ne constituera pas une rupture de charge (Thévenin, 2002).

Intermodalité : ensemble des moyens mis en œuvre pour rationaliser le système de transport dans l'objectif d'aider les voyageurs à coordonner leurs modes de déplacement (Thévenin, 2002).

Multimodalité : recours à plusieurs modes pour satisfaire les besoins de déplacement.

Mode (ou moyen de transport) : mode de locomotion permettant aux voyageurs de se déplacer.

Opérateur : responsable du fonctionnement du système de transports en commun. Il est en général lié par un contrat à une Autorité Organisatrice qui définit l'ensemble des critères liés à la qualité de service devant être assuré par l'opérateur de transports en commun. Exemples : SNCF, RATP.

Performance territoriale d'un réseau : fonction décroissante de son « éloignement » au réseau virtuel possible entre les lieux à desservir. Le réseau virtuel, maximaliste (relations directes entre tous les couples de nœuds), est incompatible avec les contraintes de l'opérateur, que le concepteur doit prendre en compte (Stathopoulos, 1997).

Pôle d'échanges : interface entre plusieurs modes de transport et entre ceux-ci et leur environnement urbain.

Réseau de transport : ensemble d'infrastructures de transport de même nature, matérialisé dans l'espace géographique et utilisé pour le déplacement de personnes ou de marchandises entre deux points de cet espace (Baptiste, 1999).

Système de transport : est constitué d'un ensemble de moyens, dont la finalité fondamentale est de satisfaire un besoin de déplacement ou de transfert, ou plus généralement de communication, entre des lieux géographiques distincts (Chesnais, 1980). Nous y intégrons ici la demande.

Territoire : Le territoire implique la notion d'un pouvoir sur l'espace-substrat et d'une appropriation de celui-ci : *« Les territoires comportent la notion de propriété, d'appropriation, de pouvoir. Ce pouvoir consiste, en dernière analyse, en la possibilité de séparer, par des procédés divers, les mouvements potentiellement continus en mouvements autorisés et mouvements interdits »* (Stathopoulos, 1997).

Transport en commun : transport nécessitant un véhicule ayant une capacité supérieure à 9 places.

Transports intelligents : désigne *« les applications au domaine des transports des nouvelles technologies de l'information et de la communication. Plus particulièrement, il s'agit de l'ensemble des systèmes permettant de collecter, stocker, traiter l'information relative au mouvement des personnes et des marchandises et notamment des systèmes d'information voyageur, de paiements électroniques, de gestion de fret, d'aide à la gestion du trafic ... »* (ITS France, 2002).

VAL : Véhicule Automatique léger, métro sans conducteur.

VULNERABILITE

Aléa : *« probabilité qui prend en compte deux caractéristiques : l'occurrence et l'intensité du phénomène »* (Dauphiné, 2001).

Disponibilité : *« probabilité qu'un appareil réparable soit en état de fonctionner pendant une certaine portion du temps total de service »* (Gogue, 2000).

Domage : valeur anthropocentrique qui traduit la conséquence économique défavorable [d'un évènement] sur les biens, les activités et les personnes (Hubert et Ledoux, 1999).

Dommmages directs : les dommages directs aux réseaux correspondent à leurs dégradations physiques et leur évaluation peut être réalisée par le biais d'une estimation des coûts de réparation, de remise en fonctionnement ou de renouvellement.

Dommmages indirects : dégâts et perturbations engendrés par le phénomène par l'intermédiaire des dommages directs (Hubert et Ledoux, 1999).

Dommmages tangibles : les dommages tangibles peuvent faire l'objet d'une évaluation monétaire. Il s'agit donc classiquement des dégâts matériels sur les biens et activités dont la valeur est connue ou facilement évaluable par expertise.

Dommmages intangibles : les dommages intangibles sont difficilement chiffrables : vies humaines, problèmes de santé à court et moyen terme, pertes de biens privés irremplaçables, traumatismes et problèmes psychologiques (par exemple à la suite d'attentats)...

Dommmages surfaciques : dommages que l'on peut rattacher directement à un type d'occupation des sols de manière proportionnelle.

Dommmages non surfaciques : dommages pour lesquels on ne peut évaluer le dommage en proportion d'une surface.

Enjeu : caractérisation physique, économique ou financière des éléments (biens, activités, personnes) exposés à un évènement donné ou concernés par celui-ci (Hubert et Ledoux, 1999).

Fiabilité : « *probabilité pour qu'une pièce primaire, un dispositif ou un équipement complet soit utilisé sans défaillance pendant une période de temps déterminée, dans des conditions opérationnelles spécifiées. (La fiabilité s'exprime par une durée qui correspond au temps moyen entre deux pannes successives, ou T.M.B.F. [temps moyen de bon fonctionnement])* »¹.

Maintenabilité : « *probabilité qu'un appareil soit remis en fonctionnement au bout d'un temps donné après une défaillance, lorsque les opérations de maintenance ont été faites dans des conditions définies* » (Gogue, 2000).

Régulation (lors de situations perturbées dans le domaine des transports) : limitation de l'écart entre une situation normale, de référence, et la situation perturbée grâce à des actions pouvant s'exercer à la fois au niveau de l'offre et de la demande de transport.

- régulation a priori : s'effectue en amont et intervient en particulier lors de mouvements de grève annoncés ou de travaux sur le réseau. Ainsi, un opérateur peut être appelé en cas d'évènements annoncés, mouvements de grève par exemple, à modifier son plan de transport initial. Classiquement, une perturbation est dite prévue si elle est connue plus de 24h à l'avance.

¹ Encyclopédie Universelle Larousse, 2004.

- régulation en temps réel : correspond à la nécessité d'adapter en continu le système en raison des perturbations qu'il subit. L'objectif majeur est d'éviter une propagation des dysfonctionnements sur le réseau et d'acheminer les voyageurs en fonction des priorités de circulation retenues, tout en essayant de parvenir au plus vite à un retour à la normale.

Régulation (à long terme dans le domaine des transports) : adaptation du système sur une échelle de temps plus importante (ex : mise en service de nouvelles lignes pour répondre à une évolution de la demande, renforcements de dessertes).

Vulnérabilité : variable exprimant les impacts potentiels d'un phénomène par rapport :

- aux paramètres de l'aléa,
- aux enjeux, c'est-à-dire la quantité et la nature des biens, activités...exposés à cet aléa, ainsi que leur fragilité par rapport à celui-ci,
- aux ressources mobilisables pour limiter les impacts (Hubert et Ledoux, 1999).

Vulnérabilité matérielle : décrit le degré d'endommagement physique des infrastructures du réseau consécutivement à l'ensemble des phénomènes catastrophiques susceptibles d'intervenir (Gleyze, 2005).

Vulnérabilité fonctionnelle : mesure la dégradation des services assurés par le réseau en fonction des endommagements. La vulnérabilité fonctionnelle intègre la demande, l'usage du réseau par les voyageurs (Gleyze, 2005).

Vulnérabilité structurelle : trouve sa place entre l'approche matérielle et l'approche fonctionnelle... Elle a pour but d'étudier les dommages potentiels structurels et la vulnérabilité associée, c'est à dire les modifications des potentialités relationnelles du réseau compte tenu de sa nouvelle configuration (Gleyze, 2005).

Risque : possibilité de conjonction (d'occurrence) d'un phénomène réputé dangereux avec l'existence d'enjeux pouvant subir des dommages » (Xouillot, 1995). Le phénomène mentionné correspond à l'aléa et les enjeux (économiques, humains, politiques, etc) peuvent subir des dommages en raison de leur vulnérabilité à cet aléa.

Risque = aléa X vulnérabilité.

Sécurité passive (en transport) : « consiste à prendre en compte les événements accidentels dans le dimensionnement de la structure de caisse des véhicules et de prévoir des dispositifs afin de réduire les conséquences des collisions » (Lecussan, 2000).

INFORMATION

Information des voyageurs : diffusion de tous les renseignements relatifs au déplacement (horaires, tarifs, services...). Il s'agit d'aider les voyageurs à se repérer sur le réseau et sur le mode d'utilisation de ce dernier. Ceci suppose une mise en forme dans la mesure où la chaîne de l'information est encore très liée à la production et son langage technique. En cas de perturbation, l'information doit permettre aux voyageurs d'adapter leur comportement à l'évolution de la situation.

Information aux voyageurs : qui suppose davantage une stratégie de diffusion de l'information pour le bien de l'exploitant (et de l'Intérêt Général ?). Ceci peut par exemple consister à ne pas diffuser d'information sur une desserte de substitution routière pour éviter les problèmes de capacité.

Information monomodale : information ne concernant qu'un seul mode transport.

Information multimodale : mise à disposition de toute information utile et pertinente pour la préparation et l'accomplissement d'un déplacement pouvant être réalisé en utilisant plusieurs modes de transport.

Information théorique : correspond à des renseignements de base : horaires théoriques, tarifs...

Informations conjoncturelles : informations portant sur une modification de l'offre de transport (ex : travaux, grèves). Ce type d'information n'est pas nécessairement lié à des perturbations (ex : indication d'un renforcement d'une ligne lors d'un évènement particulier).

Informations temps réel : informations en direct sur la circulation des véhicules.

GRAPHES¹

Graphe : ensemble fini de points appelés sommets et ensemble de relations entre ces points appelés arcs.

Arbre : un graphe non orienté est un arbre si et seulement si chaque paire de sommets est reliée par une chaîne simple et unique.

Chaîne : « séquence d'arcs telle que chaque arc ait une extrémité commune avec l'arc précédent et l'autre extrémité commune avec le suivant. Le cardinal de l'ensemble considéré d'arcs définit la longueur de la chaîne. Sur un réseau de transport où les arcs sont nécessairement orientés, la chaîne n'a de sens que si les arcs sont symétriques, c'est-à-dire orienté dans les deux sens » (Mathis, 2003).

¹ Pour plus de définitions, voir par exemple (Mathis, 2003).

Chemin : « chaîne dont tous les arcs sont orientés dans le même sens, c'est-à-dire que l'extrémité terminale d'un arc coïncide avec l'extrémité initiale du suivant » (Mathis, 2003).

Circuit : « chemin dont l'origine coïncide avec l'extrémité finale » (Mathis, 2003).

Complétude : Un 1-graphe non-orienté et complet est un graphe où tous les sommets sont liés deux à deux (Stathopoulos, 1997).

Connexité : un graphe est connexe si et seulement si toute paire de sommets distincts est reliée par une chaîne. Un graphe est fortement connexe si et seulement s'il existe au moins un chemin entre tout couple de sommets distincts du graphe.

Planarité : un graphe est dit planaire si les arcs ne se coupent qu'en leurs extrémités. Un graphe planaire est qualifié de saturé lorsqu'on ne peut ajouter aucun arc sans lui faire perdre sa planarité.

Réalisation d'un graphe : représentation d'un graphe sur une surface.

MODELISATION

Agent : entité physique ou virtuelle :

- qui est capable d'agir dans un environnement ;
- qui peut communiquer directement avec d'autres agents ;
- qui est mue 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 cet environnement (et éventuellement aucune) ;
- qui possède des compétences et offre des services ;
- qui peut éventuellement se reproduire ;
- dont le comportement tend à satisfaire ses objectifs, en tenant compte des ressources et des compétences dont elle dispose, en fonction de sa perception, de ses représentations et communications (Ferber, 1995).

Attribut : un attribut caractérise une propriété d'une classe correspondant à une valeur attachée à chacune de ses instances (Desfray, 1996).

Classe : une classe d'objets est un modèle définissant une famille d'objets ayant des propriétés analogues. La classe d'objets décrit ces propriétés en termes d'attributs et de méthodes (Desfray, 1996).

Cybernétique : « science de la commande et de la régulation de systèmes constitués de divers éléments interdépendants » (Lange, 1976).

Encapsulation : l'encapsulation consiste à restreindre la visibilité de chaque terme employé dans un programme (méthodes, attributs, constante...) à une partie limitée du programme. Ainsi, un objet ne modifie jamais un autre objet en accédant directement aux informations gérées par ce dernier (Desfray, 1996) .

Méthodes : les méthodes d'une classe constituent l'ensemble des services que peuvent fournir les instances de cette classe. Elles spécifient la nature des messages que pourront traiter ces instances (Desfray, 1996).

Modèle systémique : s'organise par la mise en correspondance d'un système opérant (SO) et d'un système de décision (SD) par l'intermédiaire d'un système d'information (SI) (Lemoigne, 1977).

Modélisation : représentation abstraite d'un élément (problème, phénomène, idée), nous permettant de raisonner sur cet élément, pour le comprendre, pouvoir le construire ou le mettre en œuvre (Desfray, 1996).

Simulation informatique (ou numérique) : désigne un procédé selon lequel on exécute un programme informatique sur un ordinateur (ou plusieurs dans le cas d'une parallélisation) en vue de simuler un phénomène.

Système : « *complexe d'éléments en interaction* » (Bertalanffy, 1993), « *ensemble d'éléments liés par un ensemble de relations. De telle sorte que toute modification d'un élément va entraîner une modification de certains autres* » (Lesourne, 1976).

Système multi-agents : un SMA est composé des éléments suivants :

- Un environnement E, c'est-à-dire un espace disposant généralement d'une métrique ;
- Un ensemble d'objets O. Ces objets sont situés, c'est-à-dire que pour tout objet, il est possible, à un moment donné, d'associer une position dans E. Ces objets sont passifs, c'est-à-dire qu'ils peuvent être perçus, créés, détruits et modifiés par les agents ;
- Un ensemble A d'agents qui sont des objets particuliers (A inclus dans O), lesquels représentent les entités actives du système ;
- Un ensemble de relations R qui unissent des objets (et donc des agents) entre eux ;
- Un ensemble d'opérations Op permettant aux agents de A de percevoir, produire, consommer, transformer et manipuler des objets de O ;
- Des opérateurs chargés de représenter l'application de ces opérations et la réaction du monde à cette tentative de modification, que l'on appellera les lois de l'univers (Ferber, 1995).

SIGLES

AFAQ : Association Française de l'Assurance Qualité.

AFNOR : Agence Française de NORmalisation.

AMIVIF : Association Multimodale d'Information des Voyageurs en Île-de-France.

AO : Autorité Organisatrice.

ATEC : Association pour le développement des techniques de Transport, d'Environnement et de Circulation.

ATIS : Advanced Traveler Information Systems.

ATMS : Advanced Traffic Management Systems.

CERTU : Centre d'Etudes sur les Réseaux, les Transports, l'Urbanisme et les constructions publiques.

CETUR : Centre d'Etudes Techniques URbaines.

CESA : Centre d'Etudes Supérieures d'Aménagement.

CIC : Corail Inter Cités.

CIFRE : Convention Industrielle de Formation par la REcherche.

CITERES : Centre Interdisciplinaire CItés, TERritoires, Environnement et Sociétés.

CNT : Conseil National des Transports.

DEA : Diplôme d'Etudes Approfondies.

DGAC : Direction Générale de l'Aviation Civile.

DRAST : Direction de la Recherche et des Affaires Scientifiques et techniques.

EPL : Etablissement Public de la Loire.

DDT : Direction des Transports Terrestres.

ECM : Enquête Client Mystère.

EPCI : Etablissement Public de Coopérations Intercommunales.

GART : Groupement des Autorités Responsables des Transports Publics.

GRRT : Groupement Régional Nord-Pas-de-Calais pour la Recherche dans les Transports.

JOB : Jour Ouvrable Banal.

IAURIF : Institut d'Aménagement et d'Urbanisme de la Région Île-de-France.

IFOPT : Identification of Fixed Objects in Public Transport.

IGN : Institut Géographique National.

INRETS : Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité.

ITS : Intelligent Transport Systems.

LATTS : Laboratoire Techniques, Territoires et Sociétés.

LOTI : Loi d'Orientation sur les Transports Intérieurs.

MEEDDAT : Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de l'Aménagement du Territoire.

OPTILE : Organisation Professionnelle des Transports d'Ile-de-France.

PDA : Plan de Déplacements d'Administration.

PDE : Plan de Déplacements d'Entreprise.

PDU : Plan de Déplacements Urbains.

PREDIM : Plate-forme de Recherche et de Développement de l'Information Multimodale.

PREDIT : Programme national de Recherche et d'Innovation dans les Transports Terrestres.

PTU : Périmètre de Transports Urbains.

RATP : Régie Autonome des Transports Publics.

RECLUS : Réseau d'Etude des Changements dans les Localisations et les Unités Spatiales.

RER : Réseau Express Régional.

SAE : Système d'Aide à l'Exploitation.

SAEIV : Système d'Aide à l'Exploitation et à l'Information des Voyageurs.

SESP : Service d'Economie, Statistiques et Prospective du Ministère des Transports, de l'Équipement, du Tourisme et de la Mer.

SIRI : Service Interface for Real-time Information.

SNCF : Société Nationale des Chemins de Fer.

SMA : Système multi-agents.

SRU (Loi) : Solidarité et Renouvellement Urbains.

STIF : Syndicat des Transports d'Île-de-France.

TCSP : Transport en Commun en Site Propre.

TER : Transport Express Régional.

TIC : Technologies de l'Information et de la Communication.

TGV : Train à Grande Vitesse.

TRIDENT : Transport Intermodality Data Sharing and Exchange Network.

UTP : Union des Transports Publics.

BIBLIOGRAPHIE

Les documents téléchargés sur Internet sont placés à la fin de la bibliographie.

ALLARD Sophie, LAMBERT Michèle, LEBRETON Anne-Sophie, TÉRADE Annie. 1996. Gare Saint-Lazare : de la porte de la ville à l'interconnexion des transports. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin 1996, n°71, p. 25-33.

AMAR Georges. 2000. Urbaniser l'espace de transport : le Village-Services de la Défense. In BAILLY Jean-Paul, STATHOPOULOS Nikolas (dir.). *Les enjeux du transport public dans les villes européennes*, actes du colloque organisé par la mission « Prospective » de la RATP, publiés avec le soutien de la Commission Européenne, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, 2000, p. 345-349.

AMAR Georges. 1993. Pour une écologie urbaine des transports. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin-septembre 1993, n°59-60, p. 141-151.

AMAR Georges 1996. Complexes d'échanges urbains, du concept au projet. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin 1996, n°71, p. 92-99.

ANNUNZIO Dario d'. 2005. ITS : des investissements très rentables. *TEC Transport-Environnement-Circulation*, juillet-septembre 2005, n°187, p. 28-30.

AMPELAS André. 1997. L'évolution des transports collectifs urbains (TCU) et l'émergence d'une nouvelle génération grâce aux technologies de l'information. *Transports*, juin 1997, n°383, p.193-209.

ASCHER François. 1999. La RATP, outil du service public de la mobilité et acteur du dynamisme francilien. In HEURGON Edith, JARREAU Philippe. *Quand les transports deviennent l'affaire de la cité*, Parlons-en avec la RATP, La Tour d'Aigues : Editions de l'Aube, 1999, p. 15-32.

ATEC. 2000. *Transports et société de l'information*. Palais des congrès de Versailles, du 26 au 28 janvier 2000, Paris : Presses de l'école Nationale des Ponts et chaussées, 384 p.

AUBERTEL Patrice. 1999. Les gares : deux ou trois choses que les chercheurs m'ont apprises. *Flux*, octobre-décembre 1999, n°38, p. 39-46.

AUCLAIR Jean-Pierre. 2000. La sûreté de fonctionnement à la SNCF : des semailles à la moisson. *Phoebus*, 2000, n°14, p. 17-26.

AUNIS Delphine. 2003. Les gares : des nouveaux lieux de commerce au cœur des villes. *Stratégies de développement local*, février 2003, n°20, p. 6-7.

BAILLY Jean.-Paul. 2000. Un dialogue continu entre prospective, décision et action. In HEURGON Edith, JARREAU Philippe. *Quand les transports deviennent l'affaire de la cité, Parlons-en avec la RATP*, La Tour d'Aigues : Editions de l'Aube, 1999, p. 15-32.

BAILLY Jean-Paul, STATHOPOULOS Nikolas (dir.). 2000. *Les enjeux du transport public dans les villes européennes*, actes du colloque organisé par la mission « Prospective » de la RATP, publiés avec le soutien de la Commission Européenne, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, 2000, 430 p.

BAILLY Jean-Paul, STATHOPOULOS Nikolas. 2000. Villes et transports : destins croisés ?. In BAILLY Jean-Paul, STATHOPOULOS Nikolas (dir.). *Les enjeux du transport public dans les villes européennes*, actes du colloque organisé par la mission « Prospective » de la RATP, publiés avec le soutien de la Commission Européenne, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, 2000, p.9-15.

BAPTISTE Hervé. 1994. *Mise en évidence des hiérarchies urbaines par l'intermédiaire d'un graphe généré de façon aléatoire*. Mémoire de DEA : Aménagement : Université de Tours (CESA), 62p.

BAPTISTE Hervé. 1999. *Interactions entre le système de transport et les systèmes de villes : perspective historique pour une modélisation dynamique spatialisée*. Thèse de Doctorat : Aménagement de l'Espace et urbanisme : Université de Tours (CESA), 418 p.

BAPTISTE Hervé. 2003. Détermination des chemins optimaux dans un graphe temporisé. In MATHIS Philippe. *Graphes et réseaux*. Paris : Lavoisier, p. 93-112.

BAPTISTE Hervé, L'HOSTIS Alain. 2002. *Qualité de service et accessibilité régionale, évaluation multimodale des systèmes de transport en Nord-Pas-de-Calais et Languedoc-Roussillon : enjeux pour l'aménagement des territoires régionaux*. Rapport CESA/INRETS, 72 p.

BARLIER Philippe, NARDUZZI Frédéric. 2005. Les méthodologies spécifiques des activités d'ITS : l'exemple d'ACTIF. *TEC Transport-Environnement-Circulation*, juillet-septembre 2005, n°187, p. 31-33.

BARRE Alain. 2001. Gare(s) et réseaux de transports publics à Lille. In MENERAULT Philippe, BARRÉ Alain (dir.). *Gares et quartiers de gares, signes et marges : Lille, Rennes et expériences internationales (Italie, Japon, Pays-Bas)*, Actes du séminaire international du 22 mars 1999 à Villeneuve d'Ascq. Paris, Arcueil : INRETS, p. 93-100.

BAUBY Pierre. 2002. Quelle(s) régulation(s) des services publics ?. In MUSSO Philippe. *Le territoire aménagé par les réseaux*, La Tour d'Aigues : Editions de l'Aube, p. 141-148.

BAYART Denis. 1995. La machinerie de l'information voyageurs en Gare du Nord. In JOSEPH Isaac (dir.). *Gare du Nord, mode d'emploi*. Programme de recherches concertées Plan Urbain-RATP-SNCF, Paris : RATP-Editions Recherches, p. 253-324.

BAYART Denis. 1996a. La ronde des agents d'accueil en Gare du Nord. In *Equipements et métiers de la multimodalité*, Actes du séminaire « Les lieux-Mouvements de la ville » (journées des 20 octobre 1995, 3 mai et 14 juin 1996), p. 153-173.

BAYART Denis. 1996b. L'information des voyageurs en gare du nord, pertinence et organisation. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin 1996, n°71, p.113-119.

BAYART Denis. 1997. L'accueil itinérant, ou le bon génie du labyrinthe. In Bayart Denis, Borzeix Anni, Lacoste Michèle, Theureau Jacques. *Les traversées de la gare, la méthode des trajets pour analyser l'information voyageurs*, Puteaux : Ministère de l'équipement, du logement, des transports et du tourisme, DRAST, p. 61-105.

BAYART Denis. 1999. La ronde des agents d'accueil en gare du Nord. In JOSEPH Isaac (dir.). *Villes en gare*. Saint-Étienne : Editions de l'Aube, p. 193-211.

BEAU Nicolas. 2004. *SNCF : la machine infernale*. Paris : le cherche Midi, 265 p.

BEAUD Michel. 2003. *L'art de la thèse : comment préparer et rédiger une thèse de doctorat, un mémoire de DEA ou de maîtrise ou tout autre travail universitaire*. Paris : La découverte, 196 p.

BEAUVAIS Jean-Marie, 1995. 25 ans de priorité aux transports collectifs. *Transports Urbains*, mars 1995, n°86, p. 3-4.

BEGAG Azouz, CLAISSE Gérard. 1989. Le paradoxe message-médium-Usagers recherchent informations. Minitel recherche usagers. *Déplacements*, 1989, n°1, p. 15-23.

BELLANGER François, MARZLOFF Bruno. 1996. Transit. *Les lieux et les temps de la mobilité*. Saint-Etienne : Editions de l'Aube, 313 p.

BELLET Thierry, TATTEGRAIN-VESTE Hélène. 2000. Modélisation et simulation cognitive du conducteur automobile. In ATEC. *Transports et société de l'information*. Palais des congrès de Versailles, du 26 au 28 janvier 2000, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, p. 63-72.

BENAISSA Amine, CAYEZ Corinne. 2001. *Analyse comparative de trois pôles d'échanges en Ile de France : Massy, Roissy, Chessy*. Rapport pour le Ministère de l'Équipement, des transports et du logement. Institution de sociologie urbaine, Paris, 133 p.

BENSON Brien. 2001. Transportation information systems. In BUTTON Kenneth-J., HENSHER David-A. *Handbook of transport systems and traffic control*, Oxford : Pergamon, Elsevier science Ltd, p. 477-487.

BERTALANFFY Ludwig Von. 1973. *Théorie générale des systèmes*. Traduit par CHABROL Jean-Benoist. Paris : Dunod, 296 p.

BERTOLINI Luca. 1996. Des gares en transformation, nœuds de réseaux et lieux dans la ville. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin 1996, n°71, p. 86-91.

BHOURI Neila. 2002. *Intermodalité : bilan et perspectives des systèmes informatiques*. Rapport de Convention DTT, INRETS, 94 p.

BHOURI Neila, SCEMAMA Gérard. 2002. Intermodalité : bilan et perspectives des systèmes informatiques, In *Nouveaux enjeux : le transport doit s'adapter*, Congrès international francophone, Paris, 23 et 24 janvier 2002, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, p. 218-230.

BIEBER Alain, ORFEUIL Jean-Pierre. 1993. La mobilité urbaine et sa régulation. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin-septembre 1993, n°59-60, p. 127-139.

BLANCHER Philippe. 1998. *Risques et réseaux techniques urbains*. Lyon : CERTU, 169 p.

BLAQUIÈRE Alexandre. 2002. Organisation et gestion de l'information dans le cadre d'une coopération entre exploitants. In *Nouveaux enjeux : le transport doit s'adapter*, Congrès international francophone, Paris, 23 et 24 janvier 2002, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, p. 191-198.

BOILLOT Florence, LEBACQUE Jean-Patrick. *Modélisation du trafic*, Actes du groupe de travail n°90, Arcueil : INRETS, p. 129-148.

BONNAFOUS Alain. 2000. Saturation de la route et report sur le rail. *Annales des Ponts et Chaussées*, octobre-décembre 2000, n°96, p. 4-10.

BONSALL Peter W. 2000. Travellers' response to uncertainty. In BELL Michael G-H, CASSIR Chris. *Reliability of transport networks*, Research Studies Press, Baldock, p. 1-10.

BORD Janet, LAMBER Jean-Clarence. 1977. *Labyrinthes et dédales du monde*, traduit de l'anglais par PASLARIU Irina, Paris : Les Presses de la Connaissance, 186 p.

BORZEIX Anni. 1995. Un rouage ultime, l'annonce sonore. In JOSEPH Isaac (dir.). *Gare du Nord, mode d'emploi*, Programme de recherches concertées Plan Urbain-RATP-SNCF, Paris : RATP-Editions Recherches, p. 325-373.

BOTQUELEN Yohann. 2004. *Plus courts chemins dans graphes sous contraintes d'horaires*, Projet de Fin d'Etudes : Informatique : Université Polytechnique de Tours, 54 p.

BOULLIER Dominique. 1996a. Les automates de Montparnasse. Les transactions, les agents...et les usagers ?. In *Equipements et métiers de la multimodalité*, Actes du séminaire « Les lieux-Mouvements de la ville » (journées des 20 octobre 1995, 3 mai et 14 juin 1996), p. 7-38.

BOULLIER Dominique. 1996b. Les automates de Montparnasse. Les transactions, les agents...et les usagers. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin 1996, n°71, p. 101-111.

BOULLIER Dominique. 1999. Les voyageurs et les objets en régime automatique. In JOSEPH Isaac (dir.). *Villes en gare*. Saint-Étienne : Editions de l'Aube, p. 291-307.

BOULLIER Dominique, JUGUET Stéphane, MASSOT Marie-Hélène, USTER Guillaume. 2004. *MOBILURB : information multimodale pour une assistance informationnelle contextualisée*, GRADIENT (Costech-UTC), INRETS, rapport final pour le PREDIT 1996-2000, 178 p.

BOWIE Karen. 1996. De la gare du XIXe siècle au lieu-mouvement, évolution ou rupture ?. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin 1996, n°71, p. 14-23.

BOWIE Karen. 1999. Les gares du Nord et de l'Est au siècle dernier. In JOSEPH Isaac (dir.). *Villes en gare*. Saint-Étienne : Editions de l'Aube, p.33-44.

BRÉHERET Laurent, HENRY Jean-Jacques. 2000. L'information sur les déplacements : outil d'exploitation du trafic ?. In ATEC. *Transports et société de l'information*. Palais des congrès de Versailles, du 26 au 28 janvier 2000, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, p. 203-216.

BRUGEROLLES Arlette. 1989. Gestion du temps et moments intermédiaires. *Déplacements*, 1989, n°1, p. 53-58.

BULTEAU Stéphane. 1997. *Etude topologique des réseaux de communication : fiabilité et vulnérabilité*. Thèse de Doctorat : Informatique : Université de Rennes 1.

BUTTON Kenneth-J., HENSHER David-A. 2001. *Handbook of transport systems and traffic control*, Oxford : Pergamon, Elsevier science Ltd, 602 p.

CABIRON Christine. 2003. Rassurer et alerter les usagers. *Transport Public*, janvier 2003, p. 42-43.

CAMBON DE LAVALETTE Brigitte. L'information sur les durées de parcours. Modélisation de l'activité cognitive impliquée. *Recherche Transports Sécurité*, septembre 2002, n°76, p. 222-236.

CAMBON DE LAVALETTE Brigitte, DORE Jocelyne, TIJUS Charles. 2001. *La signalétique : conception, validation, usages*, Actes de la journée d'étude du 15 novembre 1999, Arcueil : INRETS, 2001, 145 p.

CAMBON DE LAVALETTE Brigitte, POITRENAUD Sébastien. 2004. Incidences de l'information "temps de parcours" sur les décisions adoptées par les usagers des voies rapides urbaines. In ARON Maurice, BOILLOT Florence, LEBACQUE Jean-Patrick. *Modélisation du trafic*, Actes du groupe de travail n°90, Arcueil : INRETS, p. 149-158.

CARRIÈRE Bruno. 2002. Centre national des opérations SNCF : pister les trains pour mieux informer le client. *La vie du rail et des transports, édition professionnelle*, n°214, janvier 2002, p. 24-29.

CARRIÈRE Bruno. 2002. Trois mètres par seconde de la gare au métro. *Rail & transports*, juin 2002, n°238, p. 40-44.

CARRIÈRE Bruno, LEROUX Albert. 2002. Gares : le confort acoustique, ça compte aussi. *La vie du rail et des transports, édition professionnelle*, n°214, janvier 2002, p. 36-42.

CARTIER Régis, 2000. Conduite des études de sécurité pour le matériel roulant MP89. *Phoebus*, 2000, n°14, p. 57-62.

CELLIER Jean-Marie. 1990. L'erreur humaine dans le travail. In LEPLAT Jacques, TERSSAC Gilbert de. *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*, Marseille : Octares/Entreprises, p. 193-209.

CERTU. 1996. Complémentarité des modes de transport, projet d'agglomération et schéma de voirie. Lyon : CERTU, 93 p.

CERTU. 1999. *Les grands groupes français de transport de voyageurs : histoire, stratégies, diversification*. Ouvrage conçu et réalisé par ALLAIN Jean-Pierre. Lyon : CERTU, 430 p.

CERTU. 2004. *Les modes de transports collectifs urbains. Eléments de choix pour une approche globale des systèmes*. Lyon : CERTU, 192 p.

CERTU et UTP. 1996. *Les systèmes automatiques d'information*. Lyon : CERTU, 207 p.

CHAPELON Laurent. 1997. *Offre de transport et aménagement du territoire : évaluation spatio-temporelle des projets de modification de l'offre par modélisation multi-échelles des*

systèmes de transport. Thèse de Doctorat : Aménagement de l'espace et urbanisme : Université de Tours (CESA), 558 p.

CHAPELON Laurent (dir.). 2005. *Conception de services régionaux de transport public et optimisation de l'offre*. PREDIT "Nouveaux services aux usagers", Groupe opérationnel n°2 "Services de mobilité", 213 p.

CHARDONNEL Sonia. 2001. La time-geography : les individus dans le temps et l'espace. In SANDERS Léna (dir.). *Modèles en analyse spatiale*, Paris : Hermès science Publications, p. 129-156.

CHENIER M. 1996. *Vers une plus grande prise en compte du facteur risque en aménagement : le POS est-il un processus d'apprentissage face aux inondations ?* Dossier de magistère 3 : Aménagement : Université de Tours (CESA).

CHESNAIS Marion. 1990. Erreur, facteur de risque ou prise de risque, facteur d'erreur ?. In LEPLAT Jacques, TERSSAC Gilbert de. *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*. Marseille : Octares/Entreprises, p. 211-221.

CHESNAIS Michel. 1980. *Transports et espace français*. Paris : Masson, 212 p.

CHESNAIS Michel. 1991. *Réseaux en évolution*, Caen : Paradigme, 167 p.

CHEVRIER Stéphane, JUGUET Stéphane. 2004. Des voyageurs pas si bêtes. *Sciences humaines*, janvier 2004, n°145, p. 32-35.

CHOAY Françoise, MERLIN Pierre. 1988. *Dictionnaire de l'urbanisme et de l'aménagement*. Paris : Presses Universitaires de France, 863 p.

CLAISSE Gérard. 2002. *Hybridation des services et logiques de l'ubiquité*. In MUSSO Pierre. *Le territoire aménagé par les réseaux*, La Tour d'Aigues : Editions de l'Aube, p. 99-116.

CLAISSE Gérard, ROWE Fred. 1994. *Télécommuniquer dans trente ans : incidences sur la mobilité*, Actes du colloque « *Se déplacer au quotidien dans trente ans* », organisé par l'ADEME, le Centre de Prospective de la DRAST et l'INRETS les 22 et 23 mars 1994, Paris : La documentation française, p. 125-138.

CLAVEL Gilles, FAGART Nicolas, GRENET David, MIGUÉIS Jorge. 2000. *C++*. *La synthèse, concepts objet, standard ISO et modélisation UML*. Paris : Dunod, 319 p.

CNT. 1999. *Les transports et l'environnement : vers un nouvel équilibre*. Rapport du groupe de travail présidé par Alain Bonnafous, Paris : La documentation française, 175 p.

COLLET Claude. 1992. *Systèmes d'information géographique en mode image*, Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 186 p.

Commissariat Général du Plan. 2003. *Transports urbains: quelles politiques pour demain ?*. Rapport du groupe présidé par Roland Ries. Paris : La documentation française, 147 p.

Commission Européenne. 2001a. *Livre blanc : la politique européenne des transports à l'horizon 2010 : l'heure des choix*. Luxembourg : Office des publications officielles des Communautés européennes, 127 p.

Commission Européenne. 2001b. *Panorama des transports : aperçu statistique des transports par route, chemin de fer, voies navigables et air dans l'Union Européenne, données : 1970-1999*. Luxembourg : Ed. Eurostat, Office des publications officielles des Communautés européennes, 83 p.

COQUIO Julien. 2003. *La vulnérabilité des transports en commun : dans quelle mesure l'information dans les pôles d'échanges participe-t-elle à la régulation de situations perturbées ?*. Mémoire de DEA : Aménagement : Université de Tours (CESA), 107 p.

COTTINET Marcel. 1998. Caractéristiques et principales applications des systèmes de localisation des mobiles, *RTS Recherche Transports Sécurité, Spécial Systèmes intelligents de transport*, octobre-décembre 1998, n°61, p. 35-37.

COUTARD Olivier. 2000. La théorie économique et la congestion dans les réseaux. *Annales des Ponts et Chaussées*, octobre-décembre 2000, n°96, p. 43-48.

CUKIERMAN Daniel. 1999. Les gares en l'an 2000. *Le Rail*, février-mars 1999, n°73, p. 27-29

DAAMEN Winnie, BOVY Piet H.-L. HOOGENDOORN Serge-P. 2001. Modelling pedestrians in transfer stations. In SCHRECKENBERG M., SHARMA S-D (dir.). *Pedestrian and Evacuation Dynamics*, Duisburg, Allemagne : Springer Verlag, p. 59-73.

DAMON Julien. 1996. La gare des sans-abri, miroir de la question sociale. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin 1996, n°71, p. 120-125.

DAUPHINE Alain. 2001. *Risques et catastrophes : observer, spatialiser, comprendre, gérer*. Paris : Armand Colin, 288 p.

DEBUIGNE Tristan. 2002. Trafic et environnement, la simulation comme outil d'aide à la décision. In *Nouveaux enjeux : le transport doit s'adapter*, Congrès international francophone, Paris, 23 et 24 janvier 2002, Presses de l'École Nationale des Ponts et chaussées, p. 210-217.

DECOUPIGNY Christophe. 2006. *Modélisation fine des émissions de polluants issues du trafic en milieu urbain*», Thèse de Doctorat : Aménagement de l'espace et urbanisme : Université de Tours (CESA).

DECOUPIGNY Fabrice. 2000. *Accès et diffusion des visiteurs sur les espaces naturels : modélisation et simulations prospectives*. Thèse de Doctorat : Aménagement de l'Espace et urbanisme : Université de Tours (CESA), 401 p.

DEJEAMMES Maryvonne, PAUZIE Anne. 1989. Acceptabilité des systèmes d'aide à l'information des usagers de transports collectifs. In *Vidéodéplacements : le mariage de l'électronique et des transports publics*, CETUR, p. 25-30.

DEMORAES Florent. 2004. *Mobilité, enjeux et risques dans le District Métropolitain de Quito*. Thèse de Doctorat : Géographie, Université de Savoie, 351 p.

DENIZON Jean-Marc. 1999. Diffusion de l'information "temps de parcours" sur autoroute interurbaine. *TEC Transport-Environnement-Circulation*, 1999, n°156, p. 20-23.

DEPARIS Jean-Pierre, KHOUDOUR Louadhi, AUBERT Didier, LIONTI Roselin. 1999. Outils télématiques pour l'amélioration des transports publics. Exemple du projet européen Cromatica, *RTS Recherche Transports Sécurité*, Spécial Systèmes intelligents de transport, janvier-mars 1999, n°62, p. 49-55.

DEPRAS Francine. 1989. Le système d'information télématique métro à Dunkerque. *Déplacements*, 1989, n°1, p.45-52.

DESCAMPS Alain. 2001. Une vision critique de la normalisation dans les transports intelligents. *Annales des Ponts et Chaussées*, avril-juin 2001, n°98, p. 4-9.

DESCOURS Charles. 1997. *Quels enjeux pour les transports publics ?*. 7èmes rencontres parlementaires sur les transports, Actes du colloque, Paris : M&Conseil Organisation-Edition-Communication, 120 p.

DESFRAY Philippe. 1996. *Modélisation par objets, la fin de la programmation*. Paris : Masson, 360 p.

DESFRAY Pierre. 2000. Le rôle de l'Etat en matière d'autorisation de mise en service de nouveaux systèmes sur le réseau ferré national. *Phoebus*, 2000, n°14, p. 9-15.

DRAST. 1999. *La modélisation des déplacements intermodaux*. Programme de recherche et de développement pour l'innovation et la technologie dans les transports terrestres, 85 p.

DREWE Paul, JOIGNAUX Guy. 2002. Réseaux et territoires : retour sur quelques mythes. In MUSSO Pierre. *Le territoire aménagé par les réseaux*. La Tour d'Aigues : Editions de l'Aube, p. 35-54.

DUBUISSON Sophie, HENNION Antoine, RABEHARIS Volona. 1999. Passages et arrêts en gare : border son temps, flotter, se réengager. In JOSEPH Isaac (dir.). *Villes en gare*. Saint-Étienne : Editions de l'Aube, p. 213-241.

DUCHEMIN Cyril. 1999. Gares et commerces : un mariage d'avenir. *Le Rail*, février-mars 1999, n°73, p. 24-27.

DUCHEMIN Jacques. 2002. Le concept de la gare ferroviaire est-il dépassé ?. *Revue Générale des Chemins de Fer*, juillet-août 2002, p. 25-30.

DUCHÊNE Chantal. Le plan de déplacements urbains en Ile-de-France. In BAILLY Jean-Paul, STATHOPOULOS Nikolas (dir.). *Les enjeux du transport public dans les villes européennes*, Actes du colloque organisé par la mission « Prospective » de la RATP, publiés avec le soutien de la Commission Européenne, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, 2000, p. 71-77.

DUPIN Stéphane. 2003. *Le langage C++*. Paris : CampusPress, 425 p.

DUPUY Gabriel. 1991. *L'urbanisme des réseaux : théories et méthodes*. Paris : Armand Colin, 198 p.

DUPUY Gabriel. 1999. *La dépendance automobile : symptômes, analyses, diagnostic, traitements*. Paris : Anthropos, Ed. Economica, 157 p.

DURAND Daniel. 1979. *La systémique*. Paris : Presses Universitaires de France, Que sais-je ?, 127 p.

DURAND-DASTÈS François. 2001. Les concepts de la modélisation en analyse spatiale. In SANDERS Léna (dir). *Modèles en analyse spatiale*. Paris : Hermès science Publications, p. 31-59.

DURRANDE-MOREAU Agnès. 1994. *Qualité de service et perception du temps : l'attente, propositions théoriques et études empiriques*. Thèse de Doctorat : Sciences de gestion : université de Grenoble 2, 385 p.

EMMERINK R., NIJKAMP P., RIETVELD P. 1992. *The role of information in the performance of transport networks*. Université d'Amsterdam, serie research memoranda, 21 p.

FADIER Elie. 1990. Fiabilité humaine : méthodes d'analyse et domaines d'application. In LEPLAT Jacques, TERSSAC Gilbert de. *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*. Marseille : Octares/Entreprises, p. 47-80.

FALCHI Marc. 2000. La congestion dans le mode ferroviaire. *Annales des Ponts et Chaussées*, octobre-décembre 2000, n°96, p.11-18.

FERBER Jacques. 1995. *Les systèmes multi-agents : vers une intelligence collective*. Paris : InterEditions, 522 p.

FLEURY Dominique. 1990. La prise en compte des activités dans la conception des véhicules et des infrastructures routières. In LEPLAT Jacques, TERSSAC Gilbert de. *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*. Marseille : Octares/Entreprises, p. 311-329.

FOURNIER Jacques. 1993. *Le train, l'Europe et le service public*. Paris : Editions Odile Jacob, 260 p.

FRANKHAUSER Pierre, PUMAIN Denise. 2001. Fractales et géographie. In SANDERS Léna (dir.). *Modèles en analyse spatiale*. Paris : Hermès science Publications, p. 301-329.

GADBOIS Charles. 1990. Dimensions temporelles de l'action et fiabilité des systèmes socio-techniques. In LEPLAT Jacques, TERSSAC Gilbert de. *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*. Marseille : Octares/Entreprises, p. 159-187.

GASPARINI Giovanni. 1999. Temps ferroviaire et temps des voyageurs. L'attente en gare. In JOSEPH Isaac (dir.). *Villes en gare*. Saint-Étienne : Editions de l'Aube, p. 136-153.

GART. 1999. *Cultures et transport public*. Paris : GART, 106 p.

GART, CERTU. 2000. *Suivi national des plans de déplacements urbains*. Lyon : CERTU, 97 p.

GÉRONDEAU Christian. 2003. *La saga du RER et le maillon manquant*. Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, 200 p.

GÉRONDEAU Christian. 2004. *SNCF, Transports publics et autres : les danseuses de la République*. Paris : L'Harmattan, 287 p.

GILLE Laurent. 1996. Transition et transaction : problématiques. In *Equipements et métiers de la multimodalité*, Actes du séminaire « Les lieux-Mouvements de la ville » (journées des 20 octobre 1995, 3 mai et 14 juin 1996), p. 175-188.

GILLE Laurent. 1999. Du rapport entre pôle et place d'échange. In JOSEPH Isaac (dir.). *Villes en gare*. Saint-Étienne : Editions de l'Aube, p. 111-125.

GILLE Laurent. 2000. Les télécommunications : un enjeu majeur pour les transports publics. In BAILLY Jean-Paul, STATHOPOULOS Nikolas (dir.). *Les enjeux du transport public dans les villes européennes*, Actes du colloque organisé par la mission « Prospective » de la RATP, publiés avec le soutien de la Commission Européenne, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, 2000, p. 334-338.

GIRARD Amelise, GIRARD Roger. 1999. Place de la gare et centralités urbaines à Strasbourg : 1870-1894. In JOSEPH Isaac (dir.). *Villes en gare*. Saint-Étienne : Editions de l'Aube, p. 45-78.

GLEYZE Jean-François. 2001. Apport de l'information géographique dans l'analyse des risques. Application à l'étude des perturbations du réseau routier à la suite de catastrophes. *Bulletin d'information de l'IGN*, 2001, n°72, p. 69-85.

GLEYZE Jean-François. 2005. *La vulnérabilité structurelle des réseaux de transport dans un contexte de risques*. Thèse de Doctorat : Géographie : Université Paris 7, 539 p.

GOGUE Jean-Marie. 2000. *Traité de la qualité*. Paris : Ed. Economica, 450 p.

GOUNANT Serge, DARMON Richard, GUASCH Marc, QUARD Jean-Louis. 2000. Un système d'information dynamique des voyageurs pour le réseau des bus TCL de l'agglomération lyonnaise. In ATEC. *Transports et société de l'information*. Palais des congrès de Versailles, du 26 au 28 janvier 2000, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, p. 293-298.

GOUSSOT Michel. 1999. *Les transports en France*. Paris : Armand Colin, 95 p.

GUILLEVIC Christian. 1990. L'appropriation cognitive de l'outil : condition de la fiabilité dans les situations de transferts de technologie. In LEPLAT Jacques, TERSSAC Gilbert de. *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*. Marseille : Octares/Entreprises, p.141-158.

HARZO Christian, FAVRE-MERCURET Virginie, COUTY Frédéric, CLERGET Marie-Pierre. 2001. *Déplacements et inégalités. Les usagers face à l'information diffusée par les réseaux de transports collectifs urbains. Rapport final*. Lyon : Observatoire Social de Lyon, 114 p.

HAUMONT Antoine. 1993. La mobilité intra-urbaine. Rétrospective et prospective. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin-septembre 1993, n°59-60, p. 109-118.

HAYAT Saïd (dir.). 2001, *Amélioration de la qualité des correspondances dans les réseaux de transports urbains*. GRRT, projet coopératif, Villeneuve d'Ascq, 284 p.

HEBBING Dirk, MOLNAR Peter. 2001. Modélisation et simulation des flux de piétons. In ARON Maurice, BOILLOT Florence, LEBACQUE Jean-Patrick. *Modélisation du trafic*, Actes du groupe de travail, n°74, Arcueil : INRETS, p. 53-79.

HEURGON Edith. 1999. Le service public d'accessibilité en Île-de-France : quel rôle pour la RATP ?. In HEURGON Edith, JARREAU Philippe. *Quand les transports deviennent l'affaire de la cité*, Parlons-en avec la RATP, La Tour d'Aigues : Editions de l'Aube, 1999, p. 15-32.

HEURGON Edith. 2000. Villes et transports de demain : la démarche prospective de la RATP. In BAILLY Jean-Paul, STATHOPOULOS Nikolas (dir.). *Les enjeux du transport public dans les villes européennes*, Actes du colloque organisé par la mission « Prospective »

de la RATP, publiés avec le soutien de la Commission Européenne, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, 2000, p. 49-56.

HOLM Elmar, SANDERS Léna. 2001. Modèles spatiaux de microsimulation. In SANDERS Léna (dir.). *Modèles en analyse spatiale*. Paris : Hermès science Publications, p. 187-217.

HUBERT Gilles, LEDOUX Bruno. 1999. *Le coût du risque : l'évaluation des impacts socio-économiques des inondations*. Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, 232 p.

HUSKA-CHIROUSSEL Véronique. 2001. Intermodalité et utilisation d'une information figurative dans l'aide au déplacement. In CAMBON DE LAVALETTE Brigitte et alii. *La signalétique : conception, validation, usages*, Actes de la journée d'étude du 15 novembre 1999, Arcueil : INRETS, p. 61-76.

HWANG Mimi, KEMP James, LERNER-LAM Eva, NEUERBURG Nancy, OKUNIEFF Paula. 2006. *Advanced public transportation systems : the state of the art update 2006*, edited by John Schiavone, 264 p.

IAURIF. 2002. *Les contrats départementaux de sécurité dans les transports en commun d'Île-de-France*, Paris, 19 p.

IGNAZI Gérard, KÉRAVEL Francine. 2000. Ergonomie de la mobilité quotidienne. *Transports Urbains*, janvier-mars 2000, n°102, p.7-12.

JANNIN Géraldine. 2000. *L'information des voyageurs : étude comparative. Les systèmes d'information des voyageurs : quelle(s) stratégie(s) de communication ?*. Thèse de Doctorat : Sciences de l'information et de la communication : Université de Bordeaux 3, 399 p.

JEUDY H.-P. 1989. Sécurité et stratégies de communication. *Déplacements*, 1989, n°1, p. 59-65.

JOIGNAUX Guy. 2002. Transport et territoire. In MUSSO Pierre. *Le territoire aménagé par les réseaux*, La Tour d'Aigues : Editions de l'Aube, p. 55-70.

JOSEPH Isaac (dir.). 1995. *Gare du Nord, mode d'emploi*, Programme de recherches concertées Plan Urbain-RATP-SNCF. Paris : RATP-Editions Recherches, 374 p.

JOSEPH Isaac. 1996. Ariane et l'opportunisme méthodique. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin 1996, n°71, p. 5-13.

JOSEPH Isaac (dir.). 1999. *Villes en gare*. Saint-Etienne : Editions de l'Aube, 308 p.

JOSEPH Isaac. 2000. La ville écologique et l'utopie de l'espace providence. In BAILLY Jean-Paul, STATHOPOULOS Nikolas (dir.). *Les enjeux du transport public dans les villes*

européennes, Actes du colloque organisé par la mission « Prospective » de la RATP, publiés avec le soutien de la Commission Européenne, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, 2000, p. 299-302.

JOURNET Marie-Laure, 1996. *Définition d'une typologie fonctionnelle des gares et hiérarchisation des besoins d'information*. Rapport de stage de DESS : Transports urbains et régionaux de voyageurs : Université Lumière Lyon 2, ENTPE, 72 p.

KHADDOUR Ossama. 2005. *Modélisation individu-centrée des espaces de communication dans la ville : vers une modernisation de la représentation de l'environnement urbain au Levant*. Thèse de Doctorat : Aménagement de l'espace et urbanisme : Université de Tours (CESA).

KAMINAGAI Yo. 1989. La stratégie d'information des voyageurs à la RATP. *Déplacements*, 1989, n°1, p. 67-73.

KAUFMANN Vincent, JEMELIN Christophe. 2002. Automobile et habitat périurbain : entre désirs et réalités. In *Nouveaux enjeux : le transport doit s'adapter*, Congrès international francophone, Paris, 23 et 24 janvier 2002, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, p. 143-150.

KAUFMANN Vincent, JEMELIN Christophe, MARGAIL Fabienne. L'information au service de l'intermodalité. In ATEC. *Transports et société de l'information*. Palais des congrès de Versailles, du 26 au 28 janvier 2000, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, p.163-170.

KAUFMANN Vincent, SAGER Fritz, FERRARI Yves, JOYE Dominique. 2003. *Coordonner transports et urbanisme*. Lausanne : Presses polytechniques et universitaires romandes, 220 p.

KAUV Juliette, KUHN Francis. 1999. *La qualité de service : application aux transports collectifs urbains*. Arcueil : INRETS, 84 p.

KEYZER Véronique de. 1990. Fiabilité humaine et la gestion du temps dans les systèmes complexes. In LEPLAT Jacques, TERSSAC Gilbert de. *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*, Marseille : Octares/Entreprises, p. 85-108.

KOLM Serge-Christophe. 1968. *La théorie économique générale de l'encombrement*. Paris : SEDEIS, 82 p.

KOTOW Elise, RIFFARD Sylvain, BARRE Alain, MENERAULT Philippe. 2001. Espaces et planification : Gare(s), centre(s) et centralité(s) à Lille. Continuités et ruptures. In MENERAULT Philippe, BARRÉ Alain (dir.). *Gares et quartiers de gares, signes et marges : Lille, Rennes et expériences internationales (Italie, Japon, Pays-Bas)*, Actes du séminaire international du 22 mars 1999 à Villeneuve d'Ascq, Arcueil : INRETS, p. 21-44.

KÜNKEL Frédéric. NOUVIER Jacques. 2001. Nouvelles technologies et signalétique urbaine. in CAMBON DE LAVALETTE Brigitte et alii. *La signalétique : conception, validation, usages*, Actes de la journée d'étude du 15 novembre 1999, Arcueil : INRETS, p. 131-143.

LACOMME Philippe., PRINS Christian, SEVAUX Marc. 2003. *Algorithmes de graphes*. Paris : Eyrolles, 411 p.

LACOSTE Michèle, LEVY Emmanuelle. 1994. *A la recherche de l'information voyageurs*. Centre de recherche en gestion de l'école polytechnique, rapport effectué pour le compte de la RATP, SNCF et Plan urbain, Paris, 154 p.

LACOSTE Michèle. 1997. L'information à visage humain : la place des agents dans un système d'information-voyageur. In Bayart Denis, Borzeix Anni, Lacoste Michèle, Theureau Jacques. *Les traversées de la gare, la méthode des trajets pour analyser l'information voyageurs*, Puteaux : Ministère de l'équipement, du logement, des transports et du tourisme, DRAST, p. 21-59.

LAFERRE Dominique. 1999. Organisation de la gestion multimodale des pôles d'échanges urbains. *Transport Public International*, janvier 1999, n°1, p. 26-29.

La Gazette des Communes. 2002. *Les nouveaux défis des transports publics*, n°1663, 7 octobre 2002/

LAICHOOR Hakim. 2002. *Modélisation multi-agent et aide à la décision : application à la régulation des correspondances dans les réseaux de transport urbain*. Thèse de Doctorat : Automatique et Information Industrielle : Université de Lille, 204 p.

LAMBOLEY Christian, JAMES B. 2001. L'apport des nouvelles technologies dans la gestion du trafic urbain : l'expérience de Paris. In PHILIPPE Georges (dir.). *Les transports intelligents*, Paris : Hermès science, p.39-57.

LAMMING Clive. 2002. *Paris ferroviaire : gares, lignes oubliées, trains célèbres, curiosités, dépôts, matériels*. Paris : Parigramme, 190 p.

LANGE Oskar. 1976. *Introduction à l'économie cybernétique*. Traduit de l'anglais par BERLER-LANGLOIS Anne, Paris : Sirey, 161 p.

LANGLAIS Alain, CHARPENTIER Catherine, MOTTE Cédric, KHOUDOUR Louadhi, PIAN Christian. 1999, *Analyse des besoins des usagers*, INRETS, PREDIT 4.4, 162 p.

LAPPIN Jane, BOTTOM Jon. 2001. *Understanding and predicting traveler response to information : a literature review*, prepared for U.S Department of Transportation, 339 p.

LARRIBE Sébastien. 1999. Représentations *auto-centrées et interactives d'un réseau d'acteurs en aménagement*. Thèse de Doctorat : Aménagement de l'espace et urbanisme, Université de Tours (CESA), 233 p.

LASSAVE Pierre. Vidéodéplacement-Présentation de recherches en sciences sociales appliquées aux Systèmes Automatiques d'Information des voyageurs des transports publics. *Déplacements*, 1989, n°1, p. 7-13

LATTS. 2001. *Intermodalités et interfaces, comprendre les usages pour guider les décisions*. Marne-la-Vallée, 163 p.

LE MOIGNE Jean-Louis. 1977. *La théorie du système général : théorie de la modélisation*. Paris : Presses Universitaires de France, 338 p.

LECOMTE Nathalie, PATESSON René. 2000. *Le panel des voyageurs : une étude des activités et des besoins d'information des utilisateurs des transports publics*, article publié dans les Actes de la conférence ERGO-IHM Biarritz, du 3 au 6 octobre 2000.

LECUSSAN Régis. 2000. La sécurité passive à la SNCF. *Phoebus*, 2000, n°14, p.37-40.

LEFÈVRE Claude. 2001. *Le labyrinthe- un paradigme du monde de l'interconnexion. Applications à l'urbanisme, l'esthétique et l'épistémologie*. Rennes : Presses universitaires de Rennes, 255 p.

LEGRAND Roland. 2004. La Maîtrise d'Ouvrage des Gares de la SNCF. *Revue Générale des Chemins de Fer*, novembre 2004, p. 47-51.

LELONG Vincent, GAULT Laurent. 2000. Le service infolignes : solution innovante pour l'information essentielle des voyageurs au point d'attente. In ATEC. *Transports et société de l'information*. Palais des congrès de Versailles, du 26 au 28 janvier 2000, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, p. 369-373.

LELONG Vincent, GAULT Laurent. 2001. L'information essentielle des voyageurs au point d'attente. *Annales des Ponts et chaussées*, avril-juin 2001, n°98, p. 18-21.

LEPLAT Jacques, TERSSAC Gilbert de. 1990. *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*. Marseille : Octares/Entreprises, 383 p.

LESOURNE Jacques. 1976. *Les systèmes du destin*. Paris : Dalloz, 449 p.

LEURENT Fabien. 2004. L'information dynamique sur les temps de parcours : position statistique, effet sur le choix d'horaire, mécanisme d'apprentissage. In ARON Maurice,

LEVY Emmanuelle, LACOSTE Michèle. 1995. Trajets voyageurs et information en face à face. In JOSEPH Isaac (dir.). *Gare du Nord, mode d'emploi*. Programme de recherches concertées Plan Urbain-RATP-SNCF. Paris : RATP-Editions Recherches, p. 137-251.

LEVY Emmanuelle. 1999a. *L'inscription des voyageurs dans la production du transport urbain. Le cas de la RATP-BUS*. Thèse de Doctorat : Sciences de gestion : Ecole polytechnique, 369 p.

LEVY Emmanuelle. 1999b. Saisir l'accessibilité : les trajets voyageurs à la gare du Nord. In JOSEPH Isaac (dir.). *Villes en gare*. Saint-Étienne : Editions de l'Aube, p. 242-258.

L'HOSTIS Alain. 1997. *Images de synthèse pour l'Aménagement du territoire, la déformation de l'espace par les réseaux de transport rapides*. Thèse de Doctorat : Aménagement de l'espace et urbanisme : Université de Tours, 306p.

LIBERTY Jesse. 2002. C++. Traduit de l'américain par SILHOL Christiane. Paris : CampusPress, 425 p.

LUCA Edmond. 2002. Evolution de la conception de transports collectifs urbains pour mieux répondre aux besoins. In *Nouveaux enjeux : le transport doit s'adapter*, Congrès international francophone, Paris, 23 et 24 janvier 2002, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, p. 287-298.

LYONS Glenn-D. 2001. Towards integrated traveller information. *Transport reviews*, 2001, vol. 21, n°2, p. 217-235.

MANTILLERI Roland, ROSSEL Pierre. 2000. Swissmetro : une innovation radicale dans le domaine des transports. In ATEC. *Transports et société de l'information*. Palais des congrès de Versailles, du 26 au 28 janvier 2000, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, p.102-118.

MARGAIL Fabienne, DONIOL-SHAW Ghislaine. 1996. Multimodalité et multifonctionnalité : la gestion du pôle d'échanges de Gallieni-Porte de Bagnolet. In *Equipements et métiers de la multimodalité*, Actes du séminaire « Les lieux-Mouvements de la ville » (journées des 20 octobre 1995, 3 mai et 14 juin 1996), p. 93-119.

MARGAIL Fabienne, DONIOL-SHAW Ghislaine, LEGENDRE D'ANFRAY Pascale. La gestion du pôle Gallieni-porte de Bagnolet. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin 1996, n°71, p. 127-136.

MARTIN-LAMELLET Claude., PACHIAUDI Georges, LE BRETON-GADEGBEKU Blandine, MATHELIN Valérie, MARTINS Rita. Besoins en information et problèmes d'utilisation des transports ferroviaires par les personnes déficientes visuelles. *RTS Recherche Transports Sécurité*, janvier-mars 2001, n°70, p.3-12.

MARTOUZET Denis. 1995. *Recherche du fondement de l'éthique de l'aménagement*. Thèse de Doctorat : Aménagement de l'espace et urbanisme : Université de Tours (CESA).

MARTOUZET Denis. 2002a. Normativité et interdisciplinarité en Aménagement-Urbanisme. *Revue d'Economie Régionale et Urbaine*, 2002, n°4, p. 619-642.

MARTOUZET Denis. 2002b. *Normes et valeurs en aménagement-urbanisme. Limites de la rationalité et nécessité de la prise en compte du multi-niveaux*. Dossier de synthèse des travaux soutenus par Denis Martouzet en vue de l'Habilitation à Diriger des recherches. Section 24 Aménagement de l'Espace et Urbanisme, Université de Bordeaux 3, 514 p.

MATHIAN Hélène, PIRON Marie. 2001. Echelles géographiques et méthodes statistiques multidimensionnelles. In SANDERS Léna. *Modèles en analyse spatiale*. Paris : Hermès science Publications, p. 61-103.

MATHIS Philippe (dir.). 2003. *Graphes et réseaux*. Paris : Lavoisier, 360 p.

MAZZA François. 1996. Conception et gestion de l'espace de services de la Défense. In *Equipements et métiers de la multimodalité*, Actes du séminaire « Les lieux-Mouvements de la ville » (journées des 20 octobre 1995, 3 mai et 14 juin 1996), p. 139-151.

MAZZONI Christiana. 2001. *Gares : architectures 1990-2010*. Traduit de l'italien par POZZOLI Marguerite. Arles : Actes Sud, 278 p.

MENERAULT Philippe. 2001. L'utilisation des potentialités du réseau ferroviaire lillois : réponse à la saturation de la gare terminus et opportunités urbaines. In MENERAULT Philippe, BARRÉ Alain (dir.). *Gares et quartiers de gares, signes et marges : Lille, Rennes et expériences internationales (Italie, Japon, Pays-Bas)*, Actes du séminaire international du 22 mars 1999 à Villeneuve d'Ascq. Paris, Arcueil : INRETS, p. 71-92.

MENERAULT Philippe, BARRÉ Alain. 2001 (dir.). *Gares et quartiers de gares, signes et marges : Lille, Rennes et expériences internationales (Italie, Japon, Pays-Bas)*, Actes du séminaire international du 22 mars 1999 à Villeneuve d'Ascq. Paris, Arcueil : INRETS, 216 p.

MERLIN Pierre. 1992. *Géographie des transports*. Que sais-je ?. Paris, Presses Universitaires de France, 127 p.

MONGEOT Hélène. 2001. L'élaboration d'une architecture-cadre pour les systèmes de transport intelligents. *Annales des Ponts et Chaussées*, avril-juin 2001, n°98, p. 9-17.

MORIN Jean. 1988. *La régulation du trafic dans un réseau routier maillé routier urbain et périurbain. Le cas de l'Île-de-France*. Paris : INRETS, 108 p.

MORIN Jean, PICOUAYS Daniel., PAIRAULT Thierry. Dor Breizh : le système d'Information et de Gestion du Trafic sur l'agglomération Rennaise. *TEC Transport-Environnement-Circulation*, juillet-septembre 2005, n°187, p. 20-21.

MORTUREUX Yves, HOSTYN Daniel. Guide d'auto-évaluation du niveau de sécurité d'une gare ferroviaire. *Phoebus*, 2000, n°14, p. 75-80.

MULLER Pierre-Alain, GAERTNER N. 2000. *Modélisation objet avec UML*. Paris : Eyrolles, 520 p.

MUSSO Pierre. (dir.). 2002. Le territoire aménagé par les réseaux. La Tour d'Aigues : Editions de l'Aube, 275 p.

NANGÉRONI Cécile. 2005. Mauvais points pour Transilien. *La Vie du Rail*, octobre 2005, p. 4-7.

NEBOIT Michel, CUNY Xavier. 1990. Fiabilité humaine : présentation du domaine. In LEPLAT Jacques, TERSSAC Gilbert de. *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*. Marseille : Octares/Entreprises, p. 23-46.

NICOLET Jean-Louis. 1990. Outils et démarches pour l'amélioration de la fiabilité des systèmes complexes. In LEPLAT Jacques, TERSSAC Gilbert de. *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*. Marseille : Octares/Entreprises, p. 293-309.

NIJKAMP Peter, PEPPING Gerard. 1995. *The relevance and use of information and telecommunication networks as strategic tools in the transport sector : a dutch case study*, Université d'Amsterdam, serie research memoranda, 23 p.

NIJKAMP Peter, PEPPING Gerard, ARGYRAKOS George, BANISTER David, GIAOUTZE Maria. 1995. *Transport behaviour and diffusion of telematics : a conceptual framework and empirical application*, Université d'Amsterdam, serie research memoranda, 22 p.

NOUE Marie-France de, ANNUNZIO Dario d', BOURDILLON Jacques, BRUNET Roger, MARTINAND Claude, POMMELET Pierre. 1993. *Réseaux et territoires*. Montpellier : RECLUS, 176 p.

NOUVIER Jacques. 2002. La télématique : de nouveaux outils pour mieux maîtriser la mobilité. In *Nouveaux enjeux : le transport doit s'adapter*, Congrès international francophone, Paris, 23 et 24 janvier 2002, Presses de l'École Nationale des Ponts et chaussées, p. 173-181.

OLLIVRO Jean. 1996. L'ambiguïté des gares, clé du développement contemporain. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin 1996, n°71, p. 34-44.

OLLIVRO Jean, 2001. Centralité interne, centralité externe : analyse théorique et graphique de la gare de Rennes dans son environnement. In MENERAULT Philippe, BARRÉ Alain

(dir.). *Gares et quartiers de gares, signes et marges : Lille, Rennes et expériences internationales (Italie, Japon, Pays-Bas)*, Actes du séminaire international du 22 mars 1999 à Villeneuve d'Ascq. Paris, Arcueil : INRETS, p. 101-116.

ORFEUIL Jean-Pierre. 1994. Trois futurs pour la mobilité et pour la ville, Se déplacer au quotidien dans trente ans, Actes du colloque organisé par l'ADEME, le Centre de Prospective de la DRAST et l'INRETS, Paris, 22 et 23 mars 1994, La documentation française, p. 41-52.

ORTUZAR Juan D., WILLUMSEN Luis-G. 2001. *Modelling transport Chichester*. 3 ed. New York : John Wiley & Sons, 493 p.

PACHE Yannick. 2002. *L'information sur les perturbations dans les transports urbains publics de surface, analyses et perspectives de développement*. Mémoire de travail de fin d'études : ENTPE, 75 p.

PAILLIART Isabelle. 2002. Citoyens, usagers, consommateurs et territoires : l'exemple des nouvelles techniques de l'information et de la communication. In MUSSO Pierre. *Le territoire aménagé par les réseaux*, La Tour d'Aigues : Editions de l'Aube, p. 237-252.

PALMA André de, FONTAN Cédric. 2001. Eléments d'analyse de la composante horaire des déplacements : le cas de la Région Île-de-France. *Les cahiers Scientifiques du Transport*, 2001, n°39, p. 55-84.

PAUZIÉ Annie, 2001. Vers une diversification des supports de communication pour l'information multimodale dans le transport. In CAMBON de LAVALETTE Brigitte et alii. *La signalétique : conception, validation, usages*, Actes de la journée d'étude du 15 novembre 1999, Arcueil : INRETS, p. 47-60.

PERCHERON Daniel, 2005. Les systèmes de transports intelligents dans le Nord-Pas-de-Calais. *TEC Transport-Environnement-Circulation*, juillet-septembre 2005, n°187, p. 17-19.

PENE Sophie. 1999. Récits de l'acheminement : l'imaginaire du piéton est-il multimodal ?. In JOSEPH Isaac (dir.). *Villes en gare*. Saint-Étienne : Editions de l'Aube, p. 259-271.

PERREAU Chloé. 2002. Apports et potentialité des systèmes d'information multimodale. In *Nouveaux enjeux : le transport doit s'adapter*, Congrès international francophone, Paris, 23 et 24 janvier 2002, Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, p. 182-190.

PERREAU Chloé. 2002. *Les systèmes d'information multimodale : apports et potentialités dans l'optimisation des déplacements urbains*. Thèse de Doctorat : Sciences Economiques : Institut d'Etudes Politiques de Paris, 292p.

PERRY Greg. 2003. *Visual Basic 6*. Paris : CampusPress, 818 p.

PETRELLA Ricardo. 1999. Réinventer la res publica, au-delà de la mobilité pour l'individu-client. In HEURGON Edith, JARREAU Philippe. *Quand les transports deviennent l'affaire de la cité*, Parlons-en avec la RATP, La Tour d'Aigues : Editions de l'Aube, 1999, p. 15-32.

PETRELLA Ricardo. 2000. Villes flux, villes mémoire : perspectives de la ville. In BAILLY Jean-Paul, STATHOPOULOS Nikolas (dir.). *Les enjeux du transport public dans les villes européennes*, Actes du colloque organisé par la mission « Prospective » de la RATP, publiés avec le soutien de la Commission Européenne, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, 2000, p. 25-28.

PEYRONNET Philippe. 2000. la certification de la qualité de service des transports de voyageurs. *TEC Transport-Environnement-Circulation*, septembre-octobre 2000, n°161, p. 12-16.

PEYRONNET Philippe, ROBIN-PRÉVALLÉE Yves. 2001. PDU et systèmes intelligents de transport. In PHILIPPE Georges (dir.). *Les transports intelligents*. Paris : Hermès Science, p. 59-74.

PLANCHETTE Guy, Vers le zéro défaut. *Phoebus*, 2000, n°14, p. 27-35.

POISSON Frank, LANMBOURG Christophe, HOLSTEIN Philippe, MARSAULT Catherine. 2001. De l'intelligibilité des annonces sonores au confort acoustique en gare. *Revue Générale des Chemins de Fer*, septembre 2001, p. 19-28.

POYET Christine. 1990. L'homme, agent de fiabilité dans les systèmes automatisés. In LEPLAT Jacques, TERSAC Gilbert de. *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*. Marseille : Octares/Entreprises, p. 223-240.

PROUST Christian. 2000. Vers un serveur d'information en temps réel. In ATEC. *Transports et société de l'information*. Palais des congrès de Versailles, du 26 au 28 janvier 2000, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, 2000, p. 289-292.

PROUST Joëlle. 1996. *L'attention sélective et la trame de l'expérience dans la gare du Nord*, programme de recherches concertées sur la gare du nord, Plan urbain-RATP-SNCF, Rapport n°9622.

PROVOST Roger. 2000. Démonstration de la sécurité d'un système par l'approche GAMAB. *Phoebus*, 2000, n°14, p. 63-73.

QUIN Claude, MERLET Yves. 1993. *L'amélioration de la qualité de l'information et de la qualité de service dans les réseaux de transports collectifs urbains*. Paris : Conseil général des ponts et chaussées, 56 p.

RANDRIANARIVO Bruno, PERSON-SILHOL Dominique. 2000. Rôle de la sûreté de fonctionnement lors des évolutions du matériel roulant à la RATP. *Phoebus*, 2000, n°14, p. 41-56.

RAYMOND Henri, SAMIE Anita, TROUARD RIOLLE Hedwidge. 1976. *L'usager et l'espace de la gare en banlieue*. Marnes-la-Coquettes : LASSAU, 257 p.

RIBEILL Georges. 1996. Les métamorphoses de la grande gare française. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin 1996, n°71, p. 54-65.

RIBEILL Georges. 1999. D'un siècle à l'autre, les enjeux récurrents de la gare française. In JOSEPH Isaac (dir.). *Villes en gare*. Saint-Étienne : Editions de l'Aube, p. 21-33.

RICHARDS Brian. 2001. *Future transport in cities*. Londres et New-York : Spon Press, 162 p.

ROSSO F., Les gares, un enjeu pour la concertation. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin 1996, n°71, p. 137.

SAGLIER François, 2000. METEOR : une nouvelle ligne dans Paris. In BAILLY Jean-Paul, STATHOPOULOS Nikolas (dir.). *Les enjeux du transport public dans les villes européennes*, Actes du colloque organisé par la mission « Prospective » de la RATP, publiés avec le soutien de la Commission Européenne, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, 2000, p. 190-196.

SANCHEZ Jésus, VELCHE Dominique. 1999. Mobilités réduites : les épreuves de l'accessibilité. In JOSEPH Isaac (dir.). *Villes en gare*. Saint-Étienne : Editions de l'Aube, p. 272-290.

SANDER Agnès. 1995. *Les points-de-réseaux comme formes urbaines : morphogénèse et enjeux de conception*. Thèse de Doctorat : Aménagement de l'espace et urbanisme : Université de Paris XII, 349 p.

SANDER Agnès. 1996. Des lieux-mouvements bien singuliers. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin 1996, n°71, p. 45-53.

SANDERS Léna (dir.). 2001. *Modèles en analyse spatiale*. Paris : Hermès science Publications, 333 p.

SARAZIN Bernard, 1989. L'expérience d'INFOPLUS à Angoulême. *Déplacements*, 1989, n°1, p. 75-85.

SAUZE L., CALLEGO J.-L. 2005. Une nouvelle approche pour les Systèmes de gestion des déplacements ou comment le nouveau contexte de gestion des déplacements urbains contribue

à l'évolution en profondeur des systèmes de gestion du trafic. *TEC Transport-Environnement-Circulation*, juillet-septembre 2005, n°187, p. 24-27.

SCEMAMA Gérard, GAUDIN Etienne. Informatisation de la décision dans l'exploitation du transport. : atouts des technologies avancées du traitement de l'information. *RTS Recherche Transports Sécurité*, Spécial Systèmes intelligents de transport, octobre-décembre 1998, n°61, p. 53-67.

SCEMAMA Gérard, BALBO Flavien, RODRIGUEZ Joaquin, CARUSO Martine. Système d'aide à la décision pour les régulateurs des SAE. In ATEC. *Transports et société de l'information*. Palais des congrès de Versailles, du 26 au 28 janvier 2000, Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, p. 315.

SERRHINI Kamal. 2000. *Evaluation spatiale de la covisibilité d'un aménagement : sémiologie graphique expérimentale et modélisation quantitative*. Thèse de Doctorat : Aménagement de l'espace et urbanisme : Université de Tours, 481 p.

SEVEL Elisabeth. 2000. L'information des voyageurs en Ile-de-France. *Revue Générale des Chemins de Fer*, juillet-août 2000, n°7, p. 25-34.

SNCF. 2003. *La SNCF et la prise en compte du risque inondation en Île-de-France*. Document de communication.

SPRONI Nicolas, 2005. *Technologies dans les pôles d'échanges multimodaux. Etat des lieux et perspectives*. Mémoire de travail de fin d'études : ENTPE, 112p.

STANISLAS Brandt. 1999. *La Billétique et l'information au service des pôles d'échanges multimodaux*. Mémoire de travail de fin d'études : ENTPE, 79 p.

STATHOPOULOS Nikolas. 1997. *La performance territoriale des réseaux de transport*. Paris : Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et chaussées, 127 p.

STATHOPOULOS Nikolas. 1993. Formes et fonctions des points de réseaux. *Flux*, n°12, avril-juin 1993, p. 29-47.

STATHOPOULOS Nikolas. 1998. Villes et transports : destins croisés. *Transport Public*, mai 1998, p. 42-45.

STOUGH Roger. 2001. *Intelligent Transport systems : cases and policies*. Northampton, Massachussets (USA) : Edward Elgar Publishing Inc, 227 p.

STREB Florian. 2004. *Etude sur l'information multimodale en Alsace. Etat des lieux*. Centre d'Etudes Techniques de l'Equipement de l'Est, rapport pour le CERTU, Metz, 26 p.

TAYLOR Michael. 2001. Intelligent transport system. In BUTTON Kenneth-J., HENSHER David-A. *Handbook of transport systems and traffic control*. Oxford : Pergamon, Elsevier science Ltd, p. 461-475.

THEUREAU Jacques. 1996. Objets et activité. In *Equipements et métiers de la multimodalité*, Actes du séminaire « Les lieux-Mouvements de la ville » (journées des 20 octobre 1995, 3 mai et 14 juin 1996), p. 39-52.

TERSSAC Gilles. de, CHABAUD Corinne. 1990. Référentiel opératif commun et fiabilité. In LEPLAT Jacques, TERSSAC Gilbert de. *Les facteurs humains de la fiabilité dans les systèmes complexes*, Marseille : Octares/Entreprises, p. 111-139.

THÉVENIN Thomas. 2002. *Quand l'information géographique se met au service des transports publics urbains. Une approche spatio-temporelle appliquée à l'agglomération bisontine*. Thèse de Doctorat : Géographie : Université de Franche-Comté, 260 p.

THIBAUD Jean-Paul. 1996. Perception et mouvement des ambiances souterraines. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin 1996, n°71, p. 144-152.

THOMAS Gwenola. 2000. Piétons synthétiques. In SANDOVAL Victor (dir.). *La ville numérique*. Paris : Hermès science, p. 99-117.

TIJUS Charles, CHÊNE Denis, JADOT Frédéric, LEPROUX Christine, POITRENAUD Sébastien, RICHARD Jean-François. 2001. Taxonomies pour la signalétique : de la signalisation routière aux I.H.M. In CAMBON DE LAVALETTE Brigitte et alii. *La signalétique : conception, validation, usages*, Actes de la journée d'étude du 15 novembre 1999, Arcueil : INRETS, p. 79-92.

TRANSDEV. 1998. *Transports publics et avenir des zones rurales*. Paris : La documentation française, 151 p.

TREUIL Jean-Pierre, MULLON Christian, PERRIER Edith, PIRON Marie. 2001. Simulations multi-agents de dynamiques spatialisées. In SANDERS Léna (dir.). *Modèles en analyse spatiale*. Paris : Hermès science Publications, p. 219-252.

TROIN Jean-François. 1995. *Rail et aménagement du territoire : des héritages aux nouveaux défis*. Ville : Edisud, 264 p.

USTER Guillaume, 2001. *Développement de l'information multimodale en France : quels leviers actionner ?*. *Annales des Ponts et chaussées*, avril-juin 2001, n°98, p. 22-26.

USTER Guillaume, 2008. *Service de mobilité et d'information : innovation et recherche*. Paris : La documentation française, 2008.

van der HEIJDEN Rob, MARCHAU Vincent. 2002. Innovative road traffic management by ITS : a future perspective". *Int. J technology, policy and management*, vol. 2, n° 1, p. 20-38.

VERGELY Bertrand. 1993. L'homme de la mobilité. Autour de la pensée de Gilles Deleuze. *Les Annales de la recherche urbaine*, juin-septembre 1993, n°59-60, p. 197-202.

VEXIAU Thierry. 1997. L'évaluation : un enjeu stratégique. *TEC Transport-Environnement-Circulation*, janvier-février 1997, n°140, p. 3-6.

VIAUT Jean-Marc, KAMINAGAI Yo. 2001. La signalétique multimodale de la RATP. In CAMBON DE LAVALETTE Brigitte et alii. *La signalétique : conception, validation, usages*, Actes de la journée d'étude du 15 novembre 1999, Arcueil : INRETS, p. 109-116.

WALLISER Bernard. 2000. *L'économie cognitive*. Paris : Odile Jacob, 258 p.

WIART Alain, LEROUX Albert., LOMAZZI Marc, Signalétique, le nouveau fil d'Ariane. *Vie du rail et des transports, édition professionnelle*, novembre 1998, n°57, p. 30-35.

XOUILLOT Thierry. 1995. *Approche typologique des risques en milieu urbain*. Dossier optionnel de Magistère 3 : Aménagement : Université de Tours (CESA), 50 p.

YGNACE Jean-Luc, DE BANVILLE Etienne. 1999. *Les systèmes de transport intelligent. Un enjeu stratégique mondial*. Paris : La documentation française, 126 p.

DOCUMENTS INTERNET

BAUDEZ Gildas, RAPP Peter. 2003. *Rôle et économie d'un opérateur de contenu dans l'information multimodale*. Rapport d'étude pour le CERTU. Paris : Carte Blanche Conseil, 44 p. Accessible le 23 juillet 2008.

<URL : <http://portail.documentation.equipement.gouv.fr/drast/document.xsp?id=Drast-OUV00000533>>

BALBO Flavien, ZARGAYOUNA Mahdi. Serveur Agent d'Information : application à l'information des voyageurs, p. 1-16. Accessible le 13 juillet 2008.

<URL : <http://www.lamsade.dauphine.fr/~zargayou/Inforsid%20serveur%20Information%20Balbo%20ZARGAYOUNA.pdf>>

Commission des comptes des transports de la Nation. 2008. *Les transports en 2007 (premiers résultats)*. Version provisoire du 45^e rapport de la Commission des comptes des transports de la Nation. 80 p. Accessible le 12 juillet 2008.

<URL : http://www.transports.equipement.gouv.fr/IMG/pdf/rapport_integral_cle1ca861.pdf>

EPL. 2006. *Etude préalable à la réduction de la vulnérabilité des réseaux liée aux inondations en Loire Moyenne. Résultats, bilan et perspectives*, 178 p. Accessible le 2 octobre 2008.

<URL : http://www.eptb-loire.fr/upload/etudes/rapport_etudes.pdf>

ESPON 1.2.1. 2004. *Transport services and networks : territorial trends and basic supply of infrastructure for territorial cohesion*, 478 p. Accessible le 5 juillet 2008.

<URL : http://www.espon.eu/mmp/online/website/content/projects/259/652/index_EN.html>

FURELAUD Gilles, CALVINO Bernard. 2008. *Dossier Cybernétique et physiologie*. Accessible le 12 juillet 2008.

<URL : <http://www.snv.jussieu.fr/vie/dossiers/cybernetique/index.htm>>

HENSENS Hanka. 2004. *Rédaction de bibliographie. Les normes et les usages*. Accessible le 29 juin 2008.

<URL : <https://www.mpl.ird.fr/documentation/download/FormBibliog.pdf>>

IFP. 2005. *La consommation d'énergie dans le secteur du transport. Panorama 2005*, 5 p. Accessible le 5 juillet 2008.

<URL : http://www.ifp.fr/content/download/57516/1261736/file/IFP-Panorama05_09-ConsommationVF.pdf>

ITS France. 2002. *Pour un développement de l'information multimodale en agglomération : freins et perspectives*. Rapport du groupe de projet ITS France "information multimodale en agglomération", 80 p. Disponible le 13 juillet 2008.

<URL : <http://www.predim.org/IMG/pdf/PourUnDeveloppementVersionFinale.pdf>>

KOUWNHOVEN Marco, CAUSSADE Sebastian, KROES Eric. 2006. *Value of Reliability of Travellers on the Paris Suburban Railway Network. Technical Report on the Data Analysis*. prepared for the Syndicat des Transports d'Île de France. RAND Corporation, 52 p. Accessible le 13 juillet 2008.

<URL : http://www.rand.org/pubs/technical_reports/2006/RAND_TR223.pdf>

LAPPARENT Mathieu de. 2003. *Demande individuelle des modes de transport et valeur du temps pour les déplacements réguliers Domicile-Travail*, Publication AJD-70, 32 p. Accessible le 13 juillet 2008.

<URL : http://www.ajd.umontreal.ca/source-pdf/AJD-70-F_de_Lapparent_mode_choice_francais_2003.pdf>

LI Shuguang, SU Yanming. 2005. *The market penetration and compliance rate of advanced traveler Information systems under dynamic traffic conditions*. School of electrical engineering, Xi'an Jiao Tong University, cooperative transportation dynamics, 22 p. Accessible le 2 octobre 2008.

<URL : http://www.radio.rai.it/cpu/archivio_2006/eventi/Market_penetration_ATIS_29gen05.pdf>

MAUTRE Laurent. 2006. *Guide de présentation des notes et références bibliographiques. D'après les normes AFNOR Z 44-005, les normes ISO 690-1 et ISO 690-2*. Accessible le 29 juin 2008.

<URL : <http://ifsi-angouleme.croix-rouge.fr/IMAGES/PDF/NORMES%20DE%20BIBLIOGRAPHIE.pdf>>

MASMOUDI Mustapha. 2002. *INFOMONDIA. Base de la culture numérique*. Edition Centre Massmedia, 184 p. Accessible le 12 juillet 2008.

<URL : <http://www.massmedia.com.tn/fr/culturenume/cours/Livre.PDF>>

MOSNAT Annabelle, SAHABANA Maïdadi. 2002. *Bibliographie commentée sur l'intégration urbaine des pôles d'échanges*. Lyon : CERTU, 107 p. Accessible le 13 juillet 2008.

<URL : <http://lara.inist.fr/handle/2332/1065>>

PALMA André de, FONTAN Cédric. 2000. *Enquête MADDIF : Multimotif Adaptée à la Dynamique des comportements de Déplacement en Île-de-France*. PREDIT 1996-2000, 147 p. Accessible le 18 octobre 2008.

<URL : <http://www.innovations-transports.fr/IMG/pdf/139-R99MT20.pdf>>

PALMA André de, FONTAN Cédric. 2001. *Choix modal et valeur du temps en Île-de-France*, 31 p. Accessible le 13 juillet 2008.

<URL : <http://www.u-cergy.fr/IMG/2001-20DePalma.pdf>>

SANTACREU Alexandre. 2005. *Panorama des normes relatives à l'information des voyageurs*. CETE Méditerranée, 30 p. Accessible le 13 juillet 2008.

<URL : <http://www.predim.org/spip.php?article1099>>

STIF. 2005. *Compte Déplacements de voyageurs en Île-de-France pour l'année 2003*, 19 p. Accessible le 14 juillet 2008.

<URL : http://www.stif.info/IMG/pdf/compte_dep_2005.pdf>

TABLE DES FIGURES

figure 1	Du réseau virtuel au réseau réel.....	12
figure 2	Les transports intérieurs de voyageurs en France en 2007	20
figure 3	Evolution des transports intérieurs de voyageurs en France par mode	21
figure 4	Consommation de produits pétroliers dans le monde en 2002 : 3 GTep.....	25
figure 5	Consommation de carburant par rapport à la densité de population en 1980....	26
figure 6	L'évolution des contributions au financement des transports publics en Île-de-France	35
figure 7	Le cycle de qualité, adapté aux transports en commun	48
figure 8	Niveaux de risques dans le cadre de coupures d'électricité	56
figure 9	Situation des notions d'aléas, d'enjeux et de vulnérabilité dans le mécanisme produisant le risque.....	57
figure 10	Situation des notions de catastrophe, d'enjeux et de vulnérabilité dans le mécanisme produisant les dommages.....	57
figure 11	Deux principes de traitement des incertitudes dans une étude de risques	60
figure 12	Maillons élémentaires de la chaîne des risques	63
figure 13	Impact d'un phénomène catastrophique sur un réseau de transport : détail des dommages et des vulnérabilités impliquées	65
figure 14	Modèle quantitatif de communication.....	86
figure 15	Modèle de Lasswell	87
figure 16	Démarche adoptée dans le cadre de cette recherche.....	96
figure 17	Modélisation et simulations.....	110
figure 18	Graphe test pour la propriété de globalité	116
figure 19	Exemple de structure du modèle	126
figure 20	Modélisation cybernétique d'un homéostat.....	135
figure 21	Exemples de graphes non orientés (à gauche) et orientés (à droite)	140
figure 22	Zoom sur le graphe européen du Laboratoire du CESA	141
figure 23	Explication schématique de la k-connexité	145
figure 24	Les 5 modules applicatifs de PERTURB	154
figure 25	L'objet reçoit des messages, gère ses valeurs propres et émet des messages .	156
figure 26	Les fichiers utilisés lors du cycle de travail.....	158
figure 27	Diagramme des classes du programme de Botquélen	159
figure 28	Diagramme simplifié des classes de PERTURB	160
figure 29	Rappel des 5 modules applicatifs de PERTURB.....	161
figure 30	Interface générale de PERTURB.....	162
figure 31	Définition des paramètres généraux	163
figure 32	Définition des paramètres d'une perturbation	164
figure 33	Lancement du calculateur	164
figure 34	Graphes.exe, après le chargement du graphe	166
figure 35	Graphes.exe, à la fin d'un calcul	166
figure 36	Tronçon perturbé sur une ligne de transports en commun	167
figure 37	Interface de calcul(s) de nœud à nœud	175
figure 38	Interface de calcul(s) unipolaire(s)	176
figure 39	Interface de calcul(s) multipolaire(s).....	177
figure 40	Interface de comparaison de calculs multipolaires.....	179
figure 41	Interface pour les simulations avec offre et demande	180

figure 42	Interface pour les simulations avec offre, demande et information	181
figure 43	Interface pour les simulations avec offre, demande, information et capacité .	184
figure 44	Architecture de la plate-forme de simulation	191
figure 45	Interface de MAPNOD : édition des arcs du graphe	192
figure 46	Ajout d'un module spécifique à MAPNOD	193
figure 47	Interface du module de visualisation dynamique	193
figure 48	Adaptation du module Statistiques de MAPNOD	194
figure 49	Interface principale de RES	195
figure 50	Lancement de Maillage depuis MAPNOD.....	197
figure 51	Calculs multipolaires : somme des temps de connexion de nœud à nœud à chaque étape (exemple)	199
figure 52	Lancement de Créationlignes depuis MAPNOD.....	201
figure 53	Lancement de Générationdemande depuis MAPNOD.....	206
figure 54	Schémas du RER en 1965 et 1972.....	217
figure 55	Vues générales du graphe	220
figure 56	Vue rapprochée de Paris	221
figure 57	Zoom sur Châtelet et Gare du Nord.....	221
figure 58	Evolution des durées de connexion entre deux nœuds du réseau au cours du temps.....	226
figure 59	Durée pour rejoindre Haussmann St-Lazare depuis Bondy	227
figure 60	Durée pour rejoindre Val de Fontenay depuis Haussmann St-Lazare.....	228
figure 61	Durée pour rejoindre Bondy depuis Haussmann St-Lazare	229
figure 62	Durée pour rejoindre Haussmann St-Lazare depuis Tournan	231
figure 63	Durée pour rejoindre Invalides depuis Ermont-Eaubonne	233
figure 64	Durée pour rejoindre St-Martin d'Etampes depuis Invalides.....	234
figure 65	Durée pour rejoindre Invalides depuis Pontoise.....	235
figure 66	Durée pour rejoindre Invalides depuis Juvisy	237
figure 67	Situation de Juvisy sur le réseau.....	238
figure 68	Situation du tramway T3 et de la perturbation étudiée.....	239
figure 69	Durée pour rejoindre Boulevard Victor depuis Juvisy	239
figure 70	Durée pour rejoindre Boulevard Victor depuis Bourg-la-Reine	240
figure 71	Formes relativement régulières traduisant une régularité de l'évolution des durées de connexion	242
figure 72	Formes irrégulières traduisant des irrégularités de l'évolution des durées de connexion.....	242
figure 73	Passage d'une période de pointe à une période creuse.....	242
figure 74	Fréquences plus ou moins importantes en fonction du Plan de Transport mis en place.....	243
figure 75	Courbes représentant une différence nulle à certaines heures et conséquente à d'autres	243
figure 76	Perturbations avec des conséquences relativement stables dans le temps.....	243
figure 77	Perturbations avec des conséquences très variables dans le temps	244
figure 78	Différence entre situation normale et perturbée lorsque seules les fréquences varient	244
figure 79	Temps nécessaire pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ de Mantes- la-Jolie à 7h47.....	245
figure 80	Temps nécessaire pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ de Mantes- la-Jolie à 7h47 : zoom.....	246
figure 81	Temps nécessaire pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ de Mantes- la-Jolie à 7h48.....	247

figure 82	Situation de Mantes-la-Jolie sur le réseau	247
figure 83	Durée moyenne pour atteindre les nœuds du réseau depuis Austerlitz	251
figure 84	Temps nécessaire pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ d'Austerlitz à 8h	252
figure 85	Temps nécessaire pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ d'Austerlitz à 8h : zoom	252
figure 86	Nombre de minutes par des chemins minimaux pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ d'Austerlitz à 8h.....	256
figure 87	Durée moyenne pour atteindre les gares du RER-C au départ de Massy- Palaiseau (en utilisant uniquement le RER-C)	257
figure 88	Durée moyenne pour atteindre les gares du RER-C au départ de Massy- Palaiseau (en utilisant toutes les lignes du réseau)	258
figure 89	Durée moyenne pour atteindre les gares du RER-C au départ de Pontoise (en utilisant uniquement le RER-C)	259
figure 90	Durée moyenne pour atteindre les gares du RER-C au départ de Pontoise (en utilisant toutes les lignes)	259
figure 91	Durée pour rejoindre les gares du RER-C depuis Pontoise pour un départ à 7h36 (en utilisant uniquement le RER-C)	260
figure 92	Durée pour rejoindre les gares du RER-C depuis Pontoise pour un départ à 7h37 (en utilisant uniquement le RER-C)	261
figure 93	Temps de connexion supplémentaire pour les mises en relation des nœuds du réseau pour un départ à 7h (interruption de trafic entre Austerlitz et Invalides)	263
figure 94	Temps de connexion supplémentaire pour les mises en relation des nœuds du réseau pour un départ à 7h.....	264
figure 95	Temps de parcours en fonction du délai de diffusion de l'information (information diffusée dans les véhicules).....	266
figure 96	Temps de parcours en fonction du délai de diffusion de l'information (2).....	267
figure 97	Temps de parcours en fonction du délai de diffusion de l'information (3).....	269
figure 98	Temps total perdu par les agents en fonction de la plage horaire de la perturbation.....	271
figure 99	Perte de temps des agents lors d'une interruption de trafic entre Haussmann St- Lazare et Magenta sur le RER-E	272
figure 100	Nombre d'agents sur le tronçon Magenta-Haussmann St-Lazare au cours du temps en l'absence de perturbation	273
figure 101	Perte de temps des agents en fonction de leur heure de départ et de la plage horaire de la perturbation.....	274
figure 102	Nombre moyen d'agents sur le tronçon Val de Fontenay-Vincennes au cours du temps.....	275
figure 103	Nombre d'agents dans le train au cours du temps	275
figure 104	Somme des temps de parcours des 820 agents en fonction des paramètres de diffusion de l'information.....	280
figure 105	Le réseau initial	286
figure 106	Potentiel de trafic des lignes créées	287
figure 107	Réseaux à 10 et 20 lignes	287
figure 108	Localisation de la perturbation : visualisation sur le réseau à 4 lignes.....	288
figure 109	Vulnérabilité structurelle et maillage du réseau (calculs multipolaires pour un départ à 8h avec exclusion des nœuds du tronçon perturbé)	289
figure 110	Importance de la ligne 1 en situation normale.....	290
figure 111	Ajout de la ligne ABL-ABN.....	291

figure 112	Nombre de minutes par ligne pour un départ à 8h (calculs multipolaires avec exclusion des nœuds du tronçon perturbé)	291
figure 113	Conséquences structurelles de la perturbation (calculs multipolaires excluant les nœuds du tronçon perturbé).....	292
figure 114	Ajout de la ligne ACA-ACG	293
figure 115	Nombre de minutes par ligne pour un départ à 8h (calculs multipolaires avec exclusion des nœuds du tronçon perturbé)	293
figure 116	Conséquences structurelles de la perturbation (calculs multipolaires excluant les nœuds du tronçon perturbé)	294
figure 117	Ajout de la navette ACT-ACU	295
figure 118	Temps de parcours en fonction de la fréquence de circulation de la ligne 6 (tous les agents captent l'information dans les véhicules)	296
figure 119	Nombre d'agents en correspondance au nœud ACT au cours du temps	297
figure 120	Temps de parcours global sur le réseau en fonction de la fréquence de circulation de la ligne 5	298
figure 121	Temps de parcours des agents en fonction de la fréquence de circulation de la ligne 6 (1 agent sur 2 ne capte pas l'information dans les véhicules)	299
figure 122	Temps de parcours global : influence des possibilités de réception de l'information par les agents et de la fréquence de la ligne 5	300
figure 123	Réseau de 42 sommets et 58 arcs	301
figure 124	Les 6 lignes du réseau.....	302
figure 125	Nombre de minutes par ligne pour un départ à 10h (calculs multipolaires)....	303
figure 126	Conséquences structurelles des perturbations (calculs multipolaires avec exclusion du nœud 23).....	304
figure 127	Nombre de minutes par ligne pour un départ à 9h (calculs multipolaires).....	305
figure 128	Point de départ (en bleu) et destinations des agents (en rouge).....	306
figure 129	Temps de parcours moyen en fonction du délai de diffusion de l'information (information diffusée dans les véhicules).....	307
figure 130	Temps de parcours des agents en fonction du délai de diffusion de l'information (information diffusée dans les véhicules).....	308
figure 131	Points de départ (en bleu) et destinations des agents (en rouge).....	309
figure 132	Durée moyenne pour rejoindre les nœuds de destination (information diffusée dans un délai de 1 minute et accessible dans les véhicules).....	310
figure 133	Points de départ (en bleu) et destinations (en rouge) des nouveaux agents	311
figure 134	Points de départ (en bleu) et destinations (en rouge) de l'ensemble des agents....	311
figure 135	Durée pour atteindre le nœud de destination par agent (prise en compte des contraintes de capacités).....	313
figure 136	Charges des véhicules 193 et 194 au cours de leur trajet	314
figure 137	Nombre d'agents par nœud.....	315
figure 138	Maillage du réseau et répartition spatiale des agents	316
figure 139	Réseau après 140 suppressions d'arcs	316
figure 140	Nombre d'agents par ligne au cours du temps sur les principales lignes	318
figure 141	Somme des temps perdus par es agents en fonction de la capacité des véhicules	318
figure 142	Nombre d'agents sur les nœuds au cours du temps.....	319
figure 143	Google : nouvel acteur de l'information multimodale	335
figure 144	Les widgets : une nouvelle manière de surfer sur Internet ?	336
figure 145	Calculs d'accessibilités sur Paris avec le site www.navitia.com	338

figure 146	L'utilisation de l'information multimodale à différents niveaux d'intervention...	339
------------	-----------------------------------------------------------------------------------	-----

TABLE DES TABLEAUX

tableau 1	Consommation d'espace de différents modes de transports urbains.....	27
tableau 2	Typologie des connexions	44
tableau 3	Norme NF EN-13816 : critères de qualité.....	49
tableau 4	Fiabilité d'un système avec des éléments couplés en série	58
tableau 5	Fiabilité d'un système avec des éléments couplés en parallèle et en série.....	59
tableau 6	Exemples d'aléas d'origine naturelle recensés par le PC INFO Trafic Transilien en 2006	67
tableau 7	Exemples d'aléas d'origine technique recensés par le PC INFO Trafic Transilien en 2006	68
tableau 8	Exemples d'aléas d'origine humaine recensés par le PC INFO Trafic Transilien en 2006	70
tableau 9	Terminologie des graphes et des réseaux	141
tableau 10	Les fichiers utilisés pour des programmes réalisés en langage C++	157
tableau 11	Durée pour rejoindre Hausmann St Lazare depuis Bondy : résultats synthétiques	228
tableau 12	Durée pour rejoindre Val de Fontenay depuis Hausmann St-Lazare : résultats synthétiques	229
tableau 13	Durée pour rejoindre Bondy depuis Hausmann St Lazare : résultats synthétiques	230
tableau 14	Durée pour rejoindre Hausmann St-Lazare depuis Tournan : résultats synthétiques	231
tableau 15	Durée pour rejoindre Invalides depuis Ermont-Eaubonne : résultats synthétiques	233
tableau 16	Durée pour rejoindre St-Martin d'Etampes depuis Invalides : résultats synthétiques	234
tableau 17	Durée pour Invalides depuis Pontoise : résultats synthétiques.....	237
tableau 18	Durée pour rejoindre Boulevard Victor depuis Juvisy : résultats synthétiques.....	240
tableau 19	Durée pour rejoindre Boulevard Victor depuis Bourg-la-Reine : résultats synthétiques	241
tableau 20	Durée pour rejoindre les gares du RER-C au départ de Massy-Palaiseau (en utilisant uniquement le RER-C) : valeurs synthétiques.....	257
tableau 21	Durée pour atteindre les gares du RER-C au départ de Massy-Palaiseau (en utilisant toutes les lignes) : valeurs synthétiques.....	258
tableau 22	Evaluation globale des conséquences structurelles des trois scénarii de perturbations à 7h.	262
tableau 23	Durée moyenne par agent pour atteindre leur destination finale.....	312

TABLE DES ENCADRES

encadré 1	Les besoins d'information en fonction de la situation.....	90
encadré 2	Hypothèses à discuter	98
encadré 3	Fonction Implementationparametresperturbation.....	168
encadré 4	Fonction Reprisecirculations	169
encadré 5	Calcul(s) de nœud à nœud	176
encadré 6	Calcul(s) unipolaire(s)	177
encadré 7	Calcul(s) multipolaire(s).....	178
encadré 8	Simulation OD.....	180
encadré 9	Simulation ODI sans variation de la date de diffusion d'information.....	182
encadré 10	Simulations ODI avec variation de la date de diffusion d'information.....	183
encadré 11	Principales étapes de l'application Maillage	198
encadré 12	Principales étapes de l'application Créationlignes	204
encadré 13	Principales étapes de l'application Générationdemande	207

TABLE DES CARTES

carte 1	Vulnérabilité du réseau de métro parisien à la rupture individuelle de ses stations et de ses tronçons ferrés	118
carte 2	Impact de la rupture de la station Châtelet : vulnérabilité des stations (partie supérieure) et reports de centralité intermédiaire (partie inférieure).....	119
carte 3	Vulnérabilité du réseau routier pour le transport de marchandises : suppression des arcs	121
carte 4	Vulnérabilité du réseau routier pour le transport de marchandises : suppression des nœuds	122
carte 5	Vulnérabilités des populations compte tenu de la faible présence d'enjeux de proximité vitaux (eau, nourriture, soins, prise en charge des sinistrés) dans les zones susceptibles de se retrouver isolées	124
carte 6	Localisation des perturbations étudiées	223
carte 7	Scénario 1 : interruption de trafic sur la ligne N entre Plaisir-Grignon et Mantes-la-Jolie	224
carte 8	Scénario 2 : interruption de trafic sur le RER-E entre Magenta et Haussmann St-Lazare	224
carte 9	Scénario 3 et scénario 4 : interruption de trafic entre Austerlitz et Boulevard Victor, interruption de trafic entre Austerlitz et Invalides	225
carte 10	Situation de Pontoise sur le réseau	236
carte 11	Perte de temps pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ à 7h47 de Mantes-la-Jolie (interruption de trafic entre Mantes-la-Jolie et Plaisir-Grignon ...	249
carte 12	Report des chemins minimaux pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ 7h47 de Mantes-la-Jolie (interruption de trafic entre Mantes-la-Jolie et Plaisir-Grignon.....	250
carte 13	Perte de temps pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ d'Austerlitz à 8h (interruption de trafic entre Invalides et Austerlitz).....	253
carte 14	Perte de temps pour atteindre les nœuds du réseau pour un départ à 8 d'Austerlitz (interruption de trafic entre Austerlitz et Invalides).....	254
carte 15	Report de chemins minimaux pour un départ d'Austerlitz à 8h (interruption de trafic entre Austerlitz et Invalides).....	255
carte 16	Report des itinéraires lors d'une interruption de trafic entre Haussmann St-Lazare et Magenta (sur l'ensemble d'une journée) (1)	277
carte 17	Report des itinéraires lors d'une interruption de trafic entre Haussmann St-Lazare et Magenta (sur l'ensemble d'une journée) (2)	278
carte 18	Report des itinéraires lors d'une interruption de trafic entre Haussmann St-Lazare et Magenta (sur l'ensemble d'une journée) (3)	279

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION GENERALE	9
PARTIE I : D'UN CONSTAT D'INSATISFACTION A DES QUESTIONNEMENTS DE RECHERCHE.....	15
Introduction	17
Chapitre I Déséquilibre modal dans les transports et problèmes engendrés	19
Introduction.....	19
Section 1 - Caractéristiques générales	20
A- Evolution de l'organisation spatiale et temporelle des territoires	21
B- Handicaps des transports en commun comparativement à l'automobile.....	22
Section 2 - Problèmes liés à ce déséquilibre.....	23
A- Dépendance vis-à-vis du véhicule individuel	23
B- Développement urbain non souhaitable	24
C- Pressions sur l'environnement naturel	25
Conclusion	28
Chapitre II Aménagement et transport : actions correctives	29
Introduction.....	29
Section 1 - L'Aménagement-Urbanisme	30
A- Fondements théoriques	30
B- Aménagement des et par les transports	31
Section 2 - Actions en faveur d'un report modal.....	33
A- Utilisation de l'espace.....	34
B- Tarification incitative	34
C- Amélioration de la qualité des modes de transport alternatifs.....	36
D- Coordination des actions.....	37
Conclusion	38
Chapitre III Performance des transports collectifs	39
Introduction.....	39
Section 1 - Définitions, typologies et caractéristiques spécifiques aux transports collectifs	40
A- Typologies relatives aux transports en commun	40
B- Caractéristiques spécifiques aux transports en commun	42
Section 2 - Objectifs de qualité de service et missions de service public.....	45
A- Notion de service public	45
B- Le voyageur : utilisateur du service	46
Section 3 - Deux approches de la qualité de service	47
A- Démarche de mise en qualité, adaptée aux transports en commun	47
B- Approche territoriale de la qualité de service.....	50
C- Eléments retenus dans le cadre de cette recherche.....	51
Conclusion	53
Chapitre IV Vulnérabilité des transports collectifs	55
Introduction.....	55
Section 1 - Vocabulaire associé à la notion de risque	56
A- Fiabilité et vulnérabilité	58
B- Définition de l'aléa.....	59
C- Définitions de la vulnérabilité.....	60
Section 2 - Identification des enjeux des transports collectifs.....	62
A- Caractérisation des enjeux	62

B- Vulnérabilité amont, interne et aval	63
C- Vulnérabilité matérielle, structurelle et fonctionnelle	64
Section 3 - Facteurs de perturbations dans les transports collectifs	66
A- Approche typologique des aléas et interactions	66
B- Propagation des perturbations	71
Section 4 - Moyens de protection	72
A- Actions spécifiques : améliorer la résistance face aux aléas	73
B- Les actions à un niveau global : adaptations aux perturbations	74
C- Notion de Système de Transport Intelligent.....	77
Section 5 - Intensité des situations perturbées, mesure des dommages.....	78
A- Mesure des dommages.....	78
B- Des perturbations de nature et d'intensité variables.....	80
Conclusion	82
Chapitre V Information des voyageurs dans les transports collectifs.....	83
Introduction.....	83
Section 1 - Approche historique	84
Section 2 - Approche théorique	85
A- Théorie de l'information et de la communication.....	86
B- Modèles d'inspiration psychosociologique	86
C- Modèles d'inspiration culturaliste ou anthropologique.....	87
D- Notion d'information appliquée aux transports en commun.....	87
Section 3 - Approche typologique	88
A- Informations monomodales et multimodales	88
B- Informations théoriques et conjoncturelles	89
C- Nature de l'information diffusée.....	90
D- Lieux de diffusion.....	91
E- Informations interactives ou non.....	92
F- Informations collectives ou personnalisées	92
Conclusion	93
Synthèse, définition des questionnements et de la méthode	95
Principales étapes de la démarche	95
Problématique générale et questionnements spécifiques de cette recherche.....	95
Méthode	99
Modélisation	99
Terrain d'étude.....	101
Travail réalisé avec Transilien SNCF	101
PARTIE II : DE LA FORMALISATION DES QUESTIONNEMENTS A DES OUTILS	103
INFORMATIQUES	103
Introduction	105
Chapitre I Approche du problème de modélisation.....	107
Introduction.....	107
Section 1 - Formalisation du questionnaire spécifique	108
Section 2 - Principes de la modélisation et de la simulation : applications à notre	
recherche.....	109
A- Une représentation abstraite.....	111
B- Une approche nécessairement pluridisciplinaire	111
C- Etapes de la modélisation.....	111
D- Différents types de modélisation.....	112
E- Positionnement de notre modèle	113
F- Limites inhérentes à cette approche.....	115
Section 3 - Applications proches de nos questionnements	115
A- Analyse de la vulnérabilité.....	116
B- Modèles de flux de piétons	125
Conclusion	128

Chapitre II Champs théoriques mobilisés	129
Introduction.....	129
Section 1 - Théorie des systèmes.....	130
A- Approche systémique.....	130
B- Eléments constitutifs de l'offre de transport	131
C- Flux transitant au sein du système.....	133
D- Interfaces et frontières.....	134
E- Relations du système avec son environnement	134
F- Régulation du système.....	135
Section 2 - Théorie des graphes.....	138
A- Présentation générale de la théorie des graphes	139
B- Le réseau de transports en commun modélisé par un graphe	142
C- Représentation du réseau.....	143
D- Quelques propriétés et indices de caractérisation des graphes.....	144
Section 3 - Systèmes multi-agents.....	147
A- Principes	147
B- Application à notre recherche	148
C- Difficultés inhérentes à ce type d'approche	148
Conclusion	150
Chapitre III Modèle PERTURB	151
Introduction.....	151
Section 1 - Précision des objectifs du modèle	152
Section 2 - Hypothèses de travail	154
Section 3 - Modélisation par objets : vers une implémentation informatique.....	155
A- Principes de la modélisation par objets.....	156
B- Implémentation informatique des classes.....	157
C- Classes de PERTURB	158
Section 4 - Fonctionnement	160
A- Parties communes à tous les modules	161
B- Parties spécifiques aux modules OD, ODI et ODIC	171
C- Calculs préliminaires (module Prelim) et calculs basés sur offre (module O)	175
D- Simulations basées sur l'offre et la demande (module OD).....	179
E- Simulations basées sur l'offre, la demande et l'information (ODI).....	181
F- Simulations basées sur l'offre, la demande, l'information et la capacité (ODIC)	184
Section 5 - Performance des traitements	185
Section 6 - Validité du modèle	186
Conclusion	188
Chapitre IV Plate-forme de simulation.....	189
Introduction.....	189
Section 1 - MAPNOD.....	191
A- Présentation générale	191
B- Adaptation à nos besoins.....	192
Section 2 - RES.....	194
Section 3 - Application <i>Maillage</i>	196
A- Objectifs et principes	196
B- Entrées et sorties	197
C- Principales étapes	198
Section 4 - Application <i>Créationlignes</i>	199
A- Objectifs et principes	199
B- Entrées et sorties	200
C- Principales étapes	201
Section 5 - Application <i>Générationdemande</i>	205
A- Objectifs et principes	205
B- Entrées et sorties	206
C- Principales étapes	207
Conclusion	208

Conclusion.....	209
PARTIE III : APPLICATIONS	211
Introduction	213
Chapitre I Applications sur l'Île-de-France	215
Introduction.....	215
Section 1 - Contexte général	216
A- Approche historique.....	216
B- Organisation institutionnelle	218
Section 2 - Travail préparatoire	219
A- Données obtenues	219
B- Définition de scénarii de perturbations	222
Section 3 - Calculs de nœud à nœud : mesure de la dégradation des potentialités relationnelles entre deux nœuds du réseau	226
A- Interruption de trafic entre Magenta et Haussmann St-Lazare sur le RER-E	226
B- Grève sur le RER-C	232
C- Interruption de trafic entre Austerlitz et Boulevard Victor : influence du Tramway T3.....	238
D- Analyse des formes des figures.....	241
Section 4 - Calculs unipolaires : mesure de la dégradation des opportunités de déplacement au départ d'un nœud du réseau	245
A- Interruption de trafic entre Mantes-la-Jolie et Plaisir-Grignon	245
B- Interruption de trafic entre Austerlitz et Invalides	251
C- Mouvement social sur le RER-C.....	256
Section 5 - Calculs multipolaires : évaluation des pertes d'accessibilité sur le réseau ..	262
Section 6 - Simulations avec offre, demande (et information).....	265
A- Simulations avec un seul agent	265
B- Simulations avec plusieurs agents.....	270
Section 7 - Valorisation monétaire du temps.....	281
Conclusion	283
Chapitre II Applications sur des systemes théoriques de transport.....	285
Introduction.....	285
Section 1 - Applications sur un réseau de 100 nœuds à maille triangulaire	286
A- Le réseau initial et la création des lignes	286
B- Perturbation étudiée	288
C- Calculs multipolaires : exploration systématique	288
D- Calculs multipolaires : travail sur le réseau à 4 lignes	290
E- Simulations avec plusieurs agents	294
Section 2 - Applications sur un réseau avec des rocade.....	301
A- Caractéristiques du réseau.....	301
B- Calculs multipolaires.....	302
C- Simulations avec offre et demande	305
D- Simulations avec offre, demande et information	306
E- Simulations avec offre, demande, information et capacité.....	310
Section 3 - Réseau de 100 nœuds de forme arrondie.....	314
A- Ouverture sur l'étude de l'encombrement dans les transports collectifs.....	314
B- Conception du système de transport.....	315
C- Simulations avec différentes capacités de véhicules	317
Conclusion	320
Conclusion.....	321
Discussion des hypothèses.....	321
CONCLUSION GENERALE.....	327
Retour sur le travail effectué.....	329
Préconisations	332

Aménagement et information dans les transports.....	336
Perspectives	339
Modélisation	339
Applications dans le domaine de l'Aménagement	342
GLOSSAIRE, SIGLES ET BIBLIOGRAPHIE.....	345
Glossaire.....	346
Sigles.....	354
Bibliographie.....	357
TABLES	385



Julien COQUIO

La performance adaptative des systèmes de transports collectifs



Modélisation, mesures de vulnérabilité et évaluation quantitative du rôle de l'information des voyageurs dans la régulation des situations perturbées

Résumé

Dans une perspective de report modal, la performance adaptative est un facteur important du développement des systèmes de transports collectifs. Il est donc fondamental de disposer d'outils permettant d'évaluer leur vulnérabilité à des perturbations et le rôle de certaines actions comme l'information des voyageurs. Le modèle PERTURB et la plate-forme de simulation, développés dans le cadre de cette recherche, ont ainsi pour objet de mesurer la vulnérabilité structurelle et fonctionnelle des transports en commun ainsi que le rôle de l'information des voyageurs dans la régulation de situations perturbées. Trois champs théoriques sont mobilisés : théorie des systèmes, théorie des graphes et systèmes multi-agents. Les simulations sont réalisées sur un terrain d'étude (Île-de-France) et des systèmes de transport théoriques. Elles permettent d'effectuer des préconisations en matière d'Aménagement des transports et d'information des voyageurs mais suscitent également de nouvelles interrogations. Comment intégrer l'information des voyageurs dans l'optimisation du traitement des situations perturbées ? Comment concilier une transparence de l'information et éviter des reports trop massifs de flux de voyageurs ?

Mots-clés : Aménagement-urbanisme, transports collectifs, vulnérabilité, risques, performance adaptative, perturbations, information, systèmes de transports intelligents, modélisation, modèle, simulations, théorie des systèmes, théorie des graphes, systèmes multi-agents (SMA).

Résumé en anglais

In a perspective of modal transfer, adaptative performance is an important factor in the development of public transport systems. Tools are therefore necessary to allow estimation of their vulnerability to perturbations, as well as that of the role played by specific actions like passengers' information. The PERTURB model and the simulation platform developed in this research aim to measure the structural and functional vulnerability of public transport, as well as the role played by passengers' information in the regulation of disrupted situations. This study explores three theoretical fields : systems' theory, graphs theory and multi-agents systems. Simulations are used in a field study (the region of Île-de-France) and in theoretical transportation systems. These simulations allow us not only to formulate recommendations regarding transport planning and passengers' information, but they also rise new issues. How can passengers' information be integrated in order to get the optimal management of disrupted situations? Is it possible to deliver clear information while avoiding excessive transfer of passengers' flow at the same time ?

Keywords : town and country planning, public transport, vulnerability, risks, adaptative performance, disruptions, information, intelligent transportation systems, modelling, systems theory, graph theory, multi-agents systems.