

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

DIAGNOSTIC ET PERFORMANCE D'UNE LIGNE DE TRAIN
DE BANLIEUE À L'AIDE DE DONNÉES GPS

VINCENT DIONNE

DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION DU
DIPLOME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE CIVIL)

NOVEMBRE 2006

© Vincent Dionne, 2006



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-25538-4

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-25538-4

NOTICE:

The author has granted a non-exclusive license allowing Library and Archives Canada to reproduce, publish, archive, preserve, conserve, communicate to the public by telecommunication or on the Internet, loan, distribute and sell theses worldwide, for commercial or non-commercial purposes, in microform, paper, electronic and/or any other formats.

The author retains copyright ownership and moral rights in this thesis. Neither the thesis nor substantial extracts from it may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

AVIS:

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque et Archives Canada de reproduire, publier, archiver, sauvegarder, conserver, transmettre au public par télécommunication ou par l'Internet, prêter, distribuer et vendre des thèses partout dans le monde, à des fins commerciales ou autres, sur support microforme, papier, électronique et/ou autres formats.

L'auteur conserve la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent cette thèse. Ni la thèse ni des extraits substantiels de celle-ci ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans son autorisation.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms may have been removed from this thesis.

Conformément à la loi canadienne sur la protection de la vie privée, quelques formulaires secondaires ont été enlevés de cette thèse.

While these forms may be included in the document page count, their removal does not represent any loss of content from the thesis.

Bien que ces formulaires aient inclus dans la pagination, il n'y aura aucun contenu manquant.


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

DIAGNOSTIC ET PERFORMANCE D'UNE LIGNE DE TRAIN
DE BANLIEUE À L'AIDE DE DONNÉES GPS

Présenté par : DIONNE Vincent

En vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise Ès Sciences Appliquées

A été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. BAASS Karsten, Ph. D., Président

M. CHAPLEAU Robert, Ph. D., membre et directeur de recherche

M. BERGERON Daniel, M.SC.A., membre

Remerciements

Un mémoire c'est comme un gâteau

Merci à :

L'AMT et Daniel Bergeron
pour les ingrédients de base!;

Professeur Chapleau
pour une recette,
de la poudre à pâte,
et une température très élevée!;

Professeur Baass, Bruno, Guillaume et Daniel
pour l'équipement nécessaire
et le guide d'utilisation!;

Mes collègues les disciples :
Alfred, Émilie, Gang, Luc, Loukas,
Marlène, Sébastien, Stéphane, Talaki et Tim
pour le glaçage chocolaté!;

Ma famille et surtout mon amour Annie
pour avoir évité que le tout se dégonfle!

Résumé

Les sociétés de transports collectifs ont bénéficié dans les dernières années d'un apport technologique important provenant des domaines informationnels et géomatiques. En effet, le contexte spatio-temporel d'un système de transport engendre un intérêt particulier pour les systèmes d'information géographiques (SIG) et pour les technologies de géolocalisation, spécialement celle du GPS. Les recherches ont démontré le potentiel qu'offrent ces nouvelles technologies par rapport aux techniques traditionnelles d'analyse et leur intégration dans les sociétés de transport est aujourd'hui omniprésente. Utilisés dans un premier temps pour des fins de localisation en temps réel de véhicule, les relevés GPS bruts archivés représentent un historique de déplacements renfermant une quantité importante d'information caractérisant le service offert.

Ce mémoire aspire donc à traiter méthodiquement et selon une philosophie d'analyse désagrégée une archive de relevés GPS provenant d'une ligne de train de banlieue pour en extraire des indicateurs de performance selon la perspective du planificateur ou de l'utilisateur. Ainsi, elle a pour but d'intégrer les connaissances actuelles et les outils disponibles provenant des technologies informationnelles et des SIG pour proposer des méthodes automatisées et des visualisations complexes permettant de caractériser et diagnostiquer le service.

Cette recherche débute par l'application d'une méthode de segmentation permettant le calcul des temps de parcours et des heures de départ. Une analyse statistique détermine ensuite le service moyen, régulier. Puis, des représentations novatrices de phénomènes espaces-temps sont mises à contribution pour la détection et la caractérisation des incidents sur la ligne. L'approche désagrégée propose un traitement fin et sans perte de résolution de l'information pour arriver à une détection automatisée en temps réel des délais et d'en déduire l'impact sur le service à court terme aux fins d'estimation des heures de départs.

Abstract

Transit agencies are recently benefiting from a new wave of informational and geomatic technologies. In fact, the spatiotemporal context of a transportation system implies an important role for geographical information systems (GIS) and automatic vehicle localisation technologies such as Global Positioning Systems (GPS). Studies have demonstrated the strong potential offered by those technologies in comparison with traditional analysis techniques. Today, those technologies are widely used for real time monitoring of vehicles, but the archives containing raw GPS data still hide lots of unprocessed information describing the offered service.

Therefore, this research aspires to methodically process high resolution archived raw GPS data coming from an urban rail transit operation in order to extract performance indicators from a system analyst and user point of view. Current knowledge and research will be integrated with the most recent informational and GIS tools to provide automated data processing and complex results visualisation allowing a fine service characterisation and diagnosis.

The analysis begins with calculations of travel times and departure times. Based on segmentation techniques, this approach enables a comparative statistical analysis determining the most regular service. Then, innovative representations of spatiotemporal dynamics contribute to incident detection and characterisation. Furthermore, a disaggregate approach permits, without resolution loss, a fine data processing leading to a real time delays calculation and incident reporting. Finally, prediction models are investigated and a short term delay estimation process is developed.

Table des matières

REMERCIEMENTS	IV
RÉSUMÉ	V
ABSTRACT	VI
TABLE DES MATIÈRES	VII
LISTE DES FIGURES.....	XI
LISTE DES TABLEAUX.....	XVII
LISTE DES ANNEXES.....	XIX
LISTE DES ANNEXES.....	XIX
LISTES DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	XX
CHAPITRE 1. INTRODUCTION	1
CHAPITRE 2. DYNAMIQUE ET PERFORMANCE D’UN TRAIN DE BANLIEUE ..	6
2.1 Systèmes de transports publics.....	7
2.1.1 Composantes physiques	8
2.1.2 Acteurs et interactions.....	9
2.1.3 Systèmes de transport intelligent	11
2.2 Mesures de performance	12
2.2.1 Perspectives.....	13
2.2.2 Plan de mesure de la performance	16
2.2.3 Ponctualité.....	17
2.2.4 Temps de parcours	19

2.3 Prédiction de performance	25
2.4 Le train de banlieue comme objet d'analyse.....	28
2.5 Montréal et l'AMT	33
CHAPITRE 3. LOCALISATION AUTOMATIQUE DE VÉHICULE PAR GPS.....	37
3.1 Intérêts des AVL	38
3.2 La technologie GPS.....	40
3.2.1 Fonctionnement.....	41
3.2.2 Précision et sources d'erreur	44
3.2.3 Positions, balises, routes et tracés	45
3.3 Applications techniques	46
3.3.1 Enquêtes de temps de parcours	46
3.3.2 Enquête sur la mobilité des personnes	54
CHAPITRE 4. SIG ET VISUALISATION DE PHÉNOMÈNES DE TRANSPORT	56
4.1 Acquisition et structuration	57
4.1.1 Projection et datum	59
4.1.2 Qualité de l'information.....	62
4.2 Analyse et traitement.....	63
4.2.1 Applications	64
4.2.2 Analyse spatio-temporelle.....	65
4.2.3 Map Matching et référence linéaire	67
4.3 Présentation et visualisation.....	70
4.3.1 Navigation spatiale, temporelle et thématique.....	70
4.3.2 Modèles numériques de terrain	73
4.3.3 Documentation de graphiques techniques.....	76

CHAPITRE 5. CARACTÉRISATION DE LA LIGNE ET INDICATEURS DE PERFORMANCE	79
5.1 Préparation des données.....	80
5.1.1 Données originales.....	80
5.1.2 Traitements préliminaires	81
5.2 Procédures de calcul de temps de parcours.....	83
5.2.1 Segmentation.....	83
5.2.2 Temps de parcours	85
5.3 Caractérisation de la ligne.....	86
5.3.1 Description d’une journée et d’un voyage	86
5.3.2 Limites de vitesse.....	88
5.3.3 Profil d’élévation.....	89
5.3.4 Type de parcours	90
5.3.5 Temps d’attente en gare	92
5.3.6 Détermination du profil régulier de vitesse.....	93
5.3.7 Relation entre distance intergare, vitesse maximale et temps de parcours	96
5.3.8 Effet de la période de pointe	97
5.3.9 Distance de sécurité	97
CHAPITRE 6. DÉTECTION ET DESCRIPTION DES INCIDENTS	98
6.1 Reconstruction de l’horaire planifié.....	99
6.1.1 Détermination de l’heure de départ médiane	99
6.1.2 Reconstruction de la chaîne OD.....	101
6.1.3 Exemple du train 112	102
6.2 Identification d’incidents	104
6.2.1 Méthode visuelle	104
6.2.2 Rapport synthèse automatisé.....	107
6.3 Description des incidents	108

6.3.1 Représentation multidimensionnelle.....	108
6.3.2 Analyse tendancielle	111
6.3.3 Impact sur les usagers	113
6.3.4 Évolution temporelle.....	116
6.3.5 Catégorisation des incidents.....	119
CHAPITRE 7. TEMPS RÉEL ET PRÉDICTION.....	122
7.1 Procédure de détection d’incidents temps réel.....	122
7.1.1 Approche désagrégée	123
7.1.2 Détection d’un incident en gare	124
7.1.3 Détection d’un incident en route	125
7.2 Prédiction de l’heure de départ	127
7.2.1 Élaboration de la procédure	127
7.2.2 Résultats	131
CHAPITRE 8. CONCLUSION	138
RÉFÉRENCES.....	143
ANNEXE	153

Liste des figures

Figure 1.1 Concepts et interactions abordés dans la revue de littérature	3
Figure 1.2 Procédures et flot informationnel	5
Figure 2.1 La mobilité et son impact sur le système de transport et le système d'activités	8
Figure 2.2 L'interaction primale dans le système de transport	9
Figure 2.3 Concept d'association spatio-temporelle de HagerStrand	10
Figure 2.4 Cycle d'amélioration de la qualité	12
Figure 2.5 Fonction de performance (Manheim, 1979)	12
Figure 2.6 Les facteurs de disponibilité de service	14
Figure 2.7 Processus de développement d'un plan de mesure de performance (Traduit de (TRB, 2003c))	16
Figure 2.8 Graphique Vitesse-Distance-Temps entre deux stations (Hill, Bond, 1995)	21
Figure 2.9 Délais associés au temps de parcours (FHWA, 1998).....	23
Figure 2.10 Diagramme espace-temps illustrant les différents délais à une intersection (Hoeschen, Bullock, Schlappi, 2005).....	23
Figure 2.11 Schéma d'un parcours d'autobus comprenant plusieurs arrêts.....	26
Figure 2.12 Signalisation de base sur une ligne commutée (TRB, 2003a)	30
Figure 2.13 Impact sur l'accélération de différents ratios puissance/poids.....	31
Figure 2.14 Résistance de certains éléments en fonction de la vitesse	31
Figure 2.15 Vitesse théorique d'une locomotive 800 (AMT) en fonction de la distance pour le 0-100 km/h (Dorval, 2005).	32
Figure 2.16 Réseau de la STM (STM, 2006b).....	34
Figure 2.17 Réseau de trains de banlieue de la grande région métropolitaine.....	34
Figure 3.1 Les différentes applications du GPS en transport.....	38
Figure 3.2 Système GPS	41

Figure 3.3 Triangulation d'une position (A) à partir d'un receveur GPS a priori désynchronisé. Les temps ne sont pas réels(Kowoma GPS, 2005).	43
Figure 3.4 Différentes étapes de transfert de l'information en temps réel (CALCCIT, 2005)	43
Figure 3.5 Profil de vitesse d'une voiture qui circule à ciel ouvert (à gauche) comparativement à une route en forêt (à droite) (OXTS, 2005).....	45
Figure 3.6 Exemple d'un tracé GPS et de deux balises "waypoint" dans <i>TrackMaker</i>	46
Figure 3.7 Étapes de la méthodologie de calcul de temps de parcours (Quiroga, 1997)	49
Figure 3.8 Représentation vectorielle d'un réseau basé sur des données GPS(Quiroga, Bullock, 1998).....	50
Figure 3.9 Diagramme espace-temps illustrant les différentes limites nécessaires au calcul du temps de parcours.....	50
Figure 3.10 Flot informationnel pour l'analyse des temps de parcours (Bullock, Jiang, Stopher, 2005)	52
Figure 3.11 Représentation nœud-lien d'un tracé d'autobus (Lin, Zeng, 1999).....	53
Figure 3.12 Approche bayésienne d'intégration de données GPS à d'autres sources pour l'imputation des motifs d'activités.....	54
Figure 3.13 Identification de motifs d'activités par zones tampons(Wolf, Schonfelder, Samaga, Oliveira, Axhausen, 2004)	55
Figure 4.1 Cycle informationnel et architecture à 3 niveaux (inspiré de (Thevenin, 2002)).....	57
Figure 4.2 Information vectorielle (à gauche) et matricielle (à droite) (Thevenin, 2002)	58
Figure 4.3 Structuration en couche d'un SIG	59
Figure 4.4 Trois types de projection cartographique (surface plane, conique et cylindrique) (OWU, 2004).....	60
Figure 4.5 Représentation de 4 points aux extrémités de l'île de Montréal	61
Figure 4.6 Prismes spatio-temporels (Miller, 2004)	66

Figure 4.7 Exemple d'un modèle d'évolution spatio-temporelle par séquence de capture (Morency, 2004).....	66
Figure 4.8 Passage d'une position latitude-longitude à une référence linéaire.	68
Figure 4.9 Distance entre un point et une ligne	69
Figure 4.10 Exemple d'erreur probable lors d'un "map matching"	69
Figure 4.11 Arbre hyperbolique (Neumann, 2005).....	71
Figure 4.12 Carte thématique (<i>Themescape</i>)(Neumann, 2005)	71
Figure 4.13 Carte de nouvelle récursive (Neumann, 2005)	72
Figure 4.14 Représentation de plusieurs profils de vitesse dans Google Earth.	72
Figure 4.15 Intégration des données pour réaliser un environnement 4D interactif (Inspiré de (Pack, Weisberg, Bista, 2005))	74
Figure 4.16 Rendu 4D temps réel d'un accident à 2 véhicules bloquant 2 lignes de trafic avec 3 véhicules d'urgence sur les lieux (Pack, Weisberg, Bista, 2005).	74
Figure 4.17 Représentation 3D du réseau de la STO incluant un modèle numérique de terrain et des objets vectoriels 3D représentant deux trajets d'autobus et deux embarquements	75
Figure 4.18 Utilisation originale de l'espace, la couleur, la forme, la taille, etc, pour représenter une matrice OD(Cao, Chapleau, 2006).	75
Figure 4.19 Éléments de caractérisation d'un ensemble de données pour fin de visualisation	77
Figure 4.20 Exemple de description technique d'un graphe construit à partir d'un SIG	78
Figure 5.1 Ligne Montréal - Rigaud (AMT).....	79
Figure 5.2 Identification visuelle des zones habituelles d'arrêts.....	84
Figure 5.3 Algorithme de calcul des temps de parcours	85
Figure 5.4 Diagramme espace temps pour une journée type (sans la soirée)	87
Figure 5.5 Détermination visuelle des limites de vitesse.....	89
Figure 5.6 Profil d'élévation de la ligne.....	90

Figure 5.7 Diagramme vitesse position illustrant la différence entre un trajet normal et un trajet express.....	91
Figure 5.8 Temps d'attente en gare.....	92
Figure 5.9 Profil d'accélération sur le premier mille en quittant la gare Beaurepaire.....	93
Figure 5.10 Accélération en fonction de la distance – courte distance (gauche) et longue distance (droite).....	94
Figure 5.11 Profil de vitesse prédit (triangles blancs) et profil de vitesse réel (points noirs)	95
Figure 5.12 Temps de parcours en fonction de la distance intergare et représentation colorée de la vitesse maximale sur le parcours.	96
Figure 5.13 Détermination des distances et délais de sécurité dans un diagramme espace temps	97
Figure 6.1 Diagramme espace-temps (en bas) et densité de point (en haut) de tous les parcours du train 112 sur la période d'étude.	99
Figure 6.2 Distribution des heures de départ à la gare Montréal-Ouest.....	100
Figure 6.3 Comparaison des distributions des heures de départ pour une gare en début de parcours (Rigaud) et une gare en fin de parcours (Vendôme) pour le train 112	101
Figure 6.4 Superposition des heures de départs médianes et planifiées.	103
Figure 6.5 Ralentissement d'un train (étoile) suite à l'examen visuel du profil de vitesse.....	104
Figure 6.6 Représentation colorée des retards aux départs d'une gare et par rapport aux temps de parcours moyen.	105
Figure 6.7 Carte de visualisation des retards	106
Figure 6.8 Représentation d'une limitation de vitesse temporaire à l'aide d'un diagramme espace vitesse (en haut) et espace temps (en bas)	109
Figure 6.9 Représentation colorée du retard pour une période de pointe AM dans un graphique espace-temps.	110

Figure 6.10 Analyse complémentaire à l'aide d'un diagramme espace-temps et espace- vitesse.....	110
Figure 6.11 Modèle numérique de terrain illustrant les retards en 3D (haut) et 2D (bas).....	112
Figure 6.12 Représentation 4D des incidents et de leur retard	113
Figure 6.13 Profil de charge sur la ligne Montréal Dorion - Train en pointe du matin (AMT)	114
Figure 6.14 Diagramme espace-temps illustrant le retard, l'horaire planifié et la charge à chaque gare.	116
Figure 6.15 Illustration d'une application Excel simulant l'évolution temporelle de diagrammes (à gauche de haut en bas) espace-temps, espace-vitesse, espace-retard et d'histogrammes illustrant (à droite de haut en bas) la longueur de l'attente à chaque gare et du retard accumulé selon le groupe.....	118
Figure 6.16 Visualisation VRML espace temps vitesse avec représentation du retard .	119
Figure 6.17 Caractérisation et catégorisation des incidents	120
Figure 7.1 Flot de traitement présenté à ce chapitre	123
Figure 7.2 Diagramme position – retard désagrégé	123
Figure 7.3 Les 4 catégories de calcul du retard désagrégé.....	124
Figure 7.4 Distinction entre un délai causé par un incident précédent ou par un nouvel incident.....	125
Figure 7.5 Exemple d'un train au ralenti déterminé par un écart à la zone de vitesse acceptable.....	127
Figure 7.6 Différentes causes de délais à modéliser dans la procédure d'estimation des heures de départs.....	129
Figure 7.7 Simulation des différentes estimations de l'heure de départ du train 112 à la gare Montréal-Ouest le 2 septembre 2003	132
Figure 7.8 Reprise de la simulation avec correctifs.	133

Figure 7.9 Simulation des différentes estimations de l'heure de départ du train 16 à la gare Montréal-Ouest le 2 septembre 2003. Cas d'un train qui rattrape légèrement son retard.	134
Figure 7.10 Distribution de la différence en seconde entre l'heure de départ réelle et l'heure de départ estimée. Une différence négative signifie que le train devance l'heure de départ estimée.	134
Figure 7.11 Distribution des écarts à l'horaire planifié vs distribution des écarts à l'horaire estimé.	135
Figure 7.12 Exemple de faible corrélation entre un passage subissant un ralentissement interstation et le passage suivant.	136

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Niveau de service associé à la ponctualité	14
Tableau 2.2 Différentes applications de données de temps de parcours.....	20
Tableau 2.3 Vitesse en fonction de la distance et du ratio puissance/poids.....	29
Tableau 4.1 Coordonnées des 4 extrémités de l'île de Montréal selon les 3 formats les plus populaires.	61
Tableau 4.2 Variation en mètres entre deux mesures de distance selon le système de coordonnées	62
Tableau 5.1 Description des champs de la base de données originale (Les champs conservés pour cette recherche en gris)	81
Tableau 5.2 Base de données traitée (Champs additionnés en gris)	82
Tableau 5.3 Table contenant la codification des zones d'arrêt potentielles	84
Tableau 5.4 Table des temps de parcours et des temps d'attente en gare	86
Tableau 5.5 Extrait de la table sur les temps de parcours (-1 indique un temps d'arrêt en gare).....	88
Tableau 5.6 Table contenant la codification des limites de vitesse	89
Tableau 5.7 Distribution des différents types de trajet.	91
Tableau 5.8 Vitesses attendues à différentes distances de la gare selon le départ ou l'arrivée en gare	95
Tableau 5.9 Moyenne des temps de parcours pointe et hors pointe.....	97
Tableau 6.1 Extrait de la matrice OD et des tables <i>Access</i> résultantes pour le train 112 entre le 7 août 2003 et le 28 juin 2004	102
Tableau 6.2 Table de description d'un incident.....	107
Tableau 6.3 Résultat synthèse de ponctualité en partance de la gare Montréal-Ouest (fin de ligne) pour les trains en pointe AM direction centre-ville entre le 3 août et le 28 juin 2004.....	108
Tableau 7.1 Table comprenant l'ensemble des prédictions émises	132

Tableau 7.2 Qualité des estimations avec l'ajout d'un filtre de Kalman	135
--	-----

Liste des annexes

Annexe A Procédure d'Analyse de Performance et d'Identification des Incidents..... 149

Listes des sigles et abréviations

AMT : Agence Métropolitaine des Transports

AVL : Automatic Vehicle Localisation

GPS : Global Positionning System

OD : Origine-Destination

CIT Conseil Intermunicipal des Transports

STM Société de Transport de Montréal

OMIT : Organisme Intermunicipaux de Transport en Commun

TTC : Toronto Transit Comission

PVT : Position Vitesse Temps

SGBD : système de gestion de base de données

GUI : Graphical User Interface

DEM : Data Elevation Model

MNT : Modèle Numérique de Terrain

COCG : Conseil Canadien de la Géomatique

SHP : Shapefile

WGS1984: World Geodetic Datum 1984

NAD83: North American Datum de 1983

FTA: Federal Transit Administration

DOT: Department of Transportation

STI: Système de Transport Intelligents

Chapitre 1. Introduction

“Lance at a glance: Resting heart rate: 32-34. Max heart rate: 201. Endurance rides: 5-6 hours for 100 - 130 miles” (www.lancearmstrong.com, 2006)

Les athlètes d'élite sont au fait des enjeux de performance. En effet, l'atteinte d'un niveau optimal de rendement constitue un défi quotidien. Dès lors, entraînement, nutrition et mode de vie sont contrôlés pour assurer la coïncidence des conditions idéales au moment de performer. Il importe ensuite de réaliser la meilleure performance et de la répéter le plus régulièrement possible. Outils de mesure, de visualisation et de statistique s'allient alors pour cerner chaque élément de la dynamique de l'athlète et permettre d'en identifier leurs faiblesses, causes et conséquences. Possiblement archivés sur une longue période, ces éléments forment alors des indicateurs assurant le développement maximal de l'athlète.

La présente recherche porte sur un athlète de taille, celui-ci déplaçant des millions de passagers kilomètres annuellement. En effet, le train de banlieue a comme mandat le transport d'individus, et ce, en respectant des contraintes de performance quotidiennes. Malgré le fait que l'utilisation des technologies comme support à l'entraînement des athlètes d'élite ne date pas d'hier, le train de banlieue montréalais ne bénéficie que depuis quelques années d'une technologie de surveillance avant-gardiste, le GPS. Celui-ci offre une information de haute résolution sur le déplacement du train et ses archives édifient un important historique spatio-temporel. En parallèle, les outils de traitements informationnels, les systèmes d'informations géographiques, les logiciels d'analyses spatiales, temporelles, d'animation, de visualisation offrent tous de nouvelles capacités de traitement d'information à caractère multidimensionnel. Face à ces changements technologiques récents, le défi du planificateur doit demeurer l'analyse systématique, pertinente et clarifiante de la situation.

À cet effet, ce mémoire présente l'analyse de performance d'une ligne de train de banlieue à l'aide de données GPS et le développement d'un outil de diagnostic haute définition. Le diagnostic se définit comme étant le raisonnement menant à l'identification de la cause d'une défaillance à partir des informations relevées par observations, contrôles ou tests (Wikipédia, 2006b).

Comme pour un paparazzi, la mission consiste à transposer visuellement le comportement représentant la plus grande perfection du sujet, mais aussi à illustrer toute déviance à un comportement normal. La prise du cliché révélateur nécessite donc l'identification de la situation intéressante, le bon angle et la bonne paramétrisation de l'appareil. Pour cela, le paparazzi doit connaître parfaitement l'objet à scruter et son comportement habituel. Cette opération de surveillance très fine appliquée aux trains forme la base des objectifs de ce mémoire :

- Décrire une analyse de performance dans le contexte d'un système de transport, plus particulièrement du train;
- Décrire les particularités dynamiques d'un train de banlieue;
- Identifier et résumer les recherches et méthodes antérieures appliquant le GPS à des analyses liées à la performance d'un système de transport;
- Identifier les outils d'analyse et de visualisation de données à caractère spatio-temporel en apportant une attention spéciale aux systèmes d'informations géographiques;
- Organiser et traiter automatiquement un historique de données de grande taille;
- Décrire les indicateurs de performance portant notamment sur les temps de parcours, la ponctualité, vitesse, etc.
- Décrire et caractériser une ligne de train de banlieue à partir de l'analyse de l'historique GPS seulement. Cela inclut la description de la topologie de la ligne, du service offert, des caractéristiques dynamiques d'un parcours et des règles observées.

- Développer une méthode d'identification et de synthèse des incidents sur une longue période basée sur une analyse différentielle au comportement habituel observé;
- Caractériser et visualiser un incident en haute résolution;
- Développer une méthode de calcul de performance en temps réel, d'identification des incidents et de prédiction des heures de départ.

Le schéma ci-dessous résume l'ensemble des concepts abordés dans la revue de littérature.

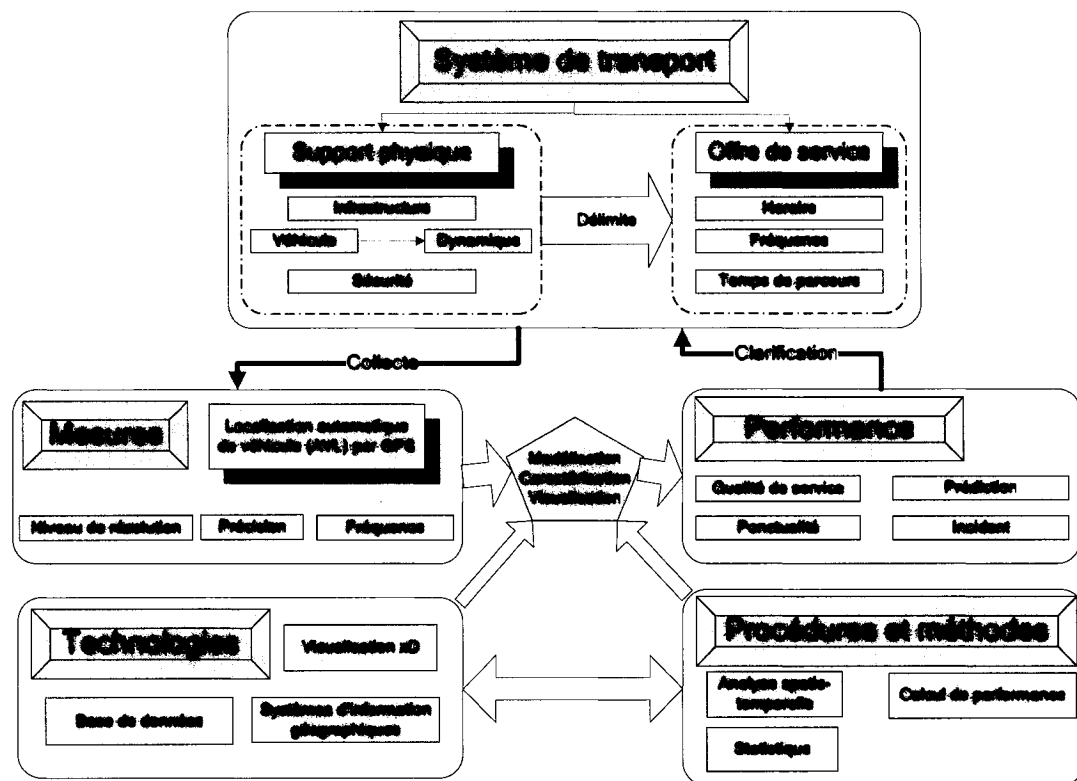


Figure 1.1 Concepts et interactions abordés dans la revue de littérature

Dans le premier chapitre, la revue décrit un système de transport en portant une attention accrue sur les concepts de performance vus selon différentes perspectives. En plus d'aborder la mesure des temps de parcours et de la ponctualité, les modèles de

prédiction utilisés pour prévoir les temps de parcours sont révisés. L'objet de l'étude étant le train, une description plus fine de ses caractéristiques dynamiques et systémiques est réalisée. Puis, un accent particulier est mis sur le contexte de Montréal et de l'Agence Métropolitaine des Transports (AMT) qui exploite 5 lignes de trains de banlieue et fournit les données qui serviront aux expérimentations.

La revue aborde dans le deuxième chapitre l'outil de mesure utilisé dans cette recherche. La technologie GPS est alors décrite en détail et les différentes recherches portant sur son application pour le calcul de performance sont résumées. En dernier lieu, les technologies de gestion d'information spatiale (SIG), d'analyse spatio-temporelle et de visualisation multidimensionnelle sont abordées au chapitre 4.

La suite du mémoire porte sur les expérimentations réalisées à partir d'un historique GPS brut comprenant huit mois de déplacements sur la ligne Montréal-Rigaud. L'archivage des parcours spatio-temporels des véhicules équipés de la technologie GPS dissimule l'ensemble de la dynamique des opérations sur la ligne. L'effort global de l'expérimentation tend donc à dériver un maximum d'informations provenant de ces archives. De plus, celles-ci devenant rapidement trop volumineuses pour un traitement manuel, l'organisation des données dans un système d'information et le traitement automatisé constituent des objectifs informationnels implicites à cette recherche. À cet effet, l'ensemble des expérimentations peut être vu comme une suite procédurale intervenant avec des tables de données toutes dérivées des données GPS originales. Ce flot informationnel est illustré à la figure 1.2.

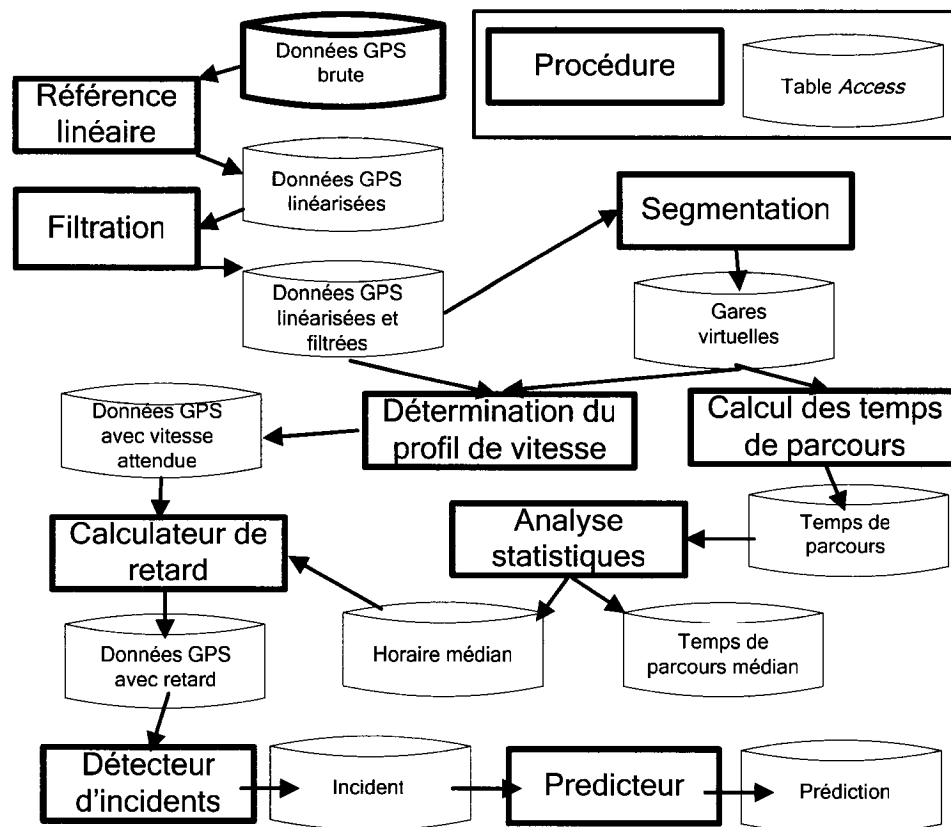


Figure 1.2 Procédures et flot informationnel

Les résultats sont présentés sur trois chapitres. Premièrement, la caractérisation physique et opérationnelle de la ligne décrit l'ensemble des informations dérivées caractérisant la ligne et sa dynamique. Puis, la visualisation et l'analyse statistique de quelques indices de performance permettent d'identifier rapidement les incidents survenus et ensuite de les comprendre dans leurs plus fins détails. Finalement, le développement d'une approche désagrégée du calcul du retard permet l'application d'une procédure en temps réel de détection des incidents et de prédiction des heures de départ.

Chapitre 2. Dynamique et performance d'un train de banlieue

“The substantive challenge of transportation systems analysis is to intervene, delicately and deliberately, in the complex fabric of a society to use transport effectively, in coordination with other public and private actions, to achieve the goals of that society.” (Manheim, 1979).

Ce chapitre propose un cadre de référence au défi de substance défini par Manheim. L'envergure du problème de transport étant considérable, la définition d'un système de transport, de ses acteurs principaux et de leurs dynamiques permet ensuite de cibler les enjeux touchant la qualité de service et la performance du système. *«Transit performance has a substantial impact on people's daily lives and upon the cost of providing transit service.»* (Bertini, El-Geneidy, 2003). Cette citation résume l'importance de la perspective dans l'étude de la performance, vue d'un côté par l'utilisateur désirent le meilleur service possible et de l'autre par l'exploitant, inévitablement axée vers le paradigme d'en faire plus avec moins.

L'analyse de performance, largement décrite dans la littérature, autorise l'élaboration d'un plan ciblant les différents indicateurs quantitatifs, axés ici sur la ponctualité et la dynamique du service offert. Ce chapitre définit les bases de deux indicateurs importants, soit l'adhérence à l'horaire et les temps de parcours. Ensuite, la prédiction de performance dans un contexte d'exploitation d'un service transport fait l'objet d'une brève revue de littérature.

De plus, le présent chapitre décrit en détail les concepts entourant la dynamique et le fonctionnement de l'objet de la présente analyse, le train de banlieue. La dernière section illustre le contexte d'exploitation du train de banlieue à Montréal, sous la

responsabilité de l'AMT et décrit la concrétisation actuelle des différents enjeux touchant la qualité de service.

2.1 Systèmes de transports publics

Les systèmes de transports publics se sont développés avec l'urbanisation massive du 18^e siècle. L'ère industrielle transforma alors complètement l'organisation de la société. La migration de la population rurale vers les centres urbains générateurs d'emplois marque le début des besoins de transports urbains tels que nous les connaissons. Depuis, une multitude de modes de transport se sont succédés. Du tramway tiré par les chevaux, en passant par les trains à vapeur jusqu'au TGV d'aujourd'hui, les systèmes de transports se sont succédés pour occuper maintenant une place importante dans le développement urbain. Ainsi, avec l'augmentation de la complexité des différents services, la notion de système de transport public est apparue.

D'un point de vue global, un système de transport en commun comprend l'équipement, les infrastructures et la logistique (opérations) nécessaires au déplacement des personnes (Manheim, 1979). À ces composantes physiques s'ajoutent les composantes institutionnelles, dont la structure de gestion et de planification.

De plus, le système de transport total d'une région tient compte de tous les modes de transports, de tous les éléments qui y sont transportés et de l'ensemble des mouvements de l'origine à la destination (Manheim, 1979). Cette description représente un système de transport fermé, qui interagit nécessairement avec le système socioéconomique de la région. Réactifs et évolutifs, le système de transport et le système socio-économique dictent la dynamique des déplacements, soit les trajets, les origines, les destinations et les volumes. Ce régime influe à moyen ou long terme sur les activités du système socio-économique et à court ou moyen terme sur le système de transport collectif. Cette évolution complémentaire est illustrée à la figure 2.1.

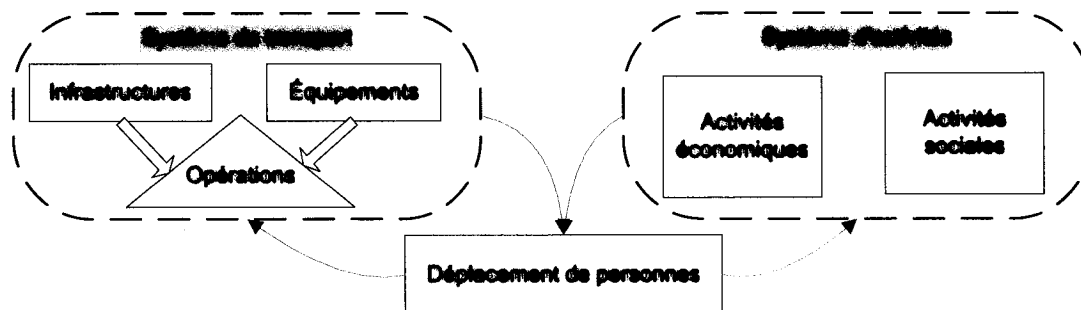


Figure 2.1 La mobilité et son impact sur le système de transport et le système d'activités

La performance d'un système de transport et la qualité de service qui en découle catalysent ou inhibent la réaction du public face au service de transport offert. L'estimation, l'analyse et la représentation de la performance du système constituent des facteurs déterminant l'évolution du système global. Toutefois, cette recherche porte sur la dynamique endogène du système de transport et n'aborde pas l'analyse du système d'activités et de son interaction avec le système de transport.

L'étude d'un système nécessite a priori de bien cerner les composantes, les acteurs et les interactions régissant sa dynamique.

2.1.1 Composantes physiques

Un système de transport peut être décrit par un ensemble de composantes physiques (Vuchic, 1981)

1. Matériel roulant : Tout matériel mobile qui supporte le transport d'une charge de personnes ou de matériels (véhicules, convoyeur). On qualifie l'ensemble des véhicules d'un système par la flotte et « rolling stock » dans le cas particulier du train.
2. Support physique : On y retrouve les routes, voies réservées, rails, etc. De plus, les infrastructures d'approvisionnement, de signalisation, de navigation et de contrôle appartiennent à cette catégorie.
3. Installations de transfert. Les infrastructures qui permettent de charger, décharger des personnes ou du matériel. Elles peuvent être, intra ou intermodale, du simple

poteau d'autobus à la gare intermodale. Sont inclus les postes de contrôle, l'équipement d'embarquement, d'attente et d'informations aux usagers.

4. Maintenance : Le matériel roulant, les infrastructures et supports physiques servant les activités de maintenance.
5. Gestion : Composante administrative comprenant l'ensemble des systèmes de marketing, de ressources humaines, ressources financières et de planification et exploitation des opérations.

Le cadre physique d'un système de trains de banlieue présente plusieurs caractéristiques particulières dont un support physique linéaire, dédié ou partagé, du matériel roulant sur rail, une signalisation et des règles de sécurité particulières et des installations de transfert lourdes et permanentes. La description et la considération de ces facteurs dans l'analyse du système sont décrites au chapitre 2.4.

2.1.2 Acteurs et interactions

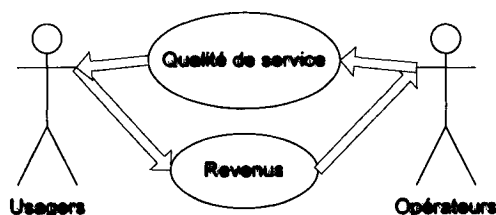


Figure 2.2 L'interaction primaire dans le système de transport

Deux acteurs principaux interagissent avec le système, les usagers et les opérateurs du système (Manheim, 1979). Du côté des opérateurs, la gestion des opérations est dictée par des acteurs internes ou externes dont l'objectif tend à offrir le service de meilleure qualité possible avec un certain niveau de revenu qui dépend de l'autre acteur, les usagers. La notion d'équilibre entre les revenus et le service offert sort du cadre de cette recherche, mais il importe de noter que tous les systèmes de transports publics peuvent être abordés selon la perspective de l'utilisateur ou de l'exploitant. La notion de

service offert et de qualité de service correspond à la perspective usager du système (TRB, 2003a). De l'autre point de vue, la génération de rapports, l'amélioration du service via une planification et la communication des résultats en temps réel, constituent des enjeux importants sous l'angle des opérateurs.

En plus de l'interaction économique intervenant entre les usagers et les opérateurs de systèmes de transports, un déplacement en transport collectif engendre inévitablement une association entre un usager et un véhicule de transport. Reprenant le concept d'itinéraire de déplacement totalement désagrégé (Chapleau, 1992), la modélisation d'un déplacement effectué par un usager prend en compte chaque véhicule de transport emprunté, comprenant une référence spatio-temporelle pour chaque portion de l'itinéraire. La géographie temporelle exprime la relation espace-temps dans les activités des personnes et les contraintes imposées par ces relations (Hägerstrand, 1970). La figure 2.3 illustre la rencontre entre deux entités pour un certain temps (Miller, 2004).

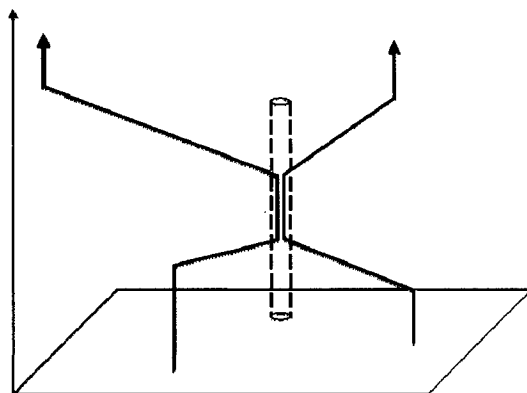


Figure 2.3 Concept d'association spatio-temporelle de HagerStrand

Cette association représente l'interaction entre l'utilisateur et le véhicule de transport. L'heure de rencontre, déterminée par l'horaire, ainsi que le temps de parcours deviennent des éléments contraignant les activités accessibles par les usagers dans une journée. Ainsi, le respect de cet horaire et la régularité du parcours permettent de

réduire la période où l'utilisateur est prisonnier d'un certain service de transport. L'horaire prévu aux installations de transfert devenant l'élément contractuel entre l'utilisateur et les gestionnaires du service de transport, une série d'outils de contrôle est requise pour assurer le suivi et l'entente entre les deux parties. Cette étude se concentre sur cet aspect et ne porte pas directement sur les autres acteurs et interactions qui surviennent dans le système.

2.1.3 Systèmes de transport intelligent

Depuis plusieurs années, l'application des récentes technologies aux problèmes entourant le transport entraîne l'émergence d'un phénomène global appelé systèmes de transport intelligents. *« L'expression << systèmes de transport intelligents >> (STI) désigne une vaste gamme de techniques appliquées aux transports pour rendre les réseaux plus sûrs, plus efficaces, plus fiables et plus écologiques sans avoir nécessairement à modifier matériellement l'infrastructure existante »* (STI Canada, 2006). Pour le transport collectif, les STI s'appliquent à améliorer notamment la sécurité, la gestion de la demande, la planification des services et la dissémination d'information (U.S. DOT, 2006). Aux composantes physiques décrites précédemment, vient donc se greffer une composante technologique présente dans toutes les sphères du système de transport.

Engagé à promouvoir, intégrer et renforcer les STI, le gouvernement canadien propose un plan de recherche et développement des STI visant à stimuler l'innovation dans les STI (STI Canada, 2006). Ce plan se traduit dans cette recherche par un effort d'application des technologies informationnelles, des systèmes d'information géographiques et des technologies de visualisation.

2.2 Mesures de performance

L'amélioration de la qualité de service offert se réalise par un cycle temps réel, dit de contrôle, et un cycle différé d'analyse de la performance, tel qu'illustré à figure 2.4. En temps réel, les mesures servent à identifier les déviations au service planifié et en temps différé à évaluer et améliorer la planification (Furth, Hemily, Muller, Strathman, 2003).

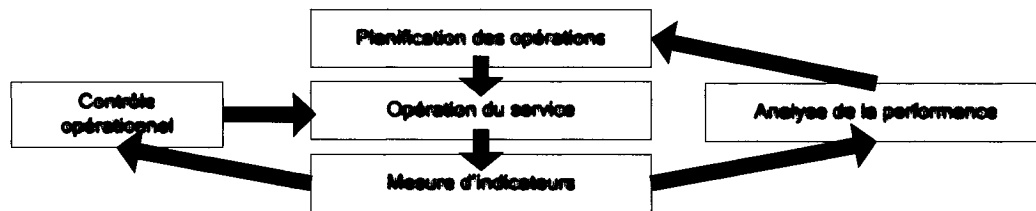


Figure 2.4 Cycle d'amélioration de la qualité

Concrètement, la mesure de performance est utile pour la génération de rapports sur l'état du système, pour la surveillance, l'évaluation des décisions précédentes, la planification et la communication de résultats (TRB, 2003a). En fait, l'analyse de performance produit un ensemble informationnel utile à tous les niveaux de l'organisation et les sociétés de transport se voient exiger de générer de telles mesures. Manheim décrit la performance (T) comme le résultat d'une fonction dépendante des ressources consommées (R), du volume d'usagers (V) et du niveau de service (L).

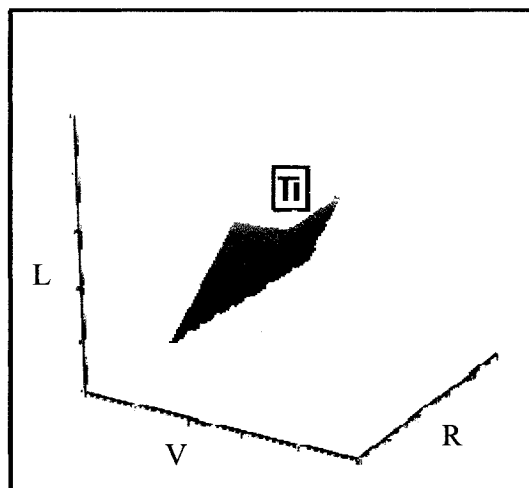


Figure 2.5 Fonction de performance (Manheim, 1979)

D'un point de vue informationnel, la performance d'un système regroupe un ensemble d'éléments distincts mesurables (Vuchic, 1981). Qualitatifs ou quantitatifs, ils servent à mesurer un aspect précis du service de transport (TRB, 2003c). Les notions de confort, de coût, de sécurité, d'offre de service, de taux d'incident, de ponctualité et autres forment un ensemble informationnel. Celui-ci devient un outil pour caractériser un réseau et en calculer la qualité de service. Ces indices deviennent donc le point de comparaison d'un système de transport avec d'autres systèmes semblables. De plus, l'agence de transport, l'utilisateur et la communauté constituent les trois principaux points de vue de ces indices (TRB, 2003c).

2.2.1 Perspectives

Perspective Usager

Les indices de performance qui affectent l'utilisateur, telle la sécurité, la vitesse d'opération et la fiabilité caractérisent la qualité de service (TRB, 2003c). Celle-ci joue un rôle important dans le choix modal de l'utilisateur qui comporte deux étapes principales : l'évaluation de la disponibilité du mode et le choix parmi les modes disponibles. Pour évaluer la disponibilité, l'utilisateur distingue la disponibilité spatiale, temporelle, informationnelle et de capacité (TRB, 2003c). La figure 2.6 démontre la série de questions au niveau de la disponibilité qui mène à considérer le service de transport en commun comme une option. Le cas échéant, le choix de l'utilisateur repose ensuite sur la qualité du service.

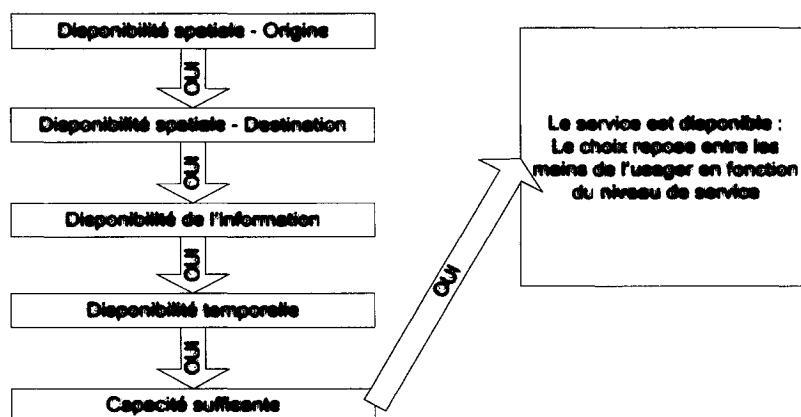


Figure 2.6 Les facteurs de disponibilité de service

Le niveau de service et la qualité de service font l'objet de confusion dans la littérature. Vuchic décrit le niveau de service comme une seule mesure englobant toutes les caractéristiques qui touchent l'utilisateur (Vuchic, 1981). Selon Manheim, la qualité de service devient un élément du niveau de service qui inclut des facteurs qualitatifs, comme la simplicité, le confort et l'esthétique du service (Manheim, 1979). De son côté, le manuel de Capacité et de Qualité de service américain (TRB, 2003c) définit la qualité de service comme un ensemble de toutes les mesures quantitatives et qualitatives propres à l'utilisateur. Par contre, la notion de niveau de service représente plutôt une note associée à une plage de l'élément de la qualité de service. Le tableau 2.1 présente les niveaux de service et leur plage associée pour le cas de la mesure de la ponctualité. Le choix du niveau de service minimum acceptable est une responsabilité du planificateur. Le niveau de service global tient compte de tous les facteurs touchant les usagers auxquels on a aussi attribué une note (TRB, 2003c). On peut donc définir le niveau de service global comme la mesure de la qualité de service.

Niveau	Pourcentage En temps
A	95.0-100.0%
B	90.0-94.9%
C	85.0-89.9%
D	80.0-84.9%
E	75.0-79.9%
F	<75.0%

Tableau 2.1 Niveau de service associé à la ponctualité

Les éléments décisifs du choix modal de l'utilisateur sont la fiabilité, les temps de parcours et la fréquence (Four, Guivarch, Lafon, 2004). De ceux-ci, la fiabilité représente un élément déterminant de la demande (Kimpel, Strathman, Dueker, 2000) et un objectif pour les services de transport en commun depuis plus d'un siècle (Bertini, El-Geneidy, 2003). De ce fait, les principaux indicateurs de performance découlant de la fiabilité font l'objet d'une revue détaillée dans les prochaines sections.

Perspective Agence

La perspective de la société de transport diffère de celle de l'utilisateur. Orientée vers la prise de décision, l'évaluation globale de l'efficacité de la société nécessite la mesure d'indicateurs de performance reflétant une synthèse des opérations (TRB, 2003c). Les mesures de performance sont requises aux niveaux internes et externes de l'agence (Bertini, El-Geneidy, 2003). D'un point de vue externe, des rapports synthétiques, agrégés et standardisés admettent l'octroi de subvention provenant des autorités gouvernementales. De plus, les indicateurs agissent comme support interne à l'agence pour l'analyse fine du service et une amélioration de ses stratégies d'opérations. Les différentes exploitations que peut en faire une agence de transport sont (TRB, 2003c) :

- Évaluation globale de la performance
- Évaluation départementale et individuelle
- Évaluation historique de la performance
- Évaluation de la performance historique et future
- Évaluation des bénéfices

Les principaux indicateurs se rattachant à la perspective de l'agence sont :

- Fréquence : Nombre de départs d'unités de transport par période de temps (passage/heure).
- Vitesse commerciale : Vitesse ressentie par l'utilisateur sur la ligne.
- Productivité : Quantité produite par unité de ressource (ex : nombre de veh*km par unité de travail).
- Capacité de ligne : Nombre de place offert sur une ligne par heure et par direction.

Autres perspectives

La communauté, comme entité ayant certains droits et attentes et les chauffeurs représentent des acteurs en quête de certains indicateurs et mesures (TRB, 2003c). De même, les chercheurs, les syndicats et autres peuvent tous être intéressés par différents aspects du service.

2.2.2 Plan de mesure de la performance

Considérant les différentes perspectives du service offert et l'importance de fournir des indicateurs justes et pertinents, il importe d'élaborer un système de mesures de performance. Développée en détail dans un ouvrage américain (TRB, 2003c), l'élaboration du plan de performance est un processus itératif basé sur l'étude d'une vingtaine d'agences américaines.

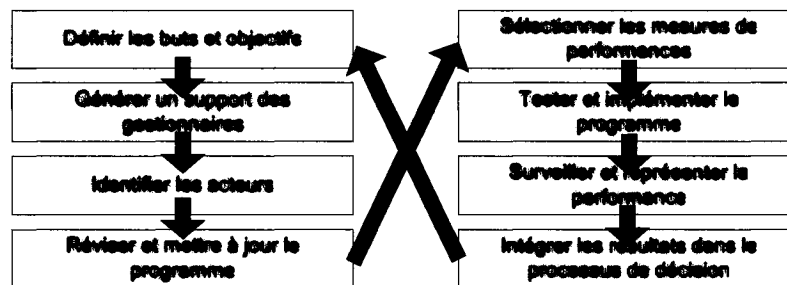


Figure 2.7 Processus de développement d'un plan de mesure de performance (Traduit de (TRB, 2003c))

Cet ouvrage présente une revue de littérature sur le développement de différents programmes de mesures de performance en transport collectif démontre que plusieurs recherches récentes portent sur l'application d'un tel processus dans différents contextes. De ce fait, la problématique et les objectifs énoncés précédemment autorisent l'élaboration d'un plan simple de mesure de performance dans le cadre de cette recherche. Évidemment, le contexte académique de celle-ci élimine les contraintes organisationnelles du processus, mais certains objectifs se transposent dans un plan de mesure de la performance. Les expérimentations s'orientent donc vers le calcul d'indicateurs relevant de la qualité de service, selon la perspective de l'utilisateur et se traduisent par les indicateurs décrits ci-dessous.

2.2.3 Ponctualité

La ponctualité dans les systèmes de transport en commun s'associe à la fiabilité du service. Ce facteur de performance touche de près les usagers et constitue un facteur déterminant du choix modal. Pour ce faire, plusieurs sociétés de transport adoptent des politiques de garantie de service pour assurer une ponctualité au client comme par exemple la STL. Les opérations, les investissements et les stratégies institutionnelles mènent à un service ferroviaire plus fiable (Manheim, 1979). En fait, chaque décision et chaque action offre un potentiel d'augmenter la fiabilité.

Les multiples définitions de la ponctualité en transport rendent ce concept difficile à définir simplement. Voici quelques exemples de définitions recensées dans des ouvrages de la planification en transport et sur le web :

- La fiabilité ou ponctualité définit le temps qu'un passager doit attendre à un arrêt avant que le véhicule arrive ainsi que la stabilité de l'heure d'arrivée jour après jour (TRB, 2003a). Elle se présente comme le pourcentage d'arrivées de véhicules qui sont à l'intérieur d'une certaine déviation à l'horaire prévue (Vuchic, 1981).
- La fiabilité est la variabilité dans les temps de parcours (Manheim, 1979)
- La capacité d'un système ou d'une composante à accomplir les tâches requises dans des conditions données, et ce, pendant une période précise (IEEE, 2005)
- Un système est fiable lorsqu'on peut prévoir qu'il fera ce qu'on veut qu'il fasse et lorsqu'on peut le prouver (Wikipédia, 2006a)

La ponctualité se scinde donc en deux composantes majeures : une référence à un horaire planifié (conditions données pour une période précise) et une référence à un temps de parcours habituel.

La notion d'engagement sous-jacente reflète bien le type de relation vécue entre un passager et son service de transport en commun. En effet, le passage d'un véhicule à un arrêt à un certain moment constitue un engagement spatio-temporel de la compagnie

de transport vis-à-vis sa clientèle. L'arrivée du véhicule à ce point spatio-temporel précis devient la réalisation de l'engagement par la compagnie de transport. C'est exactement la définition du terme « en temps » ou « on time » en anglais qui est utilisé pour qualifier un engagement réussi (Kimpel, Strathman, Callas, 2004). L'évaluation de la ponctualité via le concept de « en temps » mesure l'adhérence à l'horaire planifié. Chaque arrêt de chaque ligne, et ce, pour chaque passage du véhicule de transport, représente donc un engagement susceptible d'être évalué au niveau de la ponctualité.

Quantitativement, les différentes sources définissent un passage ponctuel de différentes façons. La notion de « en temps » restreint un retard à un maximum de 3-4 minutes (TRB, 2003a), mais certaines sociétés tolèrent jusqu'à 5 minutes de retard (Kimpel, Strathman, Callas, 2004). Dans le cas d'une avance, le problème se complexifie, car un autobus en avance de 1 minute engendre un non-service pour l'utilisateur parfaitement à l'heure. Certaines sources acceptent 1 minute d'avance (STM, 2006a), mais d'autres demeurent plus nuancées en différenciant un départ hâtif en début de ligne où plusieurs passagers embarquent, qu'une avance en fin de ligne où aucun passager ne risque d'embarquer (TRB, 2003a). En terme de niveau de service, les compagnies de transport définissent leurs standards en terme pourcentage d'arrivée (ou d'engagement) en temps. Par exemple, le tableau 2.1 présente un niveau de service A (1^{er} rang) associé à un pourcentage de « en temps » entre 95 et 100%.

La régularité du service apporte une précision à la définition de « en temps » (Kimpel, Strathman, Dueker, 2000). En effet, les usagers réguliers vont s'adapter à un autobus systématiquement en retard de 3 minutes. Par contre, une variabilité importante dans les délais à l'arrêt force l'utilisateur à se présenter plus tôt. De plus, la notion de poids relatif à la demande est introduite. À cet effet, les arrêts où se trouve le plus grand nombre de passagers importent beaucoup plus au niveau de la qualité de service globale. La planification doit s'orienter vers ceux-ci (Kimpel, Strathman, Dueker, 2000).

Les facteurs influençant la ponctualité sont endogènes ou exogènes (Woodhull dans Kimpel, Strathman, Dueker, 2000). Les facteurs endogènes incluent la variation de la demande, la précision de l'horaire, etc. Parmi les facteurs qui influent la ponctualité, les passages en avance contribuent à un piètre niveau de service (TRB, 2003c). De plus, les délais entraînent des effets de bords importants. Par exemple, un bus en retard atteint plus rapidement sa capacité puisqu'il doit prendre non seulement les passagers habituels mais aussi les passagers qui arrivent plus tôt pour le prochain autobus. La régularité de la fréquence gagne en importance sur des lignes chargées et de hautes fréquences. Par contre, une fréquence plus basse priorise une adhérence à l'horaire (Kimpel, Strathman, Dueker, 2000).

La valeur du temps pour les usagers est un facteur décisionnel important. En effet, le temps d'attente à l'arrêt semble plus pénible pour l'utilisateur qu'un délai dû à une fréquence trop basse. En d'autres mots, la ponctualité à l'arrêt importe plus pour l'utilisateur que la fréquence de service, un service non fiable perdant l'intérêt des usagers dans le temps.

De ce fait, la ponctualité par adhérence à l'horaire planifié constitue un indicateur privilégié pour cette recherche.

2.2.4 Temps de parcours

Du point de vue de la société de transport, la mesure des temps de parcours peut servir autant les activités de planification, d'exploitation que d'évaluation du service (FHWA, 1998)

Tableau 2.2 Différentes applications de données de temps de parcours

Planification et Design
Développement de politiques de transport
Évaluation des besoins
Priorisation des projets d'amélioration du réseau
Analyses économiques sur les coûts de transport
Etc.
Opérations
Développement de bases de données historiques
Calibration des modèles
Information à la clientèle
Contrôle temps réel
Détection d'incident
Etc.
Évaluation
Surveillance des tendances de congestion
Mesure de l'impact de différentes mesures
Communication de l'information
Etc.

Du point de vue de l'utilisateur, le temps de transport occupe une place importante dans les activités quotidiennes (Jara-Díaz, 2002). Sur une journée de 24 heures, il est courant de prendre plusieurs heures à se déplacer. Le temps de parcours et surtout l'économie de temps de parcours deviennent des valeurs qu'il importe de caractériser. Associée de manière générale au salaire horaire de l'individu, la valeur sociale du temps tient compte de l'utilité sociale de l'argent et du poids social sur l'utilité du travailleur (Jara-Díaz, 2002).

De plus, le temps de parcours est étroitement lié à la fiabilité. Un passager peut décider de partir plus tôt, risquant d'arriver trop tôt s'il ne croit pas que le service est fiable et qu'il arrivera au temps prévu, et ce, même si le véhicule est à l'heure (TRB, 2003a). Le temps de parcours ponctuel est un temps de parcours qui adhère au temps de

parcours prévu (Kimpel, Strathman, Dueker, 2000). De plus, une certaine régularité doit être présente pour qualifier le service de «fiable». La régularité des temps de parcours devient donc un enjeu complémentaire à la notion de ponctualité et constitue un autre indicateur de premier choix et fait l'objet d'analyse subséquente dans cette recherche.

Le temps de parcours est défini comme « le temps nécessaire pour traverser une route entre deux points d'intérêt. » (FHWA, 1998). Les caractéristiques dynamiques d'un véhicule doivent être connues pour faire l'analyse des temps de parcours et des coûts d'opération des services existants (Vuchic, 1981). La grande majorité des lignes de transport en commun s'opère de façon à desservir une série de stations le long d'une ligne. Il s'agit donc d'une série de mouvements d'arrêts et de départs de stations en stations (Vuchic, 1981). Chaque parcours d'une station à l'autre fait l'objet d'une analyse indépendante et l'union des analyses de station en station admet l'analyse du temps de parcours d'un segment ou de l'ensemble de la ligne. La figure 2.8 illustre les variables de base qui interviennent dans un parcours interstation.

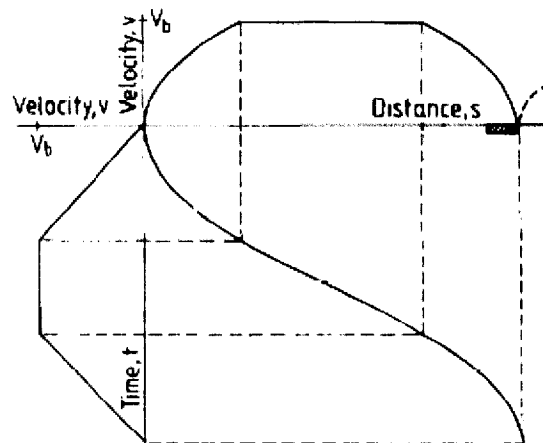


Figure 2.8 Graphique Vitesse-Distance-Temps entre deux stations (Hill, Bond, 1995)

Ce modèle simple représente bien le cas du train, où il est rare que l'on retrouve une immobilisation interstation. On retrouve une phase d'accélération, de vitesse de croisière de «coasting» ou laisser-aller, de freinage et finalement d'attente. Le

graphique espace - temps – vitesse illustre la relation entre ces dynamiques de mouvement. On retrouve dans la figure 2.8 l'évolution de la distance en fonction du temps $\int v dt$. La valeur de la pente de la fonction « distance temps » donne le profil de vitesse en fonction du temps et finalement la valeur de la pente du profil de vitesse donne le profil d'accélération du temps. Une troisième dérivation mène à la variation d'accélération appelée « jerk » (Vuchic, 1981), quantifiant l'effet sur le passager qui lui fait perdre l'équilibre. Cette valeur joue un rôle important pour des questions de sécurité et de confort. L'utilisation de ces différents graphiques permet, par exemple, de mesurer l'effet des taux d'accélération, de voir l'impact d'une distance interstation sur la vitesse de croisière moyenne ou de mesurer l'influence du régime de vitesse sur la consommation électrique.

La distance parcourue est une quantité scalaire qui représente le nombre total de mètres parcourus pendant le parcours (The Physics Classroom, 2004). Par ailleurs, un déplacement se définit comme une quantité vectorielle et représente le nombre de mètres entre le point d'origine et celui d'arrivée. Par exemple, un marcheur qui revient à son point de départ, parcourt une certaine distance, mais son déplacement est nul. De la même manière, la vitesse moyenne représente la distance parcourue sur le temps de parcours et la vélocité moyenne représente le déplacement sur le temps de parcours.

Les délais

De manière générale, un délai se définit par le laps de temps nécessaire à la réalisation d'une activité. Par contre, le terme délai est associé dans la littérature transport à la période où le véhicule est immobilisé ou en mouvement à très basse vitesse (moins de 3 mi/h) (FHWA, 1998).

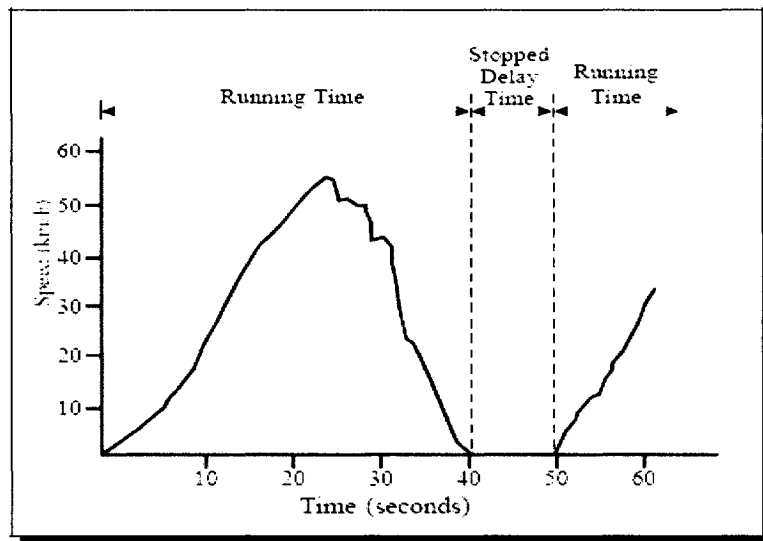


Figure 2.9 Délais associés au temps de parcours (FHWA, 1998)

illustrés par un diagramme espace-temps à la figure 2.10, cette notion de délai est raffinée pour expliquer les différents retards à l'arrêt (Hoeschen, Bullock, Schlappi, 2005).

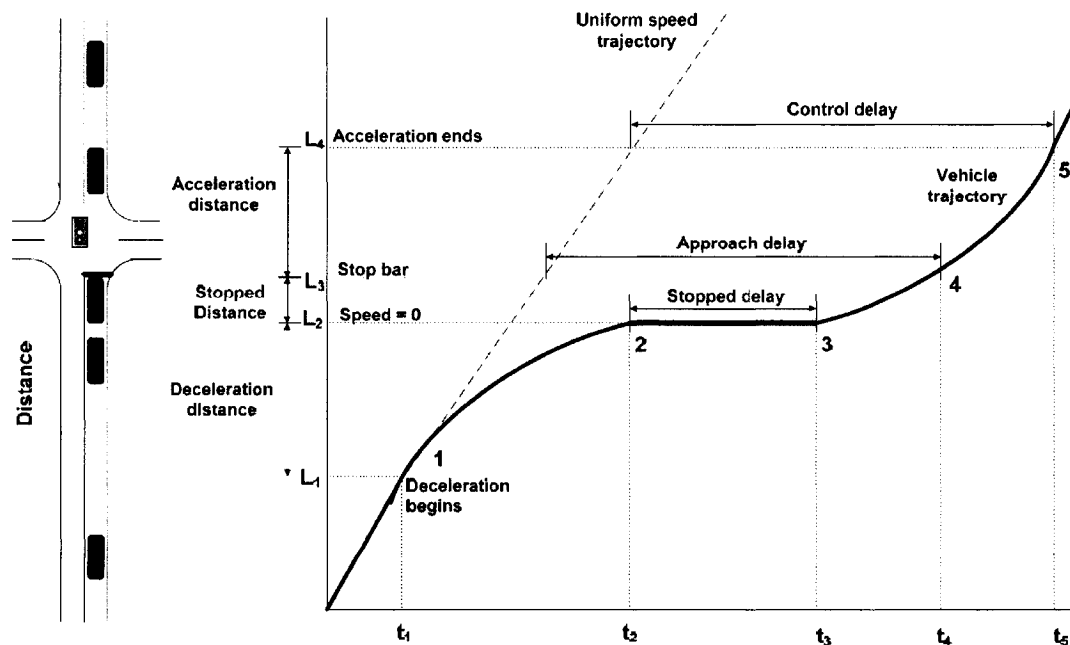


Figure 2.10 Diagramme espace-temps illustrant les différents délais à une intersection (Hoeschen, Bullock, Schlappi, 2005)

Dans le cas du train, ce schéma général s'applique aussi à un arrêt en gare.

Délai d'arrêt

Ce délai survient lors de l'immobilisation complète du véhicule. En général, on considère un véhicule arrêté lorsque celui-ci est sous les 3 miles/h ou 5 km/h. Le temps d'arrêt est appelé temps d'embarquement «dwelling time» lorsque l'arrêt est associé à une station de montée ou de descente de passagers.

Temps de roulement

À l'inverse du délai d'arrêt, le temps de roulement représente le temps où le véhicule est en mouvement (plus de 3 mi/h).

Délai de contrôle

Le délai de contrôle illustre le délai d'arrêt élargi en prenant compte de la décélération et de l'accélération jusqu'à la vitesse de croisière.

Délai d'approche

Il est équivalent au délai de contrôle à l'exception qu'il débute après l'atteinte de la zone d'intersection. Plus réaliste que le délai d'arrêt, il est aussi plus utilisé à partir du milieu des années 90. Dans le cas du train, la zone d'intersection peut être associée à l'extrémité de la gare.

Délai de segment

Il représente le temps entre le milieu d'une intersection jusqu'au milieu de la prochaine intersection.

La classification des délais est donc basée sur une segmentation du parcours. L'analyse du temps de parcours comme indicateur de performance implique donc une compréhension des zones d'arrêt, des comportements dynamiques ainsi que le développement d'une méthode de segmentation.

2.3 Prédiction de performance

La prédiction de performance en temps réel a fait l'objet de plusieurs études dans la littérature. La raison première pour déployer un tel service est d'améliorer le niveau de service aux usagers. De plus, par dissémination de l'information sur l'état du système (TRB, 2003b):

- Les clients perçoivent une réduction du temps d'attente à l'arrêt et le trouvent plus acceptable.
- Les clients sont encouragés à prendre l'autobus plus souvent.
- Il en résulte une augmentation de l'achalandage se chiffrant autour de 1% et 3%

La prédiction se base sur des modèles provenant de l'analyse historique du comportement, des modèles de régression et des données obtenues en temps réel. Selon ce rapport, des prédictions précises résident dans l'algorithme utilisé et dans la qualité des données sources. À cet effet, une prédiction précise diffère d'une prédiction fiable. Une prédiction fiable se définit comme une prédiction où la précision est régulière dans le temps (TRB, 2003b).

Face aux éléments stochastiques exogènes influençant la ponctualité du service, les modèles développés tentent en général d'intégrer une composante historique régulière associée à une mesure ponctuelle d'une déviation à ce service. Trois familles de modèles de prédiction des temps de parcours ou d'arrivée se retrouvent dans la littérature : les séries temporelles, les modèles basés sur des régressions linéaires multiples, les modèles autorégressifs et les filtres de Kalman. Les recherches dans ce domaine sont multiples et d'autres techniques comme les réseaux neuronaux font l'objet d'études.

Les séries temporelles. Ces modèles résident dans la similarité périodique des données historiques et des données actuelles (Patnaik, Chien, Bladikasz, 2004). De ce

fait, la variation de la moyenne historique affecte grandement la précision des résultats. Ces modèles sont moins populaires spécialement dans le cas où les délais forment une distribution aléatoire dans le temps.

Les modèles de régression. Historiquement, ces modèles ont gagné en popularité, notamment grâce à leur facilité d'utilisation et en raison de leur application aux problèmes d'estimation de paramètres (Patnaik, Chien, Bladikasz, 2004). Cette technique détermine les temps de parcours d'autobus sur un trajet comprenant plusieurs segments. Le temps de parcours T_i devient fonction de la distance (d), du nombre d'arrêts (s), du temps d'embarquement moyen aux arrêts (t) et à la période de la journée ($E_m, M_p, L_m, M_d, E_a, A_p, E_v, L_n$). La formule ci-dessous est un exemple de régression linéaire possible.

$$T_{i,p} = b_0 + b_1 d_{i,j} + b_2 d_{i,j} + b_3 s_{i,j} + b_4 E_m + b_5 M_p + b_6 L_m + b_7 M_d + b_8 E_a + b_9 A_p + b_{10} E_v + b_{11} L_n \quad \text{for } \forall i \text{ and } i+1 \leq j \leq 12$$

Ce genre de modèle omet par contre les facteurs exogènes ponctuels par absence de données provenant de systèmes de localisation du véhicule. Les auteurs proposent donc d'y intégrer une composante dynamique tel un filtre de Kalman (Patnaik, Chien, Bladikasz, 2004)

Les modèles autorégressifs. Ceux-ci calculent le prochain temps de parcours comme une fonction des plus récentes données obtenues. Il a l'avantage de s'adapter à la réception de chaque nouvelle information (Shalaby, Farhan, 2004). La méthodologie pour prédire les temps de parcours est semblable d'un auteur à l'autre. L'objectif de cette méthode est de prédire le temps d'arrivée de l'autobus au temps $i+1$ lorsque l'autobus quitte l'arrêt i .

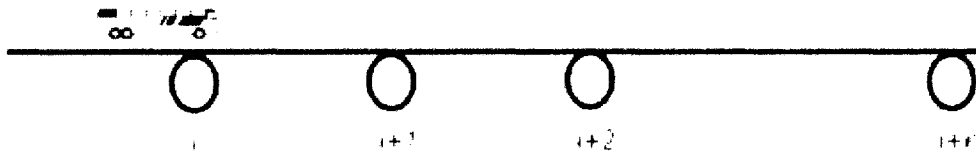


Figure 2.11 Schéma d'un parcours d'autobus comprenant plusieurs arrêts

Lorsqu'un autobus est situé à un arrêt i , l'arrivée de l'autobus à l'arrêt $i+1$ peut être déterminée à partir des temps de parcours provenant des derniers jours à la même heure et du dernier passage le jour même. Ce genre d'algorithme permet d'évaluer les conséquences d'une congestion ou d'une fermeture d'une voie par exemple. Cette méthode basée sur les filtres de Kalman offre les meilleures prédictions comparativement à un modèle basé sur la moyenne historique, la régression linéaire ou encore un réseau de neurones artificielles (Shalaby, Farhan, 2004). Par contre, elle suppose une fréquence assez élevée pour que l'influence de facteurs externes se ressemblent d'un autobus à l'autre.

De plus, une autre étude simule les effets contraires des facteurs exogènes ralentissant une série d'autobus consécutifs et l'effet de rattrapage par les chauffeurs. Le modèle se base alors sur les récents délais par rapport à l'horaire au terminus en plus des derniers temps de parcours. (Mishalani, McCord, Forman, 2004).

Le cas du monde rural où la basse fréquence se compare à celle d'un train est évalué selon quatre algorithmes dans (Lin, Zeng, 1999). Basée sur une représentation « nœud lien » du parcours, leur expérimentation évalue 4 algorithmes qui comptent différents niveaux d'information. La solution la plus complète détermine l'heure prédite d'arrivée en fonction de la position, de l'horaire de passage, des délais accumulés et finalement des arrêts de contrôle. Cette solution tient compte des temps d'attente plus élevés aux points de contrôle et de la tentative de rattrapage lorsqu'un délai est enregistré, mais ne considère pas les passages précédents.

L'évaluation de la précision d'un algorithme de prédiction consiste à calculer la déviation entre la prédiction réalisée et le temps réel de passage (Lin, Zeng, 1999; Lin, Bertini, 2004). Une forme standard de la méthode des moindres carrés est proposée pour y arriver $M_1 = \sqrt{\sum \sum e_{k,m}^2}$. De plus, malgré une déviation moyenne faible, une

erreur maximale élevée risque d'entraîner une partie de la clientèle à manquer un passage. La formule $M_2 = \max_{k, m} \{ \epsilon_{k, m} \}$ identifie cette borne maximale et représente la robustesse de l'algorithme. De la même manière, la stabilité dans le temps de l'erreur se vérifie par $M_3 = \sum \sum | \epsilon_{k, m} - \epsilon_{k, m-1} |$ et illustre le concept de fiabilité de la prédiction. Un algorithme de prédiction basé sur la localisation d'un véhicule peut donc inclure un ou plusieurs paramètres d'entrées additionnels et peut s'évaluer en terme de précision, de robustesse et de fiabilité.

2.4 Le train de banlieue comme objet d'analyse

L'étude de la dynamique d'un véhicule de transport collectif est généralement axée vers l'analyse des différents indices de performance présentée précédemment. Les temps de parcours, les vitesses commerciales et l'adhérence à l'horaire représentent des indicateurs de premier ordre pour la clientèle. Mais pour atteindre un tel objectif, les caractéristiques du réseau et du mode de transport nécessitent d'être défini. Le train de banlieue possède des caractéristiques spécifiques simplificatrices par rapport à d'autres modes où la dynamique est plus complexe. Cette recherche portant précisément sur le train de banlieue, les principales caractéristiques dynamiques et opérationnelles sont présentées ici pour mettre en place les bases de référence applicables aux expérimentations subséquentes.

Matériel roulant. Un train se définit par un ensemble de véhicules ferroviaires amovibles pouvant transporter des biens ou des personnes (Connor, 2005). Traditionnellement, des locomotives génèrent la puissance pour le déplacement des autres unités, sans propulsion. L'usage de l'électricité pour la traction des véhicules permet d'éliminer les locomotives et répartir la traction dans plusieurs véhicules. Ce mode de traction appelé « à unités multiples » permet notamment des opérations en bout de ligne plus rapides par rapport à la locomotive ordinaire. Les opérations en bout de ligne de changement de direction influencent la configuration du train. Notons entre autres la technique du « push, pull » qui consiste à utiliser une locomotive à chaque

bout, ce qui permet d'éviter d'avoir à retourner le train ou encore à déplacer la locomotive.

De plus, le matériel roulant détermine la capacité disponible par train, celle-ci variant selon le type de locomotive. Elle se situe autour de 95 passagers/véhicule à Montréal (TRB, 2003a) et à environ 150 passagers/véhicule pour un train deux étages.

Support physique. Le support physique d'un train consiste en un rail qui permet au train d'opérer en site propre. Contrairement aux trains légers, les trains sur voies commutées partagent la voie avec d'autres trains de marchandises.

Installation de transfert. Les gares sont des infrastructures lourdes exclusivement dédiées aux transferts des passagers aux trains. Les gares terminus du centre-ville et les autres gares se distinguent, car généralement les gares terminales au centre-ville sont partagées par plusieurs autres services de trains et l'utilisation des quais fait l'objet de contraintes plus importantes (TRB, 2003a). De plus, la distance entre les gares constitue un facteur influençant la vitesse commerciale du train

Tableau 2.3 Vitesse en fonction de la distance et du ratio puissance/poids

Station Spacing (mi)	Average Operating Speed (mph)		
	P/W = 3.0	P/W = 5.8	P/W = 9.1
Average Dwell Time = 30 s			
1.0	16.8	20.3	22.3
2.0	25.8	30.9	35.0
4.0	36.4	44.1	48.6
5.0	40.3	48.7	52.7
Average Dwell Time = 60 s			
1.0	14.8	17.4	18.8
2.0	23.3	27.4	30.6
4.0	33.8	40.4	44.1
5.0	37.8	45.0	48.5

NOTE: P/W = power-to-weight ratio

Assumes 80-mph speed limit, no grades, and no delays due to other trains.

Sécurité. La signalisation et la sécurité qui découle d'une ligne commutée constituent deux des éléments déterminant la fréquence maximale et la capacité de la ligne (TRB, 2003a). La signalisation de base divise la ligne en segments ou cantons où l'on régule l'entrée et la sortie de train de chaque canton par un panneau de signal lumineux. La figure 2.12 illustre la signalisation après le passage d'un train en station. La distance des cantons et le nombre de cantons interdits déterminent la distance de sécurité entre deux trains.

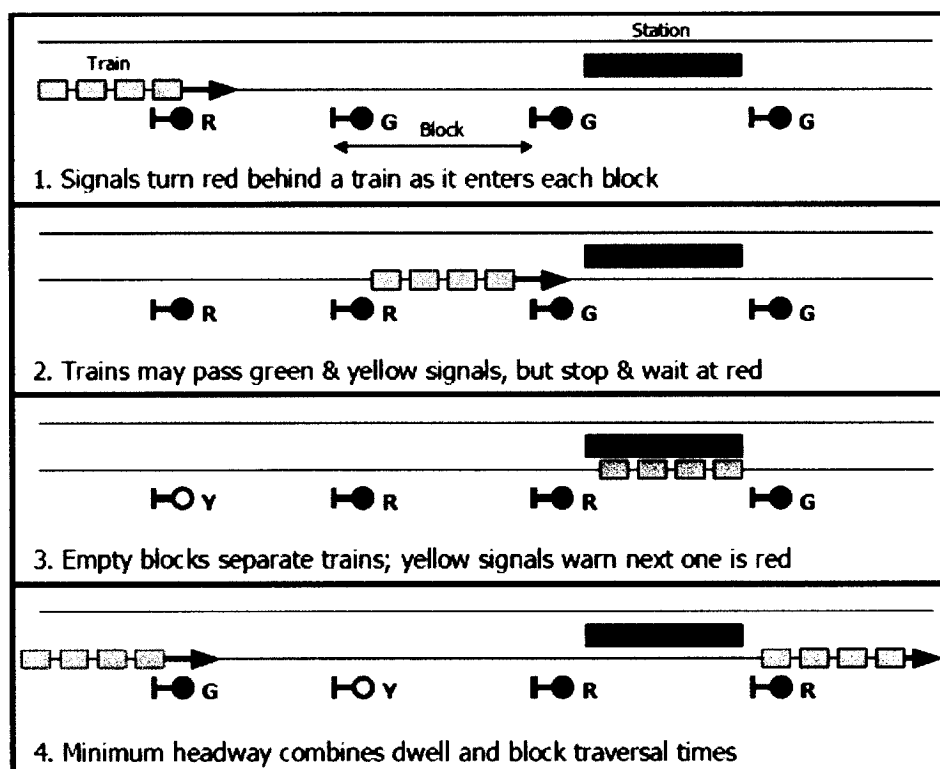


Figure 2.12 Signalisation de base sur une ligne commutée (TRB, 2003a)

En plus de la distance de sécurité, les planificateurs ajoutent généralement une distance de marge permettant à un train d'accumuler un certain délai avant d'affecter le train suivant.

La signalisation détermine aussi la limite de vitesse à respecter. Les signaux d'arrêt, d'approche lente, moyenne et limitée sont associés à des limites de 0, 15, 30 et 45 mi/h

respectivement (Connor, 2005). Un signal indiquant une voie libre autorise alors le train à circuler à vitesse maximale permise selon le type de train et le type de transport. Par exemple, un train ordinaire transportant des passagers est limité à 60 mi/h aux États-unis.

L'ensemble des règles régissant la sécurité et la signalisation des trains est décrit dans le manuel de capacité.

Dynamique. La dynamique d'un train de banlieue est caractérisée a priori par un parcours entre deux gares. Les caractéristiques de propulsion, de chargement du train et le ratio de la puissance sur le poids déterminent la vitesse maximale atteinte, l'accélération, la décélération (TRB, 2003a).

	Power-to-Weight (P/W) Ratio				
	2	4	6	8	10
Distance to accelerate (mi)	23.0	7.3	3.5	2.5	1.9
Distance to accelerate (km)	37.0	11.6	5.6	4.0	3.1
Acceleration time (min)	23.7	7.7	4.3	3.0	2.3
Time lost (min)	3.7	2.3	1.6	1.2	1.0

Figure 2.13 Impact sur l'accélération de différents ratios puissance/poids

La propulsion et la résistance d'un véhicule sont bien décrites dans la littérature (Horowitz, 2004). Les lois de Newton représentent l'accélération comme fonction des forces nettes appliquées sur le véhicule. Les éléments de résistance au mouvement sont la friction, les pertes dues à la vitesse, l'air, la pente et les courbes.

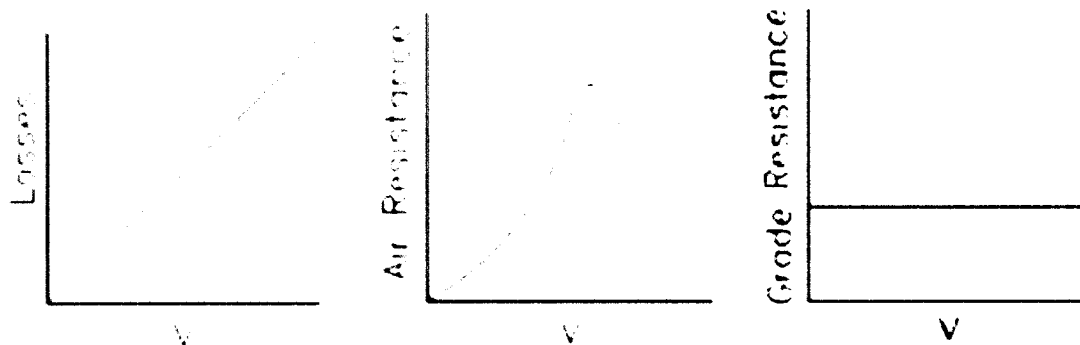


Figure 2.14 Résistance de certains éléments en fonction de la vitesse

L'équation de Davis permet de calculer la résistance sur un rail (Horowitz, 2004). La formule permet de déterminer l'accélération en fonction de la vitesse d'où l'on peut déduire la figure 2.15 « vitesse distance » appliquée à une locomotive de l'AMT (Dorval, 2005). De son côté, la décélération est supposée constante avec une transition respectant la limite de variation d'accélération, appelée « jerk ».

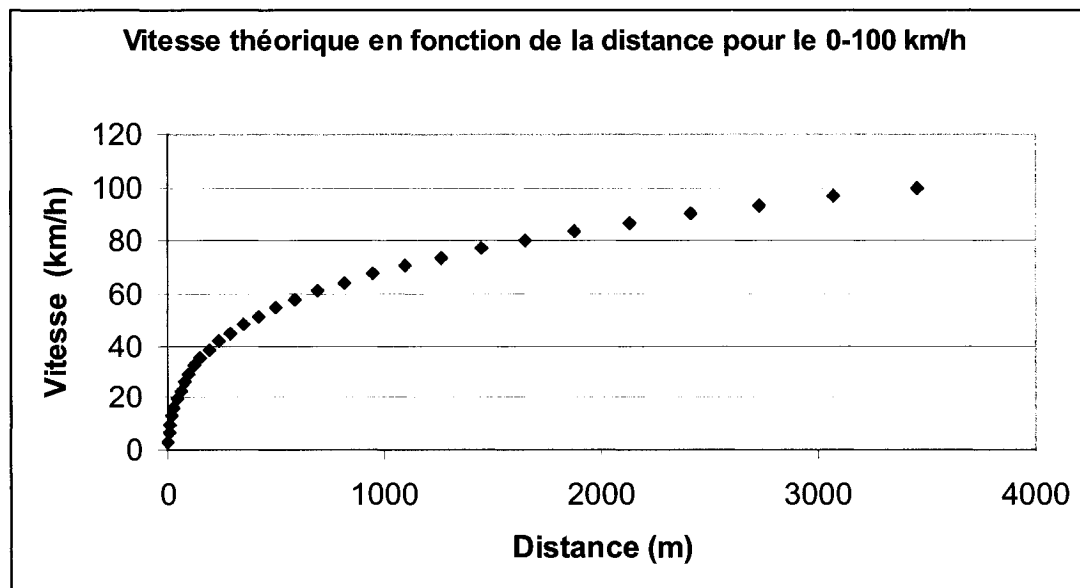


Figure 2.15 Vitesse théorique d'une locomotive 800 (AMT) en fonction de la distance pour le 0-100 km/h (Dorval, 2005).

Planification. Les caractéristiques de planification propre au train touchent en particulier l'horaire. Particulièrement sur un chemin de fer commuté, la planification est délicate et doit tenir compte des autres trains et des distances minima. Le guide de capacité consacre un chapitre entier sur le calcul des fréquences optimales en fonction de la configuration de la voie, du type de voie, des véhicules, des règles de sécurité, etc (TRB, 2003a).

Comme pour les autres modes de transports, les mouvements des trains sur la voie peuvent être catégorisés comme déchargés ou chargés. Le mouvement déchargé,

appelé aussi kilométrage mort, est nécessaire pour les transferts entre les garages et les stations terminales, mais n'engendre aucun impact direct sur les usagers.

De plus, le planificateur doit avoir des considérations de balance des stocks en fin de journée. La balance des stocks assure que les lieux d'où les trains prennent leur départ doivent avoir le même nombre de train en début et en fin de journée.

La compréhension de ce système permet ensuite au planificateur de confectionner un horaire indiquant le trajet exact que les locomotives doivent suivre dans une journée. Chaque trajet est constitué d'une série de stations à atteindre, et ce, à un moment précis de la journée. Cet horaire offre une base de référence pour l'évaluation subséquente de la qualité de service.

2.5 Montréal et l'AMT

La première compagnie de transport à voir le jour dans la région de Montréal était la Montreal City Passenger Railway Company (STM, 2006b). Inaugurée en 1861, son réseau s'étendait sur 6 miles (9.6 km) de rails et desservait 118 000 habitants. Depuis, le contexte a bien changé et la grande région de Montréal compte plus de trois millions de personnes réparties sur deux îles et deux rives. Cette croissance démographique a entraîné le développement d'un réseau de transport qui compte aujourd'hui trois sociétés de transport majeures (Montréal, Laval, Rive-Sud), douze conseils intermunicipaux (CIT) et cinq organismes intermunicipaux de transport en commun (OMIT) (AMT, 2006). De plus, dans les dernières années, un phénomène d'étalement urbain combiné à une stabilité du centre-ville comme générateur d'emploi ajoute une pression supplémentaire au réseau de transport existant (Chapleau, 2002). L'AMT a donc été créée en 1995 pour chapeauter l'ensemble de ces organismes de transport. Elle a pour mandat d'améliorer l'efficacité du déplacement de personnes dans ce contexte et d'accroître l'utilisation du transport en commun (AMT, 2006). Elle exerce

son rôle par la gestion d'équipements comme les sites de stationnements incitatifs, des voies réservées et des terminus, de la gestion des titres métropolitains intégrés, et de la prise en charge de certains réseaux d'autobus, de services de transports adaptés et finalement du réseau de trains de banlieue. La vision stratégique de l'AMT propose un avenir orienté vers le transport en commun (AMT, 2006).

Sur l'île de Montréal, le réseau de la STM gère et exploite le réseau à la figure 2.16.

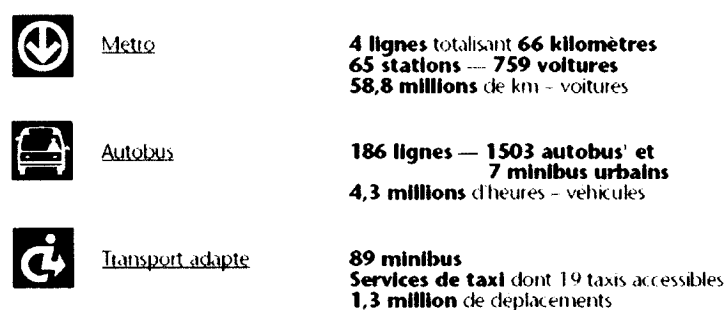


Figure 2.16 Réseau de la STM (STM, 2006b)

Au total 1,3 millions de déplacements quotidiens sont effectués sur le réseau de la STM (STM, 2006b).

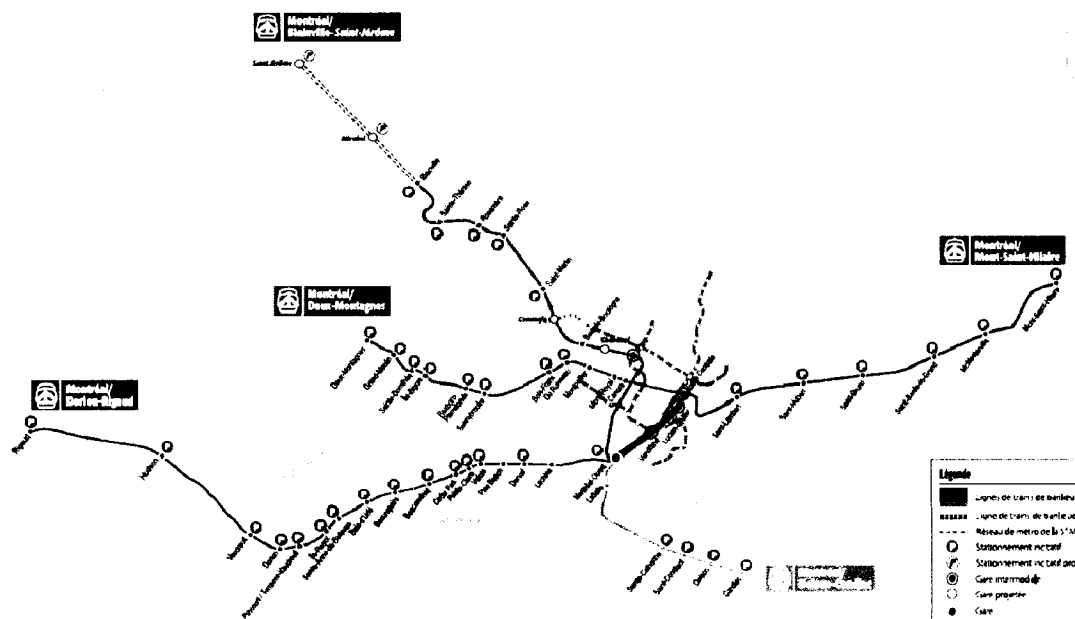


Figure 2.17 Réseau de trains de banlieue de la grande région métropolitaine

De son côté, le réseau de trains de banlieue de l'AMT compte 5 lignes en service et une en construction réparties sur 170 kilomètres et jalonnées de 45 gares. Il compte 180 voitures et 31 locomotives avec 14.6 millions (~46000 par jour) de déplacements en 2005 (AMT, 2006). Seulement pour la ligne Montréal-Dorion, 63.9 millions de passagers*km sont parcourus annuellement pour une moyenne de 20 km par voyage. À titre comparatif, la ville de Toronto exploite un service de train de banlieue, GOTransit, comprenant 7 lignes, 56 stations et 361 kilomètres de réseau. GOTransit supporte 150000 déplacements par jour, soit environ trois fois plus que l'AMT (TTC, 2006).

La caractérisation de la clientèle du train de banlieue et de son comportement de mobilité a fait l'objet d'études antérieurs (Chapleau, Allard, Trépanier, Morency, 2002; Chapleau, Morency, 2003). En résumé, la clientèle des trains de banlieue demeure plus loin, a un revenu supérieur, possède et combine la voiture pour ses déplacements en train pour finalement bénéficier du mode de transport en commun ayant la plus grande vitesse commerciale.

L'efficacité du train de banlieue et son impact dans le développement des banlieues sont appuyés par des histoires de succès au niveau de l'achalandage dans les dernières années. En effet, celui-ci se trouve en constante progression depuis 10 ans (AMT, 2006) . Depuis sa création en 1995, l'AMT a créé 3 lignes qui aujourd'hui fonctionnent à pleine capacité, comme en témoigne cet extrait (Bisson, 2005)

«Dix ans après avoir été reconstruit de bout en bout et converti à l'électricité au coût de 300 millions de dollars, le train de Deux-Montagnes, la Cadillac de l'AMT, ne suffit plus à la tâche: ses 10 départs quotidiens à l'heure de pointe sont tous pleins. »

Le taux de ponctualité mesuré global est de 96,7%. Pourtant, plusieurs incidents ont été recensés sur le terrain (Bisson, 2005) :

« Les pannes fréquentes des locomotives en rase campagne, les portes de voitures qui refusent de s'ouvrir, les rails qui cèdent, les aiguillages

défectueux et les annulations de départs sans préavis témoignent tous de l'épuisement d'un réseau construit à la hâte au plus bas coût possible».

Ce genre de constat a pour effet d'encourager l'AMT à orienter ses objectifs vers l'amélioration des services. Dans sa déclaration de service aux citoyens et citoyennes, l'AMT présente le système d'information transports qui permet d'évaluer l'atteinte des objectifs transport à l'aide d'indicateurs de performances. De plus, ses objectifs tendent à développer des outils d'informations aux usagers pour les trains de banlieue telle que la communication vocale en gare, etc. À cela s'ajoute des programmes fédéraux comme le projet *d'étude de planification stratégique des systèmes de transport intelligents et déploiement d'un système automatisé en temps réel de détection et d'avis des retards aux usagers* proposé par STI Canada et qui encourage le développement de système intelligent touchant la qualité de service (STI Canada, 2006).

La région de Montréal et son service de train de banlieue se trouvent donc au cœur d'une préoccupation générale d'optimisation et d'amélioration des services de transport en commun offerts aux usagers.

Chapitre 3. Localisation automatique de véhicule par GPS

«The ability to measure and monitor operational performance has historically been limited by data availability.(...) Data availability varies widely among transit agencies including the type, amount, quality, level of aggregation, and frequency of data collection and often hampers service planning and scheduling».(Kimpel, Strathman, Callas, 2004)

Les enjeux de mesure constituent un élément clé dans la modélisation d'un système de transport. En effet, la précision, la fréquence et le niveau de résolution offert par un outil de mesure influent directement sur la conception et la validation de modèles et de procédures pouvant exploiter ces données. Auparavant les techniques d'enquêtes manuelles procuraient que partiellement, en temps différé, l'information sur l'état du service. Par contre, depuis une dizaine d'année, la technologie GPS permet de pallier ce problème en s'imposant comme outil de mesure dynamique de la position d'un véhicule.

La technologie GPS appliquée dans un contexte de localisation automatique de véhicule (AVL) offre un outil de mesure capable de fournir une information de surveillance de haute précision et à haute fréquence. De ce fait, le GPS est devenu un sujet de recherche d'importance. Recommandé comme instrument de choix pour des enquêtes de déplacement, le GPS offre une information détaillée, continue et plus exacte sur la position des véhicules de transport. Il en découle un intérêt grandissant pour la planification, la gestion des opérations et l'information aux usagers d'un service de transport.

3.1 Intérêts des AVL

Depuis les premiers projets pilotes de 1969, les professionnels du transport en commun ont fait l'éloge des systèmes de localisation automatique de véhicules et de leurs bénéfices (Okunieff, 1997). Ceux-ci enregistrent, traitent et communiquent l'information de localisation à d'autres applications nécessitant une information spatio-temporelle précise. Il en découle une information désagrégée exploitable en temps réel et pouvant servir à toutes les dimensions d'un service de transport en commun. La figure 3.1 recense un ensemble non exhaustif d'applications de la technologie (Zito, D'Este, Taylor, 1995; Okunieff, 1997; FHWA, 1998; Quiroga, Bullock, 1998; Furth, Hemily, Muller, Strathman, 2003)

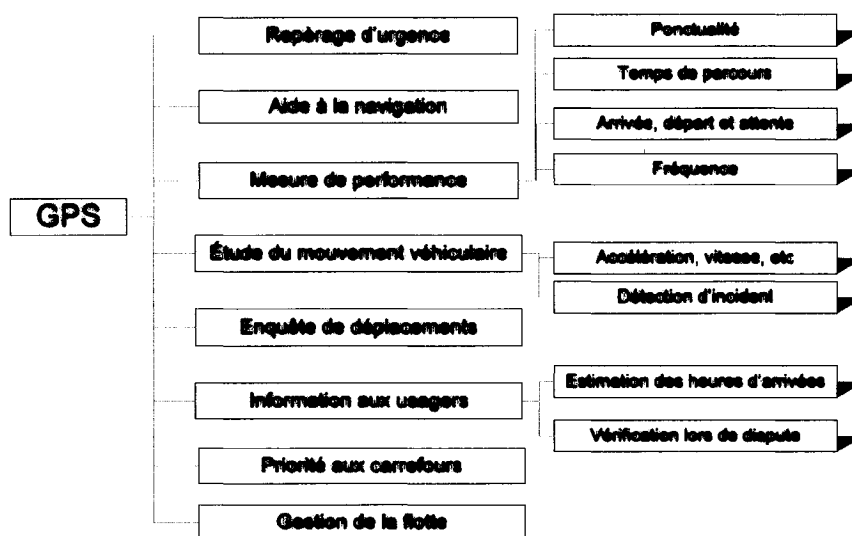


Figure 3.1 Les différentes applications du GPS en transport

Les AVL ont le potentiel de bonifier la qualité de service, la fiabilité, la performance générale du système, la sécurité et l'achalandage. En offrant une information détaillée auparavant absente pour l'opérateur, le planificateur et le service à la clientèle, les AVL offrent un service renouvelé et amélioré (Okunieff, 1997). Originellement, l'emphase a porté sur les systèmes de surveillance temps réel. Pourtant, les données collectées sur

la position espace/temps des véhicules sont la clé pour évaluer la qualité de service (Muller, Knoppers, 2005). Dans cette catégorie d'applications, les heures d'arrivées et de départs, temps d'attente, temps de parcours, la vitesse, la régularité, la fréquence, la ponctualité sont tous des indicateurs potentiels dérivés de données provenant des AVL (FHWA, 1998). De plus, en 1995, un article conclut que « *le GPS, intégré à un système d'information géographique est un outil précieux de calcul de temps parcours.* » (Zito, D'Este, Taylor, 1995).

Malgré les nombreux avantages des AVL retrouvés dans la littérature, l'étude d'une trentaine de systèmes en Amérique du Nord identifie plusieurs lacunes (Furth, Hemily, Muller, Strathman, 2003). En effet, la plupart des agences utilisent les AVL pour répondre à des situations urgentes suite à un suivi temps réel, sans joindre l'information sur l'horaire ou d'autres informations sur les opérations. Il en découle un problème majeur d'intégration des données sur les routes et tracés avec les données d'opération. De plus, il est ironique de constater que les données AVL ne sont en général pas intégrées dans un SIG. Le rapport stipule aussi que l'intégration et l'archivage des données manquent de structure et que les analyses historiques en découlant sont rarement réalisées. De plus, la qualité des données, notamment en bout de ligne, est souvent insatisfaisante. Les problèmes rencontrés sur la numérisation des horaires, le développement de cartes précises, l'intégration des routes, etc, expliquent l'utilisation incomplète des AVL au sein des agences de transport (Okunieff, 1997).

De plus, différents problèmes de design et d'implémentation sont systématiquement rapportés. Parmi ceux-ci, le choix du niveau de résolution des données demeure une décision critique (Furth, Hemily, Muller, Strathman, 2003). En effet, les données peuvent être transmises soit de manière complète, soit en conservant seulement les exceptions ou événements. De plus, le choix entre l'archivage de données aux arrêts seulement, auxquelles peuvent être ajoutées les informations agrégées sur les parcours, ou sur l'information désagrégée, détermine les analyses subséquentes possibles. Ces

considérations de niveaux de résolution, de fréquences d'enregistrement et de niveaux d'agrégation des enregistrements sont de première importance et dépendent du contexte général de l'utilisation des données. À ce sujet, le rapport conclut que le niveau de détail maximal est souhaitable pour un scénario de détection d'incidents, mais que les enregistrements à l'arrêt seulement sont suffisants pour l'analyse des temps de parcours et de la ponctualité. De plus, une fréquence élevée d'enregistrement est recommandée pour une analyse fine du mouvement véhiculaire (Quiroga, Bullock, 1998).

Parmi les différentes technologies utilisées pour la détection de véhicules, les techniques dites du « postsign » développées durant la deuxième guerre mondiale ont longtemps été les plus populaires. Installant un détecteur à l'arrêt, ce type de système enregistre une information de type événementielle en détectant les entrées et sorties d'un rayon autour du « postsign » (Okunieff, 1997). Malgré les bons résultats tirés de cette technique, les techniques jouissant de l'ubiquité fournie par les satellites ont dès le début des années 90 remplacées les « postsign » et sont maintenant la base de presque tous les nouveaux systèmes (Furth, Hemily, Muller, Strathman, 2003).

Face au problème de mesure de la performance, la technologie GPS bénéficie d'un appui de taille dans la littérature. Potentiellement, l'ensemble des indicateurs touchant la dynamique et la ponctualité du système peut en être dérivé. Par contre, les problèmes entourant le design, la gestion, le stockage et le traitement informationnel demeurent des défis à relever.

3.2 La technologie GPS

Récemment, les méthodes traditionnelles de positionnement basées sur les compas, cartes et étoiles ont été remplacées par une nouvelle technologie basée sur l'utilisation de satellites procurant un relevé de position précis, fiable, en tout temps et à l'échelle planétaire (Wolf, 2004). Disponible peu importe la température, le récepteur GPS

obtient une information sur la position en trois dimensions, le temps et la vitesse (PVT).

3.2.1 Fonctionnement

Le « Global Positioning system » de NAVSTAR représente un système composé de 24 satellites appartenant à la défense américaine. Ils sont en constante révolution sur 6 orbitales autour de la terre et émettent continuellement un signal codé. À l'aide d'un outil appelé receveur GPS, quiconque à la surface de la terre peut utiliser ce signal codé pour évaluer son PVT (Garmin, 2000).

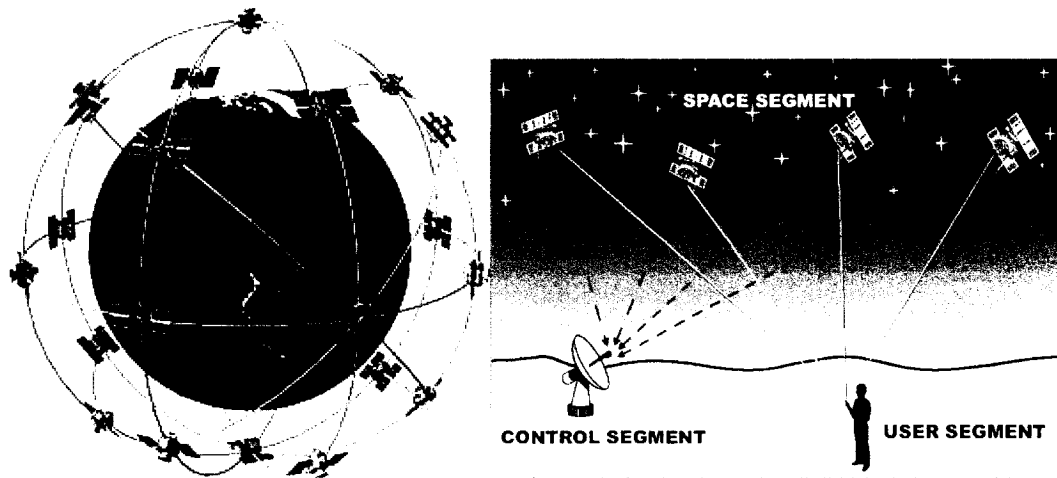


Figure 3.2 Système GPS

Le système GPS est composé de trois composantes majeures, appelées segments.

- Le segment de contrôle, dirigé par l'armée, est composé de cinq stations de surveillance, de trois antennes disposées en des endroits stratégiques pour garder contact avec tous les satellites en tout temps et d'une station maîtresse située au Colorado. Les stations de contrôle permettent d'envoyer les informations orbitales (éphéméride) au satellite qui pourront être ensuite envoyées au receveur GPS.
- Le segment spatial contient les 24 satellites, dont 4 de rechange. Il permet une couverture globale de la planète. La configuration de ce segment est effectuée à

partir du segment de contrôle. Le segment spatial est donc receveur du segment de contrôle et émetteur vers le segment usager.

- Finalement, le segment usager comprend l'ensemble des receveurs et des usagers du GPS. Ces derniers se divisent entre usagers civils et usagers militaires. Les usagers sont munis d'un receveur qui par définition, ne fait que recevoir l'information satellitaire. Cette relation unidirectionnelle et passive autorise un nombre illimité d'usagers.

L'essentiel de la technologie GPS réside dans le principe de triangulation et de l'effet Doppler. La triangulation utilise les distances depuis 3 satellites ou plus pour trouver le point précis de rencontre des 3 arcs de cercle formés par ces distances. Le calcul de la distance est basé sur le temps de parcours de l'onde radio entre le satellite et le receveur $d = v_{ondes} * t$. Le signal radio voyage environ à la vitesse de la lumière, mais le temps est plus complexe à calculer. Pour y arriver, le GPS compare l'heure à laquelle le signal a été envoyé et l'heure à laquelle le signal est reçu. Le problème réside dans le fait que l'horloge du GPS est imprécise comparativement à l'horloge atomique du satellite. Lors d'une désynchronisation des horloges, l'utilisation de 3 satellites ou plus mène à l'identification de positions différentes appelées « pseudo range » (Voir figure 3.3). Le receveur peut alors ajuster son horloge interne de manière à retrouver une position unique et la synchronisation est alors réalisée avec le satellite (Kowoma GPS, 2005). Il est alors possible de calculer la distance.

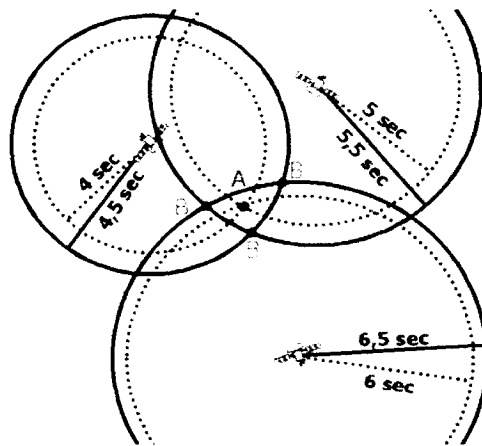


Figure 3.3 Triangulation d'une position (A) à partir d'un receveur GPS a priori désynchronisé. Les temps ne sont pas réels (Kowoma GPS, 2005).

De plus, les applications temps réel nécessitent la transmission des positions calculées par le récepteur à un système de contrôle et de traitement (CALCCIT, 2005). Pour ce faire, la plupart des systèmes GPS sont couplés à des systèmes de transmission de données via les services d'ondes cellulaires disponibles en milieu urbain. Cette seconde étape de transfert de l'information est nécessaire, mais augmente les erreurs de transmission possible.

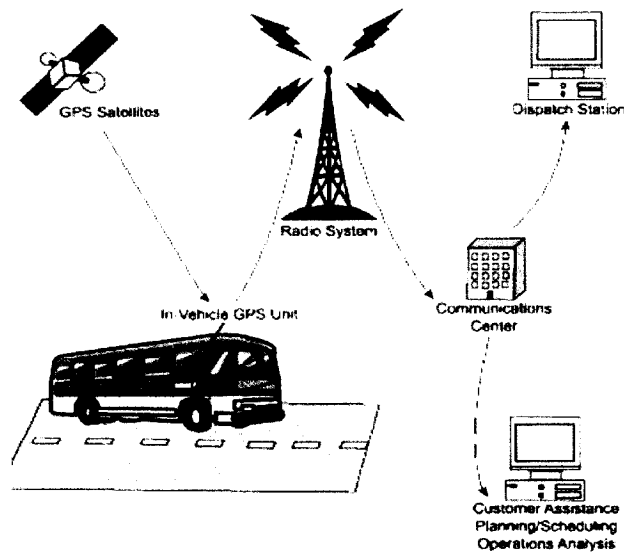


Figure 3.4 Différentes étapes de transfert de l'information en temps réel (CALCCIT, 2005)

3.2.2 Précision et sources d'erreur

La précision des mesures de position est d'environ 15 mètres pour un appareil utilisé seul sans l'ajout de technologies permettant l'amélioration de la précision tel le DGPS (Garmin, 2000). La précision de la vitesse se trouve sous les 1 km/h mais varie en fonction de la vitesse réelle du véhicule. Par contre, la connectivité permanente et directe requise entraîne la possibilité non seulement de perdre la précision prétendue, mais aussi de perdre complètement le signal. Il en résulte que les récepteurs GPS peuvent souvent être inutilisables ou générer des erreurs. Les causes d'erreurs les plus fréquentes sont :

1. Les erreurs de satellite : elles sont des erreurs mineures d'éphéméride et peuvent entraîner une erreur faible, mais difficilement détectable. La position relative de chaque satellite affecte la précision de calcul. Ceux-ci doivent être préférablement bien répartis autour du récepteur plutôt que concentré dans une région du ciel.
2. Les erreurs de « timing » : elles représentent de petites erreurs de désynchronisation avec l'horloge atomique.
3. Les erreurs physiques de signal bloqué ou de signal ayant rebondi : La figure 3.5 présente une étude qui illustre bien ce phénomène où une voiture témoin équipée d'un GPS et d'un système inertiel roule dans différents environnements (ciel ouvert, forêt, sous un pont, etc). La figure 3.5 illustre le profil de vitesse généré par le récepteur GPS comparé à celui du système inertiel.

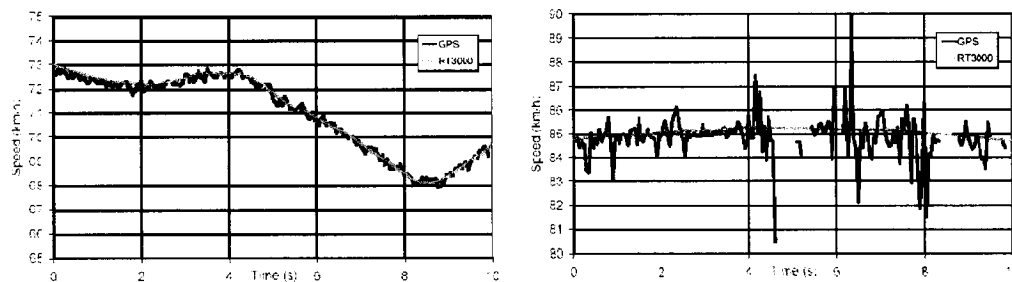


Figure 3.5 Profil de vitesse d'une voiture qui circule à ciel ouvert (à gauche) comparativement à une route en forêt (à droite) (OXTS, 2005).

Cela démontre bien la fragilité des données GPS et leur grande sensibilité à l'environnement extérieur.

3.2.3 Positions, balises, routes et tracés

Ces termes de base représentent les principaux concepts de navigation à l'aide d'un GPS. L'élément nécessaire et suffisant à toute navigation GPS est le relevé de position, appelé en anglais « trackpoint » (Ferreira, 2004). Le « trackpoint » représente une entité ponctuelle contenant l'ensemble de l'information sur la position réelle enregistrée par le GPS. Le tracé ou « tracklog » constitue un ensemble de positions séquentielles. Ce tracé peut être associé à une randonnée, une route traversée, un voyage complet, etc.

Les notions de route et de balise appelées « waypoint » sont secondaires. Ces concepts sont des éléments de référence et d'aide à la navigation. Le receveur peut donc indiquer la direction pour se rendre à une balise ou encore indiquer si une balise se trouve dans un certain rayon. Une balise devient donc un élément virtuel associé à un point de référence, tel un lieu précis, un sommet, etc. Cette balise peut être géocodée à l'avance ou être enregistrée sur le terrain. Les appareils GPS permettent d'utiliser ces balises pour donner une direction à suivre. Une suite de balises forme une route

visitant une série de points d'intérêts. Le chargement de cette route dans le receveur GPS permet de l'utiliser comme boussole de haut niveau.

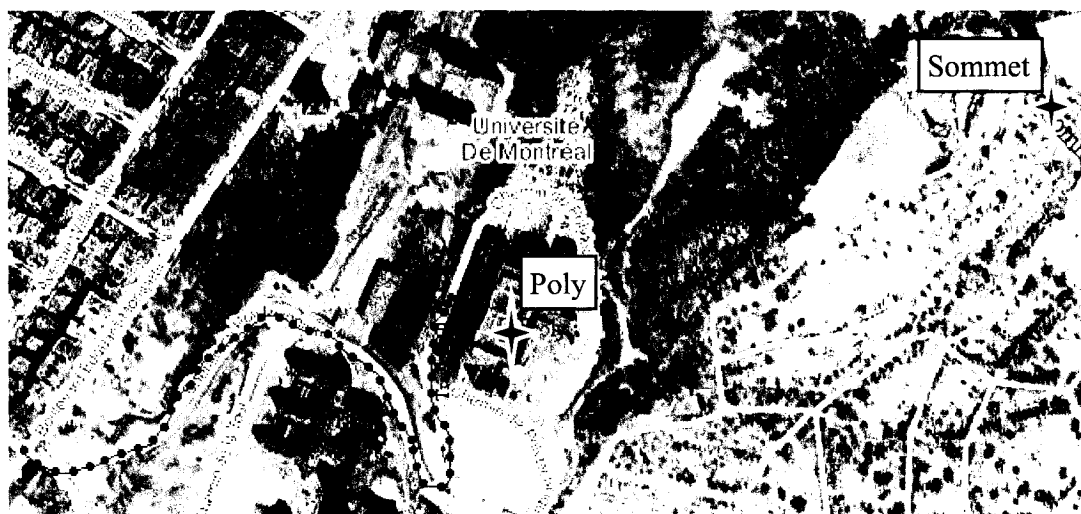


Figure 3.6 Exemple d'un tracé GPS et de deux balises "waypoint" dans *TrackMaker*

3.3 Applications techniques

Cette section cite les différents auteurs qui ont réalisé des expérimentations pragmatiques et quantitatives sur de grands ensembles de données GPS.

3.3.1 Enquêtes de temps de parcours

La précision et le niveau de résolution offert par le GPS autorisent la réalisation d'enquêtes de temps de parcours dans les transports, comme par exemple (Belliss, 2004) :

- La calibration des modèles de trafic
- L'optimisation de la signalisation
- La surveillance de congestion
- L'évaluation de la capacité
- Évaluation de la géométrie

De plus, les enquêtes de temps de parcours s'appliquent dans un contexte de transport en commun.

- Pour maximiser l'efficacité et la productivité du système (Shalaby, Farhan, 2004)
- Comme outil de planification des opérations (Mishalani, McCord, Forman, 2004)
- Comme information de base pour toute application temps réel d'opération ou d'information aux usagers (Mishalani, McCord, Forman, 2004)

Les différentes techniques d'enquête se retrouvent dans le *Travel Time Data Collection Handbook* (FHWA, 1998). Les avantages et inconvénients de chaque technique illustrent les bénéfices apportés par le GPS.

- La technique des véhicules tests est très répandue et consiste à embarquer les enquêteurs dans une voiture et de voyager sur le réseau. L'enquêteur peut alors mesurer les différents temps de parcours entre certains points de référence à l'aide d'un ordinateur et d'un chronomètre. Un GPS couplé à l'ordinateur permet d'enregistrer plus finement la vitesse et le déplacement.

Avantage : Cette technique offre un plein contrôle sur le type de conduite. On peut choisir une conduite qui se rapproche de la vitesse maximum ou une conduite plus moyenne.

Désavantage : Le problème majeur réside dans le faible échantillon recueilli et la possibilité d'introduire des erreurs humaines.

- La reconnaissance de plaque détecte les véhicules à certains points de référence et en déduit les temps de parcours depuis les références précédentes. La reconnaissance de plaque s'effectue manuellement ou encore se réalise à l'aide d'outils de reconnaissance automatique par traitement de l'image.

Avantages : L'échantillon est beaucoup plus grand et aucune installation sur le véhicule n'est nécessaire.

Désavantages : Il n'est pas possible de poster de l'équipement sur n'importe quel site et cela devient difficile sur les voies à vitesse élevée ou à grande densité. De plus, l'erreur humaine ou l'erreur provenant de l'outil de reconnaissance électronique est non négligeable.

- La dernière technique implique l'installation de systèmes intelligents à bord des véhicules de reconnaissance. À l'instar de la première technique, ces véhicules sont dits passifs, car aucun enquêteur n'a besoin d'être présent et aucun style de conduite n'est adopté. En fait, le conducteur effectue ses déplacements comme à l'habitude. Cette technique se base sur l'installation d'un module de perception de données sur une flotte de véhicule.

Avantages : Permet d'effectuer l'enquête sur plusieurs jours ou plusieurs semaines. Les coûts d'installation des modules sont relativement élevés, mais leur utilisation moins onéreuse vu l'étendu potentiel de la période d'observation. De plus, les données sont immédiatement disponibles en format électronique.

Désavantages : La majeure difficulté réside dans le traitement logiciel nécessaire par la suite pour calculer ces temps de parcours.

La technologie GPS est devenue dans les dernières années l'outil de l'avenir pour la réalisation de telles études (Quiroga, 1997). Elles ont porté sur le traitement automatisé, la gestion de grandes bases de données et l'intégration avec des outils SIG.

Quiroga a produit une thèse sur l'utilisation du combo GPS - GIS pour la réalisation d'étude de temps de parcours. Ces recherches l'ont amené à développer une méthodologie qui a pour objectif de transformer des données GPS pures en données de temps de parcours sur un réseau. Supportée par un outil logiciel de traitement de données *GeTT*, la méthodologie propose une approche informationnelle comportant les étapes décrites à la figure 3.7 (Quiroga, Perez, 2002).

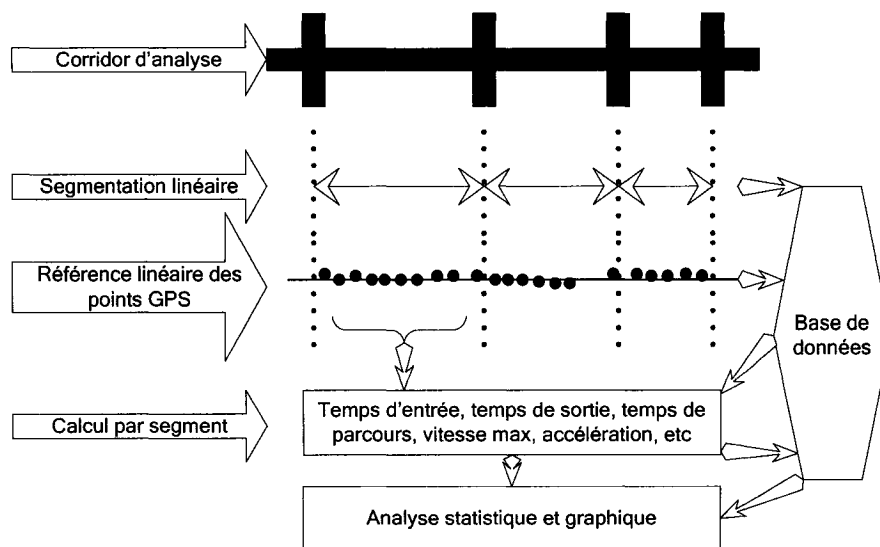


Figure 3.7 Étapes de la méthodologie de calcul de temps de parcours (Quiroga, 1997)

L'approche informationnelle de cette méthode nécessite comme prérequis la conception d'une base de données *Access* (Quiroga, Perez, 2002). La première étape consiste à codifier le réseau en routes, puis en segments de route. La segmentation est faite à partir de chaque discontinuité physique, notamment une intersection. Ces discontinuités sont associées à des points de référence sur la route. Chaque segment devient alors un lien entre deux points de références. De plus, une organisation en route permet de codifier plusieurs corridors routiers à la fois. Cette étape implique la géocodification et l'insertion de chaque point de référence dans une base de données relationnelle.

Par la suite, les données GPS provenant de parcours de plusieurs véhicules, corridors et périodes d'enquêtes sont formatées et insérées dans la base de données pour l'utilisation avec *GeTT*. Celui-ci est utilisé pour effectuer la référence linéaire des points le long du trajet. Cette étape fait appel aux fonctionnalités SIG qui seront vues en détail dans le prochain chapitre. La référence linéaire nécessite un élément de référence géographique vectoriel linéaire, en l'occurrence un *shapefile*, et des éléments

de positionnement, les points GPS. Une carte vectorielle de base créée directement à partir des données GPS assure une concordance des relevés GPS avec le réseau vectorisé.

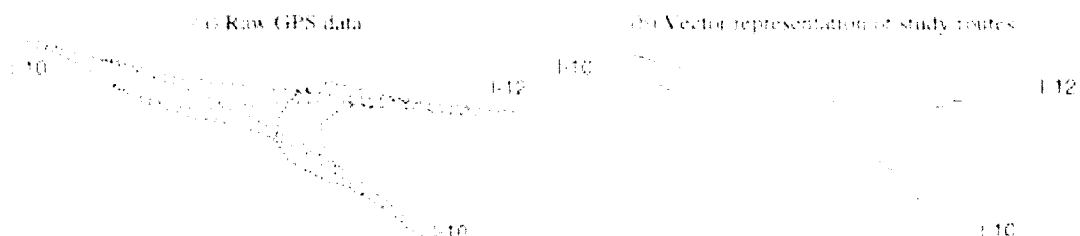


Figure 3.8 Représentation vectorielle d'un réseau basé sur des données GPS (Quiroga, Bullock, 1998)

Les points GPS sont alors associés au vecteur de la carte de base le plus proche et la position sur celui-ci représente la valeur linéaire du point GPS sur la ligne. Les données ainsi référencées autorisent l'étape suivante, soit le calcul des temps de parcours. À cet effet, la figure ci-dessous présente un parcours intergare type dans un diagramme espace-temps.

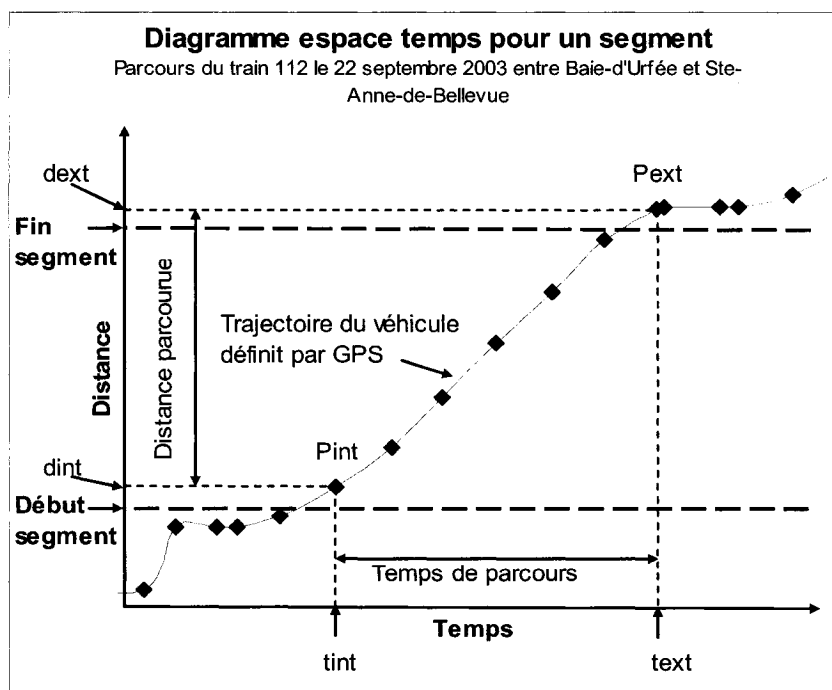


Figure 3.9 Diagramme espace-temps illustrant les différentes limites nécessaires au calcul du temps de parcours

L'essentiel du calcul de temps de parcours réside dans l'identification du premier point à l'intérieur du segment (t_{int}) et du premier point à l'extérieur du segment (t_{ext}) $t_{\text{seg}} = t_{\text{ext}} - t_{\text{int}}$. Pour obtenir une meilleure précision, l'interpolation des temps t_{ext} et t_{int} est suggérée. La vitesse commerciale s'estime par : $u_{\text{seg}} = L / (t_{\text{ext}} - t_{\text{int}})$ avec L comme longueur du segment. Dans le cas où les points d'entrées et de sorties se rapprochent des limites du segment, L peut être estimé par $L_{\text{seg}} \approx d_{\text{ext}} - d_{\text{int}}$. L'erreur sur le temps de parcours du segment causé par la précision des relevés GPS ε se calcule par $\varepsilon_{\text{seg}} \approx \sqrt{2\varepsilon} / t_{\text{seg}}$. L'auteur propose ensuite une autre méthode de calcul du temps de parcours en fonction de l'estimation de la vitesse moyenne, basée sur le relevé de la vitesse instantanée en chaque point. La distance parcourue est estimée par construction trapézoïdale

$$d_{\text{seg}} = \frac{v_{\text{int}}(t_1 - t_{\text{int}})}{2} + \left[\sum_{k=1}^{t_{\text{ext}}-1} v_k \left(\frac{t_{k+1} - t_{k-1}}{2} \right) \right] + \frac{v_{\text{ext}}(t_1 - t_{\text{ext}})}{2}. \quad \text{Cette technique permet de}$$

bénéficier d'une meilleure précision pour la vitesse en comparaison avec la première approche. Par contre, cette démarche a été développée avant le débrouillage de 2000. À ce moment, les relevés de positions étaient beaucoup moins précis. De plus, les données échantillonnées à toutes les secondes justifiaient l'approximation trapézoïdale. Pour cette recherche, la première technique est retenue.

La deuxième partie de la méthodologie consiste à calculer la moyenne des temps de parcours pour ce segment ainsi que pour l'ensemble des segments. À cet effet, une étude des vitesses moyennes calculées à partir d'une moyenne harmonique et d'une moyenne médiane démontre que cette dernière est la plus représentative. L'équation ci-dessous est donc recommandée

$$\bar{u}_{\text{seg}} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left[\frac{L_i}{L_i} \frac{1}{u_{mi}} \right]} \quad \text{avec } u_{mi} \text{ étant la médiane des vitesses sur le segment } i.$$

Les temps de parcours et vitesses de segment qui en découlent ont ensuite fait l'objet d'analyses plus spécifiques :

- La notion de réduction de données est apportée en utilisant des longueurs de segments variables pour réaliser une agrégation. Par analyse des résidus, la qualité de l'agrégation est évaluée et l'analyse conclut que les enquêtes traditionnelles de temps de parcours sur de longs segments n'offrent pas la résolution nécessaire à l'identification de perturbation ponctuelle causée par des discontinuités physiques localisées.
- Une analyse de la fréquence d'échantillon permet de déterminer qu'une haute fréquence ($\sim 1-2\text{sec}$) permet d'améliorer la qualité des temps de parcours, mais dans le cas où cela est impossible, une couverture complète des segments est souhaitable en prenant une fréquence d'échantillonnage en deçà de la moitié du temps de parcours le plus rapide.
- Une analyse de la tendance centrale de la vitesse démontre que la médiane représente mieux les conditions de trafic.

La recherche recommande en dernier lieu d'associer chaque point GPS à une position linéaire plutôt qu'à un segment.

Dans le monde du transport urbain collectif, ces techniques de calcul du temps de parcours s'appliquent, mais on ajoute une dimension liée à la notion d'horaire et de ligne. Une des méthodologies retrouvées dans la littérature est illustrée à la figure 3.10 (Bullock, Jiang, Stopher, 2005).

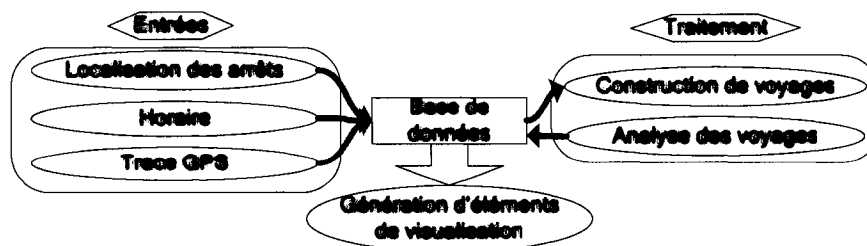


Figure 3.10 Flot informationnel pour l'analyse des temps de parcours (Bullock, Jiang, Stopher, 2005)

La segmentation des corridors autoroutiers présentée précédemment fait alors place à une décomposition en voyages segmentés par une série d'arrêts. Contrairement à l'approche par référence linéaire, la technique présentée détermine les passages aux arrêts en détectant les positions GPS localisées dans un rayon de 50 mètres autour des arrêts. La construction des voyages s'effectue donc en identifiant les passages d'arrêt en arrêt entre les deux terminus. Puis, la séquence d'arrêt est analysée pour identifier les voyages réguliers, des voyages spéciaux et des voyages inconnus. Pour chaque voyage identifié, les temps de parcours entre chaque arrêt sont calculés et la mesure de la ponctualité s'effectue en comparaison avec l'information sur l'horaire. Évidemment, les voyages identifiés préalablement doivent concorder avec les voyages contenus dans l'horaire.

Un autre article propose aussi une approche par segmentation, mais au lieu d'utiliser les arrêts comme points de segmentation, c'est plutôt la géométrie du réseau routier qui détermine la décomposition en nœuds (Lin, Zeng, 1999). La figure 3.11 illustre en haut les nœuds générés pour la segmentation, au milieu un exemple d'un segment du tracé et en bas la représentation nœud-lien du tracé d'un autobus. Un tracé d'autobus se représente donc par une série de nœuds-lien.

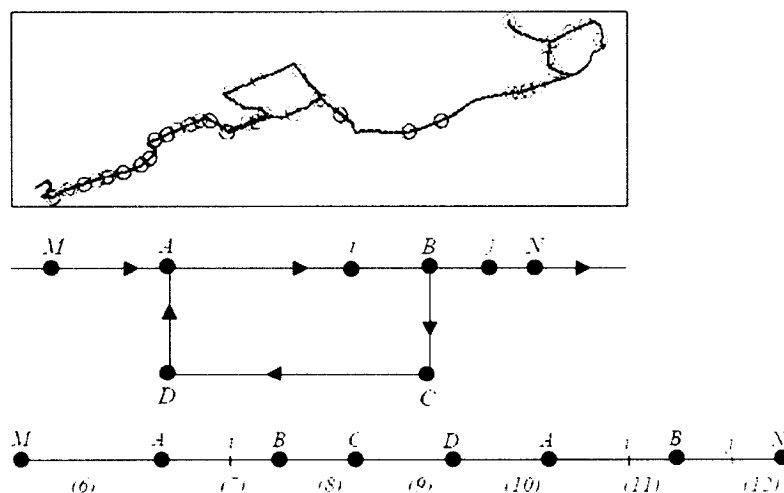


Figure 3.11 Représentation nœud-lien d'un tracé d'autobus (Lin, Zeng, 1999)

Le passage à une représentation linéaire nœud-lien autorise le calcul de corrélations chaînées entre un retard à un arrêt et aux arrêts subséquents, facilitant les applications de prédiction d'arrivée par propagation des délais.

3.3.2 Enquête sur la mobilité des personnes

Les recherches sur le calcul de temps de parcours à l'aide du GPS ont révélé une panoplie d'études pertinentes, dont celles relevant du domaine des enquêtes de déplacements et d'activités personnelles.

Les enquêtes origine destination traditionnelles entraînent une faible qualité des temps de départs et d'arrivée. Par contre, un projet d'enquêtes origine destination où chaque répondant utilise un ordinateur portable avec un receveur GPS a démontré que la précision sur les temps de parcours et les distances parcourues étaient plus près de la réalité (Wolf, Schonfelder, Samaga, Oliveira, Axhausen, 2004). Une approche informationnelle combine alors l'utilisation de bases de données multiples, des SIG et des analyses statistiques pour l'imputation des motifs d'activités lors de déplacements surveillés par GPS.

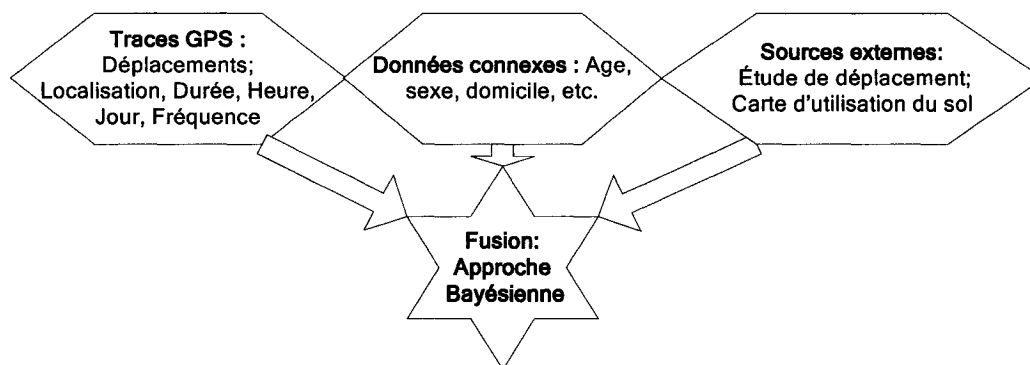


Figure 3.12 Approche bayésienne d'intégration de données GPS à d'autres sources pour l'imputation des motifs d'activités

De plus, les SIG sont utilisées pour identifier les arrêts, départs et arrivée des véhicules. Une analyse spatiale intéressante consiste à utiliser des zones tampons autour des relevés GPS pour identifier les destinations probables.

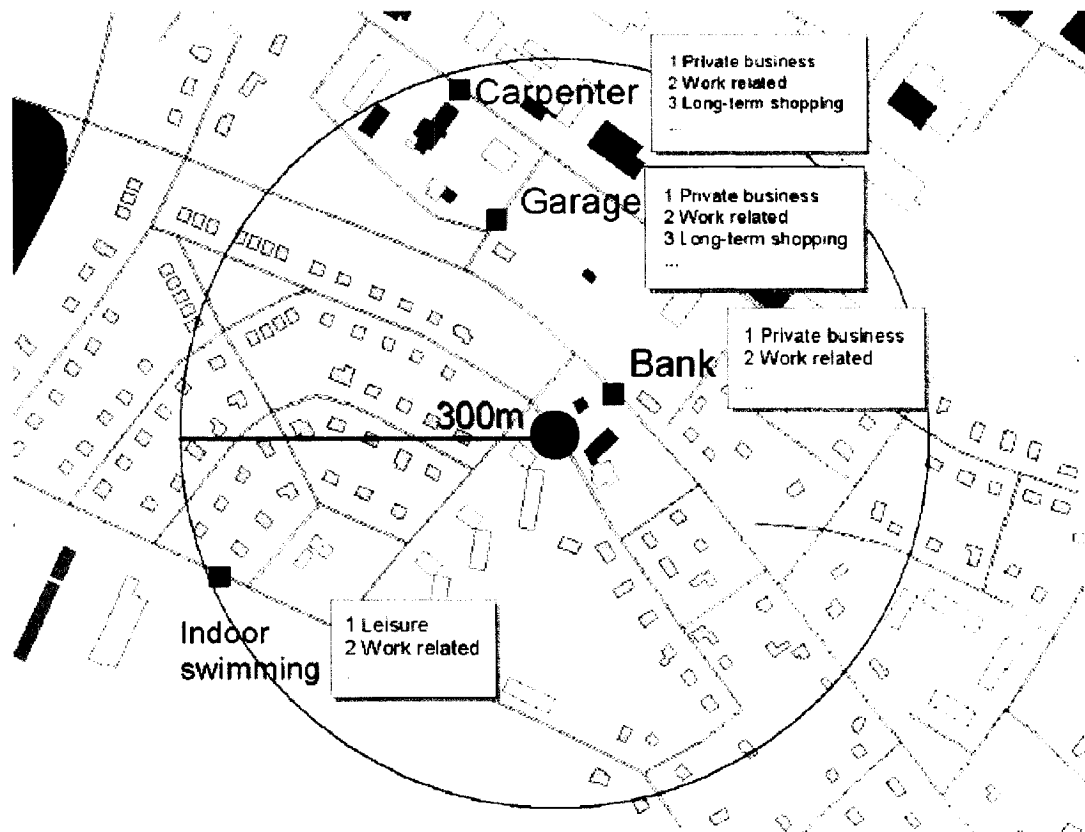


Figure 3.13 Identification de motifs d'activités par zones tampons(Wolf, Schonfelder, Samaga, Oliveira, Axhausen, 2004)

L'article illustre aussi l'importance de caractériser les données, identifier les erreurs GPS probables et possiblement corriger les traces. De plus, il démontre le potentiel d'un traitement automatisé sur des bases de données de grandes tailles en utilisant une approche intensément axée sur les logiques spatiotemporelles des déplacements quotidiens (Wolf, Schonfelder, Samaga, Oliveira, Axhausen, 2004).

Chapitre 4. SIG et visualisation de phénomènes de transport

« *Un système de transport s'étend dans le temps et dans l'espace.* » (Manheim, 1979)

L'exploitation de bases de données spatiales d'envergure entraîne une nécessité d'interprétation et de compréhension des données. L'approche informationnelle s'explique par: « *Comprendre la réalité, c'est d'abord d'observer, mais c'est aussi attribuer une valeur, une signification, une pertinence, une intelligibilité aux observations* » (Morency, 2004). Dans ce contexte, l'avènement du système d'information géographique permet de répondre en grande partie à ce besoin.

Un SIG comprend les données, les logiciels, le matériel, le personnel et l'organisation institutionnelle pour collecter, organiser, analyser et disséminer une information à caractère spatiale (Dueker, Ton, 2002). L'architecture d'un SIG (figure 4.1) se compose de trois niveaux indépendants, soit d'un système de gestion de base de données (SGBD), d'un coffre à outils d'analyse spatiale et d'une interface usager (GUI). De ce trio découle un cycle informationnel qui tend à organiser, unifier une information à la base chaotique, à l'exploiter à l'aide d'outils d'analyse et à la présenter sans perte de complexité (Thevenin, 2002; Morency, 2004).

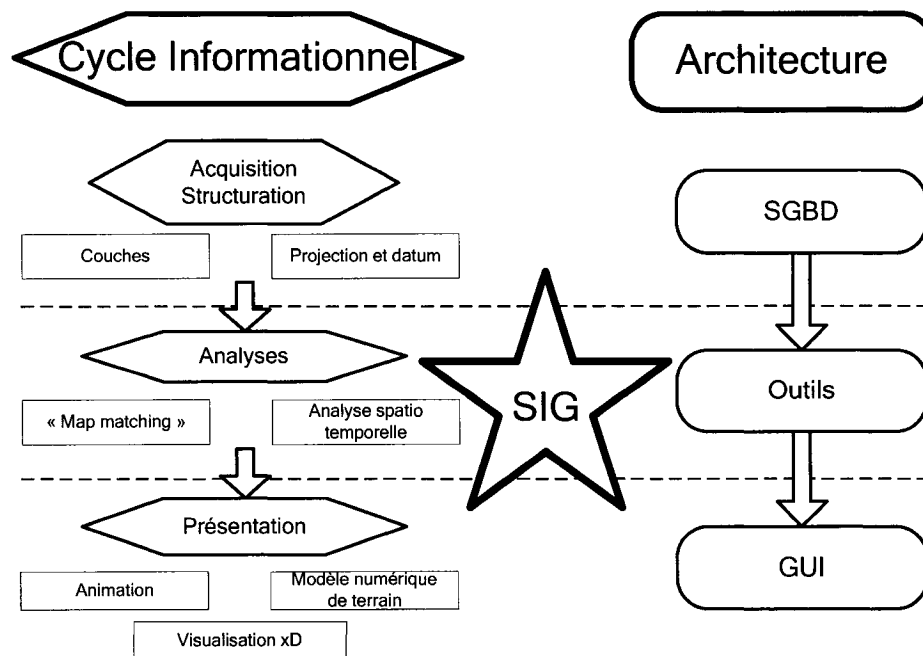


Figure 4.1 Cycle informationnel et architecture à 3 niveaux (inspiré de (Thevenin, 2002))

Ce chapitre couvre la littérature portant sur les fonctionnalités et concepts SIG pertinents à cette recherche. Une attention spéciale est mise sur la présentation d'une information multivariée à caractère spatio-temporelle.

4.1 Acquisition et structuration

L'information originale, désorganisée, doit être mise en forme, unifiée et codifiée pour autoriser les étapes subséquentes de l'analyse (Morency, 2004). L'information spatiale s'exprime en une, deux ou trois dimensions et se caractérise selon deux formes principales : matricielles ou vectorielles.

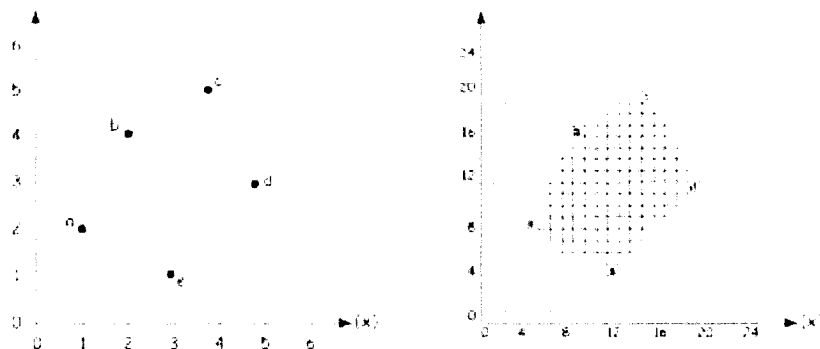


Figure 4.2 Information vectorielle (à gauche) et matricielle (à droite) (Thevenin, 2002)

La représentation vectorielle utilise des objets continus linéaires codifiés à partir d'une position cartésienne (NCHRP, 2003):

- Le point représente une information associée à une localisation simple où le facteur d'échelle de la carte engendre une représentation par un point symbolique plutôt que par une aire.
- Une ligne se rapporte plutôt à une ligne d'une seule dimension définissable par une suite de coordonnées spatiales.
- Une aire ou polygone se représente aussi par une série de coordonnées spatiales créant une zone homogène.

La représentation matricielle divise l'espace en cellules de taille généralement uniforme. Chaque cellule devient un objet informationnel, caractérisable et visualisable à différents niveaux de résolution. La résolution de la matrice informationnelle fait varier l'agrégation de l'information contenue dans les cellules. La position d'une cellule se déduit à partir de la taille de la matrice et de la position linéaire absolue depuis une origine prédéfinie, souvent un coin de la matrice.

Le pouvoir des SIG réside dans la possibilité d'associer à l'information spatiale un attribut non géographique traditionnel. Cette information est de type qualitatif ou quantitatif (Morency, 2004). Le niveau de chaque attribut dépend de sa précision. Les

attributs qualitatifs et discrets sont qualifiés de nominaux. Si un ordonnancement est possible, on le qualifie d'ordinal. À noter que l'ordonnancement peut être de type partiel ou total si tous les éléments sont comparables. Les données quantitatives où l'on peut quantifier une différence se représentent sur une échelle dite d'intervalle et finalement, si cette échelle possède un zéro absolu, on la qualifie de rapport ou ratio.

La structuration de l'information dans un SIG classique implique l'organisation en couches de l'information matricielle et vectorielle. Une couche est associée normalement à une thématique ou une classe d'objets. Le format standard d'une couche est le *Shapefile* d'ESRI pour le vectoriel et le DEM (Digital Elevation Model) pour le matriciel.

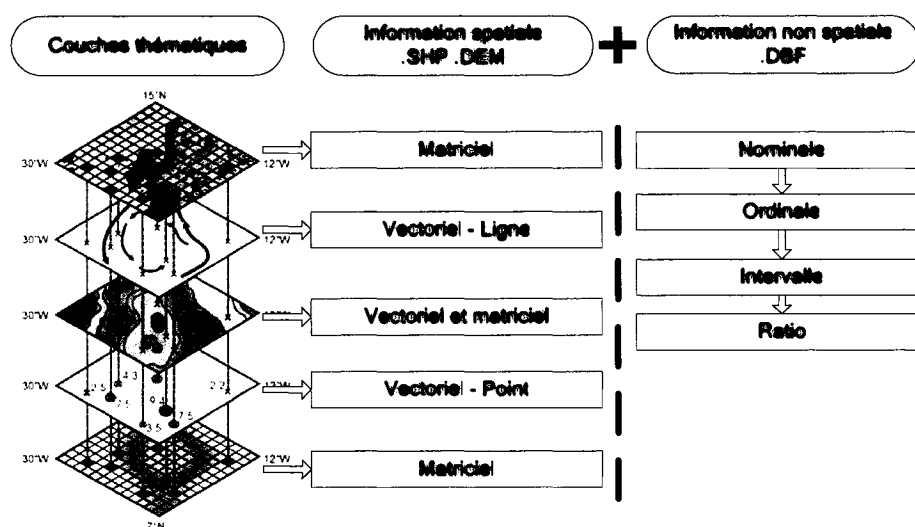


Figure 4.3 Structuration en couche d'un SIG

4.1.1 Projection et datum

Pour arriver à localiser un endroit sur la planète, un système de références ou système de coordonnées est indispensable. Vu la forme sphérique accidentée de la planète, une coordonnée en 3 dimensions est nécessaire pour identifier exactement un lieu. Par contre, la cartographie traditionnelle nécessite des représentations 2D.

Pour y arriver, des systèmes de coordonnées géodésiques, notamment le « latitude longitude », utilisent les angles entre le point à localiser et un point sur l'équateur (longitude) ou sur le méridien de Greenwich (latitude).

Une autre technique consiste à utiliser une projection représentant la planète sur une carte en deux dimensions. Il existe des milliers de projections, toutes dérivées de transformations mathématiques permettant de passer d'une coordonnée provenant d'une sphère à un plan. La figure 4.4 illustre trois types généraux de représentation de la planète, laquelle engendre nécessairement des distorsions selon la position sur le plan. Selon le type de projection, certains attributs peuvent être conservés, notamment le rapport des surfaces ou le rapport des formes.

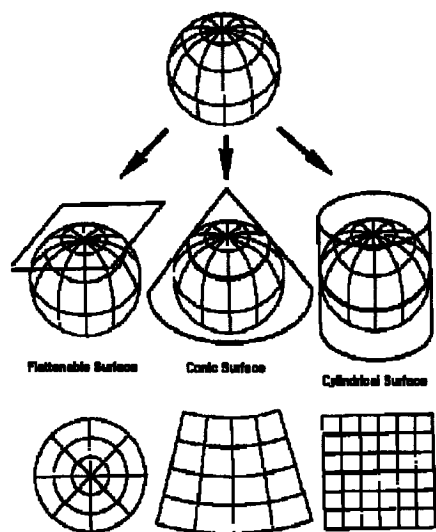


Figure 4.4 Trois types de projection cartographique (surface plane, conique et cylindrique) (OWU, 2004)

De plus, la forme de la surface étant irrégulière, plusieurs ont tenté d'en décrire la forme ellipsoïde. Le datum définit cet ellipsoïde par rapport au centre de la terre. Historiquement, les datums se sont succédés précisant à chaque fois la forme de la terre, mais depuis l'arrivée des satellites, le datum WSG-84 est devenu la référence mondiale (NAD83 en Amérique du Nord).

Les données spatiales se décrivent donc par une projection ainsi qu'un datum et toute tentative d'unification comporte une conversion des données dans un couple projection-datum commun.

À titre d'exemple, les coordonnées géodésiques, ainsi que les deux projections les plus populaires au Québec, soient le UTM et le MTM, ont été comparées pour le calcul de distance entre certains points de Montréal.

Tableau 4.1 Coordonnées des 4 extrémités de l'île de Montréal selon les 3 formats les plus populaires.

Point	LL		UTM		MTM	
	Lat	Long	X	Y	X	Y
1	45.42156	-73.9681	5030079	580699	5031398	268167
2	45.42124	-73.65267	5030408	605377	5031267	292852
3	45.55601	-73.67108	5045356	603689	5046247	291443
4	45.6985	-73.48539	5061444	617883	5062069	305938

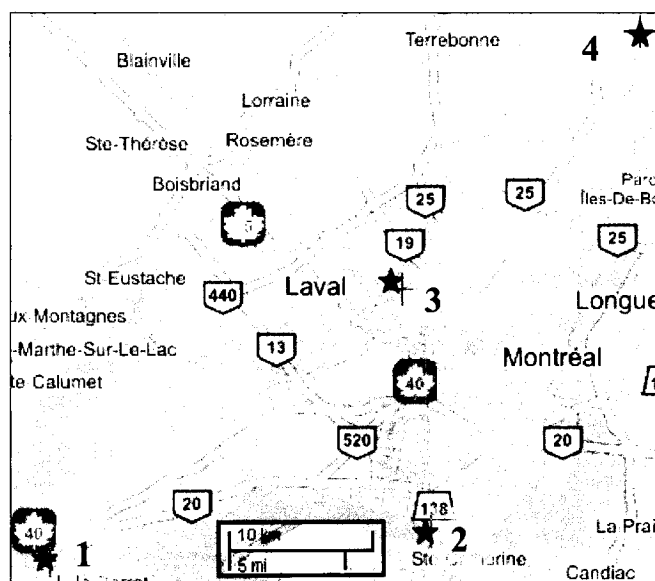


Figure 4.5 Représentation de 4 points aux extrémités de l'île de Montréal

Tableau 4.2 Variation en mètres entre deux mesures de distance selon le système de coordonnées

SEGMENT	LL-UTM	LL-MTM	UTM-MTM
12	78.63	83.78	5.15
13	60.82	66.95	6.12
14	92.37	102.0	9.71
23	-1.15	1.961	3.11
24	15.67	21.24	5.57
34	32.11	35.54	3.43

La formule de Haversine est utilisée pour le calcul des distances en coordonnées latitude-longitude tandis que le loxodrome (ligne droite sur une projection de Mercator) est utilisé pour les projections MTM et UTM (Movable Type, 2006).

Il en résulte une faible variation entre les projections MTM et UTM, mais une variation plus importante pour les distances dans l'axe est-ouest entre les coordonnées géodésiques et les projections de UTM et MTM.

4.1.2 Qualité de l'information

L'utilisation stratégique de données spatialisées dans un processus de planification en transport nécessite de représenter correctement des lieux pour éviter les problèmes d'échanges et les erreurs d'analyses (FTA - DOT, 2005).

"Data quality is the relationship of the spatial data to the reality that it is attempting to represent" (Fexpe, Windholz, Beard, Novak, 2003)

Les données inappropriées, imprécises ou trompeuses ainsi que leur intégration et leur mise à jour font obstacles à la qualité générale de l'information et sur l'ensemble des analyses et rapports en découlant. Dans l'optique de déterminer l'utilité d'un ensemble de données, cinq domaines de la qualité de l'information sont documentés (FTA - DOT, 2005) :

- La précision de la position. La précision absolue se compare à un point recensé dont on est certain de la position exacte tandis que la précision relative porte sur la distance par rapport à d'autres entités spatiales décrites selon le même système.
- La précision sur les attributs. Chaque entité spatiale est accompagnée d'informations non géographiques qui doivent être mises à jour (exactitude temporelle) et respecter les règles de classification et de relations (exactitude thématique).
- La consistance logique par rapport au domaine respecte les règles attribuées au niveau du format ou au niveau conceptuel.
- La complétude mesure l'absence d'entités, de leurs attributs et de leurs relations.
- La qualité de la documentation inclut les sources, les événements et mises à jour qui ont touchés l'information.

Les effets d'échelles, de résolution et de discrétisation influencent la qualité de l'information (Fexpe, Windholz, Beard, Novak, 2003). L'erreur est inhérente à toute représentation virtuelle d'une entité spatiale et il est recommandé d'accompagner l'utilisation de données d'un rapport compréhensible sur la qualité de celles-ci.

4.2 Analyse et traitement

L'analyse spatiale est définie comme l'étude quantitative de phénomènes qui sont localisés dans l'espace. L'analyse de données spatiales est impliquée lorsque les données sont localisées spatialement et que cet arrangement spatial possède une certaine importance dans l'analyse des résultats. Plus précisément, l'analyse de données spatiales en transport s'intéresse surtout à la description statistique, la modélisation et la visualisation. Les études spatiales tentent de définir des modèles et des patrons dans les données spatialisées. Trois approches peuvent être utilisées lors d'une analyse spatiale et sont graduées en fonction du degré de manipulation des données.

- La visualisation qui lors de l'analyse spatiale est associée à la cartographie. Les bases de références, les échelles, les projections et toutes les notions associées à la cartographie deviennent donc essentielles à toute analyse spatiale.
- L'exploration de données inclut une description de données notamment via la construction d'un dictionnaire de données. Elle implique aussi toute manipulation statistique ou autre pour fin de représentation. Il s'agit d'un deuxième niveau de manipulation des données. Cette approche permet de formuler des hypothèses sans les vérifier.
- La modélisation est basée sur le test de certaines hypothèses auquel l'exploration de données seules ne peut répondre. C'est dans cette section que des modèles statistiques sont développés et que les corrélations spatiales sont examinées. La modélisation spatiale se base sur l'évaluation de certaines statistiques classiques, influencé en plus par la proximité spatiale. Cette dualité est présentée comme l'effet premier et de deuxième ordre sur le modèle.

4.2.1 Applications

Le caractère géographique indéniable des systèmes de transport engendre donc une série d'analyses spatiales dont les applications multiples touchent à l'ensemble des activités de recherches actuelles en transport. Les grands domaines d'application sont (Hensher, Stopher, Button, Haynes, 2004):

- La planification de l'utilisation du sol et des transports;
- L'utilisation pour la logistique et le routage;
- L'utilisation dans la collecte et l'analyse de données d'enquête.

À cela s'ajoutent les applications où interviennent les données GPS, la géosimulation, le temps réel, etc.

L'étendue du domaine d'application des analyses spatiales en transport étant très large et amplement documenté, la présente revue porte essentiellement sur les analyses spatio-temporelles et sur les techniques de « Mapmatching »

4.2.2 Analyse spatio-temporelle

Le traitement d'informations à caractère temporel dans les SIG est très récent, la plupart des analyses étant toujours réalisées en fixant le domaine du temps (Neumann, 2005). Le temps mérite une attention particulière et l'intégration de la modélisation dynamique et de la cartographie animée et interactive dans les SIG constitue un défi actuel. À ce sujet, on retrouve plusieurs initiatives de recherche, notamment le logiciel *TimeMap* de l'université de Sidney et le groupe de travail sur *GeoVista* de Penn State University.

À ce jour, il existe quelques modèles d'analyse d'un phénomène spatiotemporelle. Premièrement, l'étude des systèmes de transport au premier chapitre a présenté le concept de géographie temporelle, inhérente à tout système de transport collectif et introduite par Hagerstrand dans le début des années 70. Du point de vue des usagers, les activités quotidiennes sont limitées par un budget espace-temps. Pour augmenter cet espace accessible pour une certaine période de temps, l'efficacité des systèmes de transport et de communication joue un rôle primordial (Miller, 2004).

Les développements théoriques de la géographie temporelle ont mené à la représentation des activités dans des prismes, ou cubes spatio-temporels, ainsi que des chemins temporels. La figure 4.6 illustre une période de temps $t_{ij} = t_i - t_j$ où une personne doit se déplacer d'un point A à B pour effectuer une activité d'une durée a en n'importe quel endroit accessible via le prisme. La mesure des pentes indique l'efficacité, soit la vitesse offerte pour le déplacement.

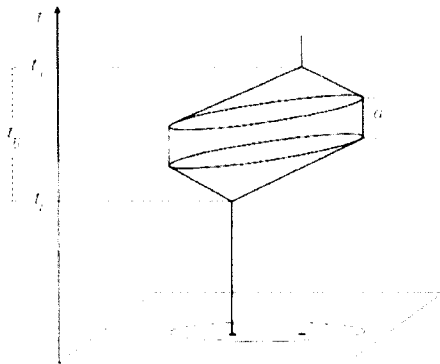


Figure 4.6 Prismes spatio-temporels (Miller, 2004)

En y ajoutant les temps de transport théoriques, cette représentation se transforme en aire de réseau potentiellement accessible, illustrant la couverture du réseau en un certain temps. Cette représentation statique améliore les théories originales, mais écarte les variations dynamiques des temps de parcours, notamment dues aux incidents et congestions. L'utilisation d'arbres de chemins dynamiques illustrant les variations sur les réseaux constitue un axe de recherche actuel.

Deuxièmement, le modèle des séquences de capture propose une représentation semblable à un vidéo au ralenti évoluant dans le temps. On retrouve plusieurs exemples de ces représentations dans l'analyse de la mobilité urbaine (Morency, 2004).

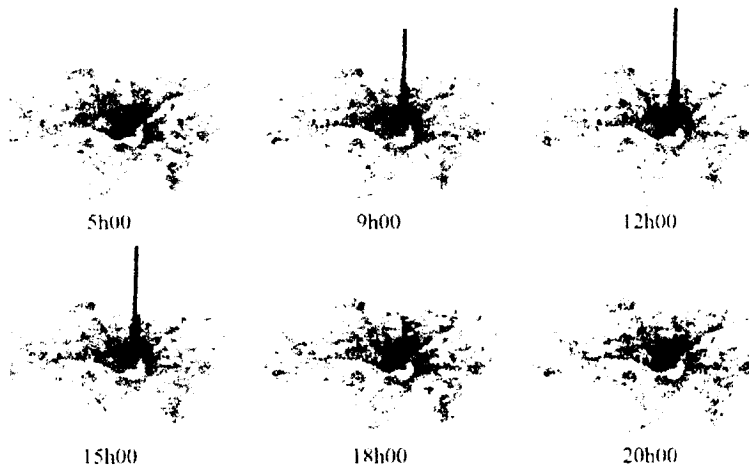


Figure 4.7 Exemple d'un modèle d'évolution spatio-temporelle par séquence de capture (Morency, 2004)

Un troisième modèle reprend les mêmes concepts mais en illustrant seulement les variations par rapport à un état de base. Engendré par des changements ou des événements, ce modèle réduit la redondance d'informations et se prête mieux à certains types de problèmes.

Finalement, un dernier modèle propose une modélisation objet basée sur les événements et changements vécus par cet objet. Chaque objet singulier possède sa propre histoire, et la représentation d'une période nécessite l'évolution de chaque objet jusqu'à cette période.

4.2.3 Map Matching et référence linéaire

La carte de base « base map » définit les données spatiales et attributs fondamentaux du système de transport (FTA - DOT, 2005). Au minimum, cette carte de base est constitué d'un SIG contenant la représentation du réseau et des attributs majeurs (routes, rails, arrêts, etc). Cette base devient la plateforme d'échange, le noyau, de toute analyse ou construction subséquente. Toutes les données s'intègrent par la suite selon le formatage défini par la carte de base. Il en résulte une facilité d'échange et de transfert d'information parmi les instances du système de transport et permet, par exemple, d'éviter les problèmes de projections et datums relevés précédemment.

Parmi les différentes méthodes de localisation proposées, on retrouve les méthodes géographiques classiques, les méthodes linéaires et les méthodes basées sur les attributs. La dernière méthode consiste à associer un point d'intérêt comme étant un attribut d'un point du réseau de base du système.

La technique de référence linéaire représente une position sur une entité linéaire en fonction d'une distance sur cette ligne depuis une origine fixée. La caractéristique linéaire d'une ligne de train permet ainsi de situer facilement un train selon une

position sur la ligne, donc d'une seule dimension, au lieu de la position originale longitude-latitude en deux dimensions. La figure 4.8 présente la ligne à l'étude, Montréal-Dorion, et une représentation schématique linéaire ayant pour position d'origine (mile 0) la gare centre-ville et comme position finale (mile ~40) la gare Rigaud. La méthode de référence linéaire consiste brièvement à utiliser un SIG pour associer chaque position xy à une position linéaire sur une entité géographique de type ligne représentant le tracé de la ligne de train de banlieue ou de la route (Quiroga, 1997).

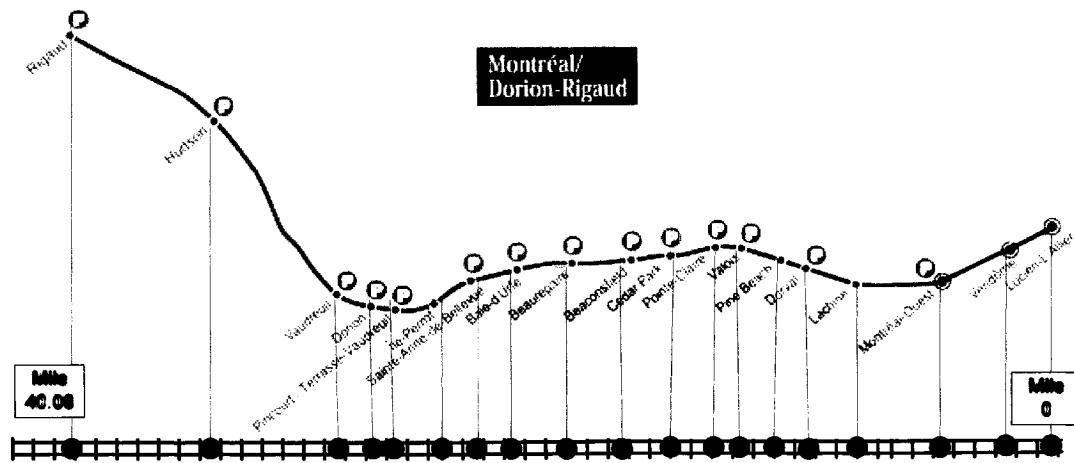


Figure 4.8 Passage d'une position latitude-longitude à une référence linéaire.

La référence linéaire découle directement des algorithmes dits de « map matching ». Un tel algorithme tente d'identifier la route prise par une entité attachée à un récepteur GPS (Marchal, Axhausen, 2005). Pour y arriver, la représentation du réseau en nœuds, liens ou polygones de la carte de base est combinée à un flot de positions GPS. À titre d'exemple, la figure 4.9 illustre la représentation d'un segment de route AB que l'on a décalé pour illustrer une route à deux voies opposées. Les distances entre les points Q, Q1 et Q2 et les segments sont représentées et calculées comme suit (Lin, Zeng, 1999):

$$D_t = \sqrt{(x_{ut} - x_b)^2 + (y_{ut} - y_b)^2} + \sqrt{(x_{dt} - x_b)^2 + (y_{dt} - y_b)^2} - \sqrt{(x_{ut} - x_{dt})^2 + (y_{ut} - y_{dt})^2}$$

Où (x_i, y_i) représente le point GPS, (x_m, y_m) et (x_n, y_n) les coordonnées des nœuds aux extrémités du segment i . L'approche consiste à identifier à priori le segment le plus près, mais aussi à considérer le point comme élément d'un chemin et en considérant seulement les prochains chemins accessibles selon la topologie du réseau.

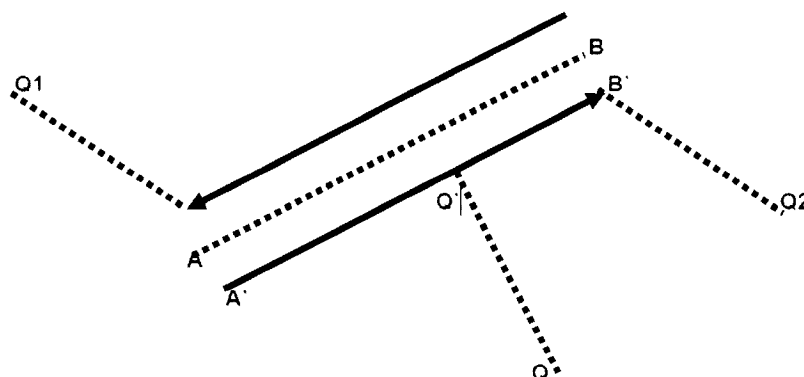


Figure 4.9 Distance entre un point et une ligne

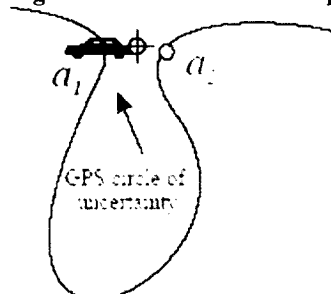


Figure 4.10 Exemple d'erreur probable lors d'un "map matching"

La figure 4.10 illustre le problème principal retrouvé lors de la réalisation d'un « map-matching ». En effet, non seulement le format du réseau doit être unifié au format des données GPS, mais de plus, les erreurs inhérentes à l'utilisation d'un récepteur GPS peuvent mener à l'association erronée d'un point à un lien. Plusieurs recherches portent sur ces problèmes, mais les propriétés d'un rail de train minimisent ce genre d'erreur et l'utilisation d'algorithmes simples reste satisfaisante.

La présente recherche a exploité les fonctionnalités du logiciel *GeTT* pour réaliser la référence linéaire, celui-ci implémentant les principes énoncés ci-haut (Quiroga, Perez, 2002).

4.3 Présentation et visualisation

La représentation d'information spatio-temporelle et thématique est une tâche très complexe (Neumann, 2005). Pour y arriver, l'interface usager graphique (GUI) permet d'extraire et de représenter une information multidimensionnelle dans un contexte interactif. La visualisation en transport constitue donc un élément d'intérêt et de pertinence pour une analyse de transport (Chapleau, 2004).

4.3.1 Navigation spatiale, temporelle et thématique

La navigation visuelle de l'espace informationnel représente une fonctionnalité clé d'un visualisateur. L'espace, le temps et les thèmes représentent les trois concepts principaux lors d'une modélisation informationnelle et la navigation s'oriente selon ces trois axes (Neumann, 2005).

- La navigation spatiale en deux dimensions comprend a priori des fonctionnalités d'agrandissement et de déplacement. L'ajout d'une troisième dimension complexifie le processus de navigation, celui-ci s'effectuant souvent dans un style « flyby » tel le vol d'un oiseau. La navigation spatiale s'effectue de manière discrète ou continue. De plus, on distingue les agrandissements sémantiques et physiques.
- La navigation temporelle se réalise par des variations de la dimension spatiale ou thématique. Pour y arriver, des contrôles linéaires, des barres de défilement, des lignes temporelles offrent la possibilité de faire varier le temps. Les lignes temporelles sont de puissants outils alliant navigation et visualisation.
- La navigation thématique représente la visualisation de l'organisation de l'information. L'arbre hyperbolique (figure 4.11), la carte (figure 4.12) ou même la



Figure 4.13 Carte de nouvelle récursive (Neumann, 2005)

Au niveau de la visualisation spatio-temporelle des données GPS, mentionnons que quelques logiciels tentent d'exploiter la navigation temporelle et même quelques représentations statistiques interactives. *GPSTrackMaker*, *GoogleEarth*, *Training Center* et quelques autres possèdent des fonctionnalités d'animation et/ou de navigation permettant de visualiser l'évolution spatio-temporelle de la trace GPS, permettant aussi d'apprécier d'autres statistiques, telle la vitesse, l'élévation ou autre. La figure 4.14 illustre un exemple de visualisation de données GPS avec possibilité de réaliser une animation simple par déplacement de caméra dans *GoogleEarth*.

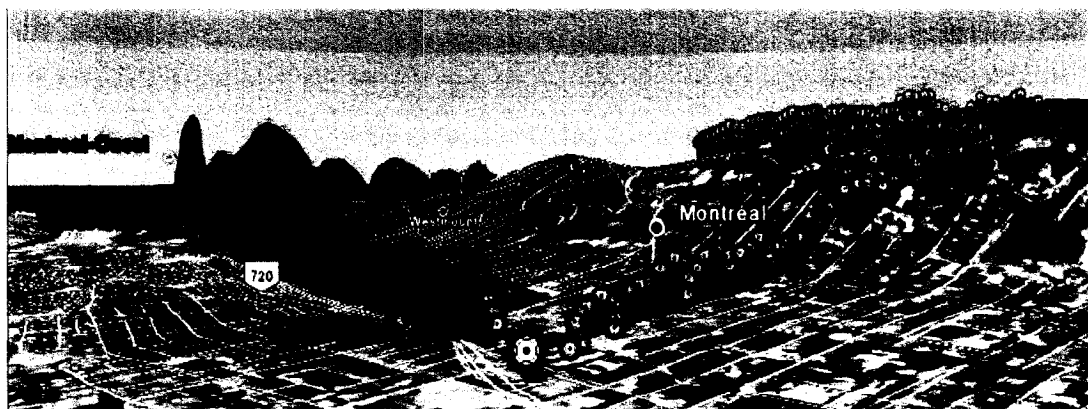


Figure 4.14 Représentation de plusieurs profils de vitesse dans Google Earth.

4.3.2 Modèles numériques de terrain

En plus des représentations découlant d'une navigation interactive, des représentations multidimensionnelles de phénomènes et statistiques en transport sont développées pour représenter des profils de charges, des lignes de désirs, des affections de déplacements, etc (Chapleau, 2004). Les cartes chloroplètes, les modèles numériques de terrains, les modèles 3D et les faces de Chernoff constituent des exemples d'acquis quant à la représentation d'un tissu informationnel complexe. Dans cet optique, cette recherche applique un effort particulier à développer des représentations visuelles originales et spécialement via les modèles numériques de terrain.

L'élaboration d'un système de visualisation en temps réel, interactif, multidimensionnelle (4D) pour des fins de contrôle et d'information aux usagers représente un défi actuel et a fait l'objet d'une récente publication (Pack, Weisberg, Bista, 2005). Il est constaté que la plupart des systèmes d'information aux usagers et de gestion du trafic fonctionne toujours à l'aide de cartes en 2D et de codes de couleur. De plus, les plans traditionnels, les profils et les diagrammes transversaux ne permettent pas d'apprécier pleinement le potentiel des données spatialisées. Provenant notamment de l'industrie du jeu vidéo, les environnements graphiques gagnent une 3ième dimension et évoluent dans le temps de manière animée. La visualisation 4D qui en découle est déjà largement utilisée dans le monde de la simulation mais très peu dans le monde de l'exploitation du réseau de transport et de l'information aux usagers.

Par l'intégration d'un modèle numérique de terrain, de la modélisation du réseau routier et des données de trafic et d'incidents en temps réel, le programme présenté dans cette publication simule les conditions routières et les incidents. Le résultat net est une représentation graphique beaucoup plus proche de la réalité tel qu'illustré à la figure 4.16.

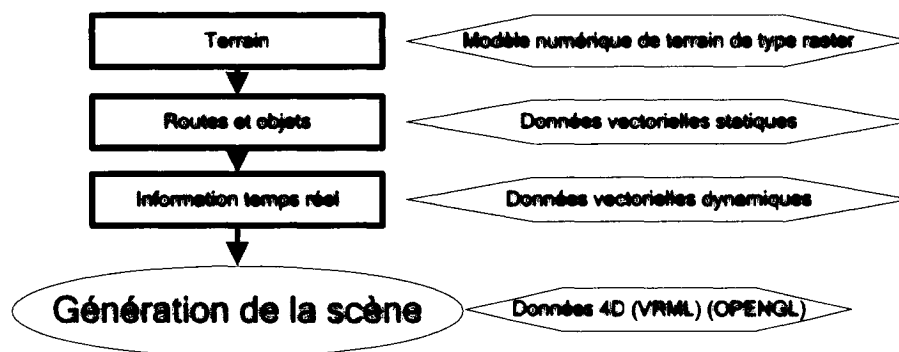


Figure 4.15 Intégration des données pour réaliser un environnement 4D interactif (Inspiré de (Pack, Weisberg, Bista, 2005))

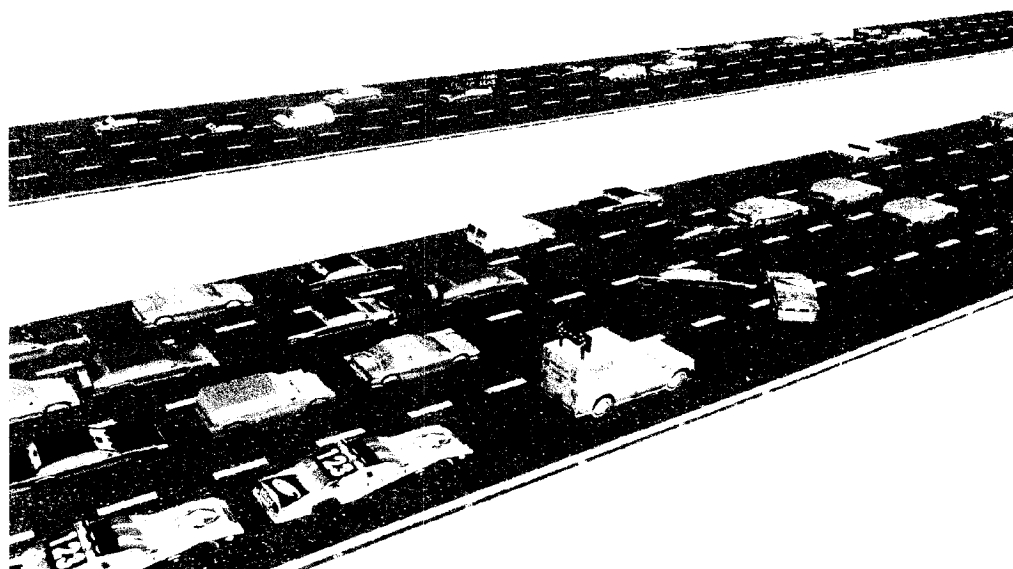


Figure 4.16 Rendu 4D temps réel d'un accident à 2 véhicules bloquant 2 lignes de trafic avec 3 véhicules d'urgence sur les lieux (Pack, Weisberg, Bista, 2005).

L'intégration de différentes couches d'objets dans un environnement 3D est expérimentée dans le cadre de la présente recherche. À cet effet, le logiciel *Virtual Terrain* permet l'intégration d'un modèle numérique de terrain, de données vectorielles 3D (Shapefiles 3D), d'objets 3D (édifices) et permet une animation au niveau du déplacement de la caméra. Le résultat à la figure 4.17 illustre le déplacement de deux autobus (vert et bleu) et l'embarquement à deux arrêts d'un usager (rouge). L'élévation (Z) représente la dimension temporelle. La projection (en jaune) de l'embarquement sur le terrain de la STO permet d'identifier les arrêts empruntés.

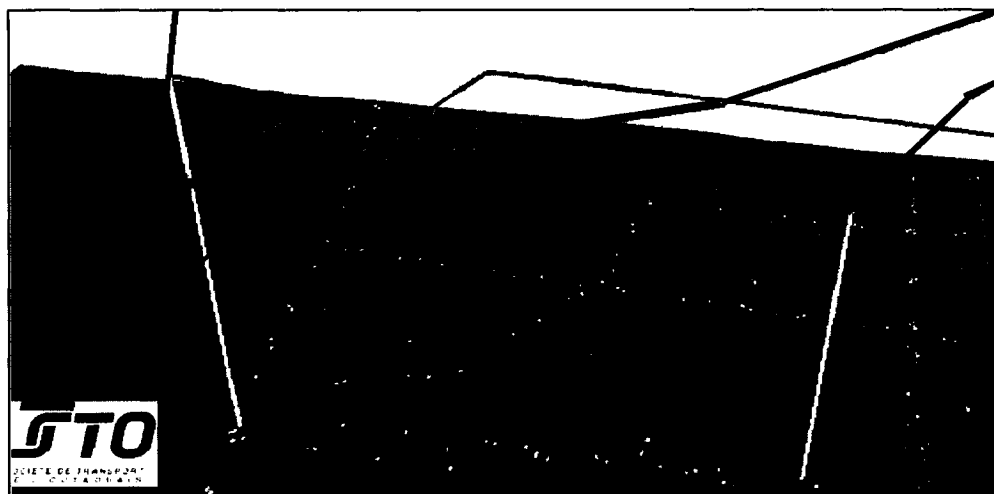


Figure 4.17 Représentation 3D du réseau de la STO incluant un modèle numérique de terrain et des objets vectoriels 3D représentant deux trajets d'autobus et deux embarquements

L'application de méthodes originales de visualisation à des phénomènes transport fait l'objet d'expérimentations constantes. Les formes, la couleur, les 3 dimensions spatiales, les cartes colorées, les largeurs et les textures deviennent tous des éléments permettant d'apprécier une facette ou une dimension du problème, comme illustré à la figure 4.18(Cao, Chapleau, 2006).

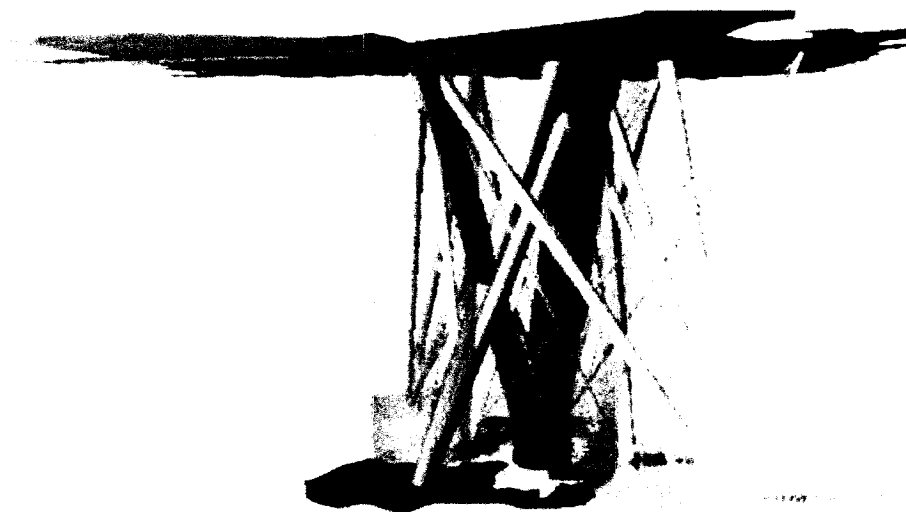


Figure 4.18 Utilisation originale de l'espace, la couleur, la forme, la taille, etc, pour représenter une matrice OD(Cao, Chapleau, 2006).

4.3.3 Documentation de graphiques techniques

Les bases de données provenant de récepteurs GPS contiennent souvent une quantité phénoménale d'enregistrements. Une solution possible pour la représentation de telles données dans un contexte spatial, semi spatialisé ou géostatistique est de laisser tomber toute information attachée à un relevé de position pour en conserver seulement le temps, la position et la vitesse par exemple (Quiroga, Bullock, 1998). L'autre possibilité est d'éliminer des enregistrements pour conserver seulement un sous-ensemble, par exemple à certaines positions stratégiques, ou selon un certain intervalle de temps. Par contre, ce genre de solution nous ramène rapidement vers la résolution offerte par les techniques traditionnelles d'enquête, dissipant ainsi tout le potentiel d'un haut niveau de résolution de l'information. Dans ce mémoire, l'effort de conserver un niveau de détail élevé mène à la visualisation de sous-ensembles d'informations complexes et volumineux. Cette section définit quelques règles appliquées pour la documentation de ces figures.

De manière générale, une table ou un graphique doit comprendre (Axhausen, 2000):

- La description de l'ensemble de données.
- La sélection des variables.
- La sélection des formats, classifications et catégorisations utilisées.
- La description du filtre.

La figure 4.19 décrit un ensemble non exhaustif d'éléments susceptibles de caractériser un graphique technique provenant d'une base de données.

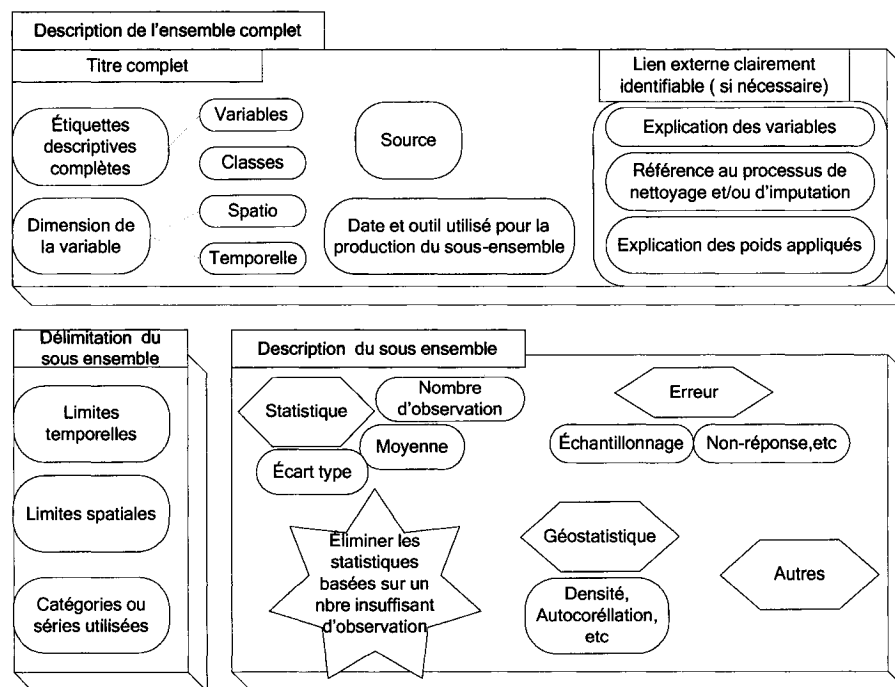


Figure 4.19 Éléments de caractérisation d'un ensemble de données pour fin de visualisation

La description des graphiques utilisés dans cette recherche respecte donc un canevas identifiant au moins le sous-ensemble utilisé ainsi que quelques statistiques descriptives validant la représentation. La figure 4.20 illustre un exemple incluant les composants normalement attendus : le titre, les axes, la délimitation des axes, les catégories utilisées, les dates, les statistiques ainsi que la légende.

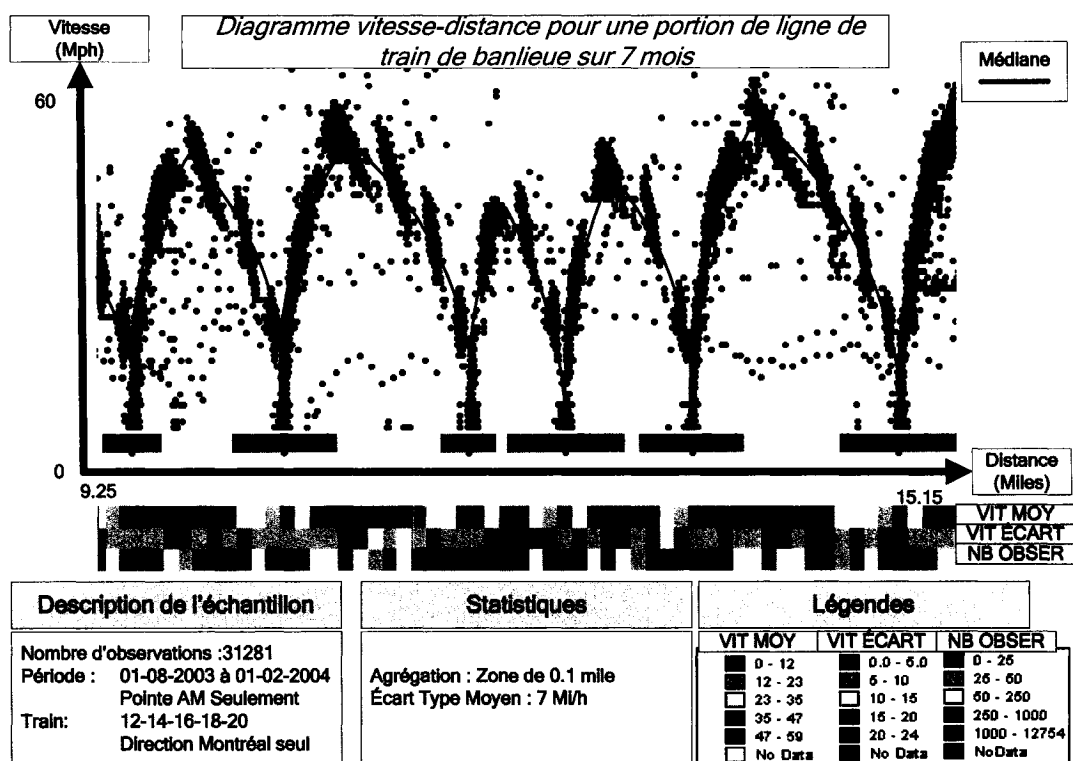


Figure 4.20 Exemple de description technique d'un graphe construit à partir d'un SIG

Chapitre 5. Caractérisation de la ligne et indicateurs de performance

Les prochains chapitres intègrent les éléments provenant de la revue de littérature, soit l'étude de la dynamique et de la performance d'un système de transport, l'exploitation d'un historique de données de localisation GPS et les techniques de représentations spatiales du phénomène. Le tout est appliqué à une ligne de train de banlieue de la région de Montréal. Ce chapitre présente la ligne de train à l'étude, les données recueillies et la méthodologie pour le calcul des temps de parcours. De plus, il décrit l'ensemble des éléments dérivés caractérisant la dynamique de la ligne. L'approche retenue consiste à décrire les expérimentations réalisées en assurant un suivi de la cristallisation informationnelle à l'intérieur de la base de données.

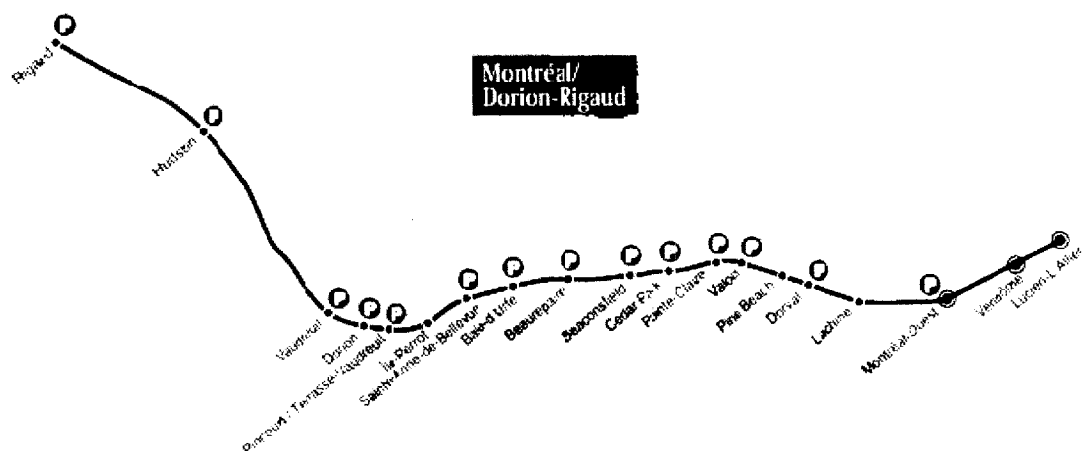


Figure 5.1 Ligne Montréal - Rigaud (AMT)

L'étude se base sur des données provenant de l'exploitation de la ligne de train de banlieue Montréal-Rigaud, opérée par l'AMT. Anciennement une des deux lignes du réseau exploité par la STM, elle dessert l'ouest de l'île de Montréal et la banlieue ouest. Il s'agit de la deuxième ligne la plus achalandée, mais affiche un taux de ponctualité de 95.2%, se classant 4^e sur les 5 lignes actuelles (AMT, 2006). Elle est composée de 19

gares dont deux, Hudson et Rigaud, desservies qu'une seule fois par jour. Douze départs sont offerts par jour de semaine vers Montréal et treize en direction de Rigaud.

5.1 Préparation des données

5.1.1 Données originales

La base de données originale contient les relevés de positionnements provenant de receveurs GPS installés sur l'ensemble des locomotives régulières de la ligne Montréal-Rigaud. Douze locomotives génèrent un relevé GPS environ toutes les 25 secondes lorsque le moteur fonctionne. Sur une période s'échelonnant entre le 6 août 2003 et le 28 juin 2004, plus de 2 354 066 positions furent transmises au centre de contrôle de l'AMT pour être traitées, puis archivées. Le traitement informationnel réalisé par un système *Mapinfo* ajoute aux données habituelles de temps, position, vitesse et azimuth, des données calculées comprenant une position relative aux balises virtuelles de la ligne, une estimation du numéro train et une estimation du retard. Le tableau 5.1 décrit en détail les champs contenus dans la base de données originale. L'objectif de cette recherche étant d'exploiter les données les plus pures possibles, aucun champ calculé par le système *MapInfo* n'est utilisé à l'exception du numéro de train. En effet, l'assignation d'un numéro de train à un relevé GPS sort des objectifs fixés pour cette recherche. La base de données fournie se présente sous format *Microsoft Access*. Ce système est aussi utilisé comme base informationnelle et outil de traitement (VBA) pour l'ensemble de la recherche.

Tableau 5.1 Description des champs de la base de données originale (Les champs conservés pour cette recherche en gris)

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Type	Description
UID	587852	712881	Long Integer	original	Clé primaire de l'enregistrement
LogDate	20031006	20040130	Long Integer	original	Date d'enregistrement du relevé
Modem	1322	1323	Text	original	Identificateur du récepteur GPS
NoTrain	15	26	Text	calculé	Numéro de train assigné
Ligne	1	1	Byte	calculé	Numéro de ligne
NomChkpt	Gare Montréal-Ouest	Sainte-Anne/Baie-d'Urfé 1	Text	calculé	Nom de la balise virtuelle la plus près
Chkpt	FALSE	FALSE	Yes/No	calculé	Balise virtuelle représentant une gare
HrPlan	12:42:00 PM	5:00:17 PM	Date/Time	calculé	Heure planifiée
HrGPS	12:41:27 PM	5:01:38 PM	Date/Time	original	Heure locale fournie par le GPS
Avance	0:00:38		Date/Time	calculé	Avance calculée
Retard		0:00:46	Date/Time	calculé	Retard calculé
Longitude	-73.63505	-73.946	Single	original	Longitude
Latitude	45.46717	45.40931	Single	original	Latitude
Vit	33	35	Integer	original	Vitesse déterminée par le GPS (mi/h)
Azimat	234	85	Integer	original	Direction
PosInterp	2	1 01437	Single	calculé	Position du train selon l'échelle linéaire
De	61	34	Byte	calculé	Identificateur de balise virtuelle d'origine
Au	61	34	Byte	calculé	Identificateur de balise virtuelle d'arrivée
Ordre	267	138	Integer	calculé	Ordre de cédule

L'analyse des enregistrements démontre que le déclenchement d'un relevé de position est basé sur deux règles :

- Une fréquence de relevés de 24 ou 25 secondes.
- Un événement d'accélération et de décélération lorsque la locomotive franchit le cap des 3 mi/h.

5.1.2 Traitements préliminaires

L'archivage de relevés GPS s'effectuant en continu lorsque le moteur est en marche, il en résulte d'importants blocs d'informations décrivant des déplacements morts ou des immobilisations de longue durée en garage et gare de triage. Les relevés GPS ne pouvant être associés à un train portent la mention « terminé » dans le champ *NoTrain*. Un premier filtrage consiste donc à éliminer ces enregistrements ne qualifiant pas directement le service offert. De ce fait, plus de 53% des enregistrements sont écartés de la base de données originale sans aucune perte d'information sur le service offert.

Par la suite, l'application d'une méthode de référence linéaire permet d'ajouter deux champs à la base de données : une position linéaire le long de ligne de train et une

distance de décalage entre la ligne de train et le relevé GPS. Le logiciel *GeTT* développé par Quiroga offre cette possibilité à partir d'une base de données *Access* correctement organisée contenant les points GPS et la définition du réseau sous une forme particulière du *Shapefile* d'*ESRI*, soit une polyligne M (Quiroga, Perez, 2002).

À l'aide du nouveau champ représentant le décalage (*offset*), une deuxième étape élimine les enregistrements trop éloignés de la ligne de train résultant de :

- Une erreur majeure de positionnement. La précision ordinaire est de 15 mètres.
- Un relevé erroné indiquant (0,0) pour la longitude latitude.
- Un relevé exact, mais provenant d'un train quittant la ligne principale pour se rendre en gare de triage ou garage.

Compte tenu de l'erreur normale du récepteur et du léger décalage potentiel entre la représentation virtuelle de la ligne sous format vectoriel et le tracé réel de la ligne, les points éloignés de plus de 0.01 mile sont filtrés. La base de données résultante au tableau 5.2 comprend donc maintenant 1 091 299 enregistrements linéarisés et formatés pour les calculs subséquents.

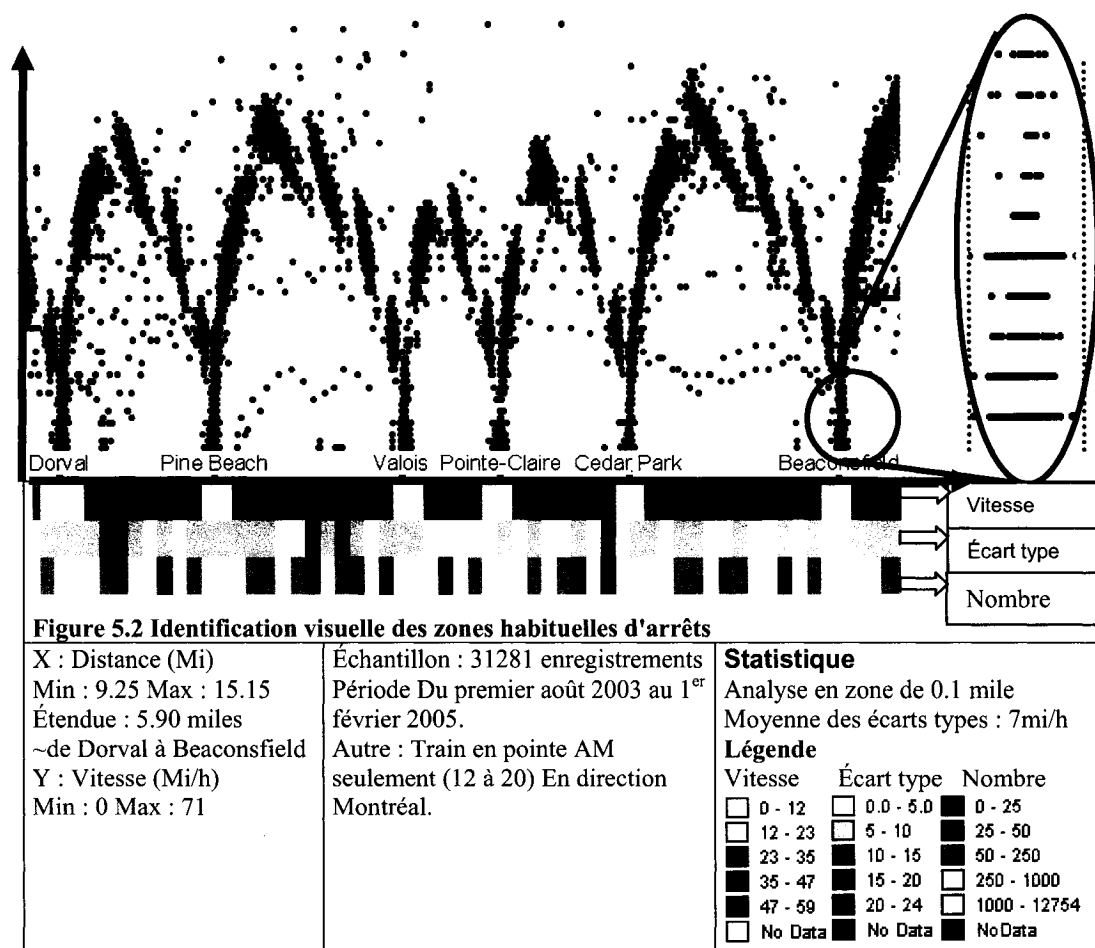
Tableau 5.2 Base de données traitée (Champs additionnés en gris)

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Description
ID	41309	778296	Long Integer	Clé primaire de l'enregistrement
Modem	1320	1327	Text	Identificateur du récepteur GPS
NoTrain	19	22	Text	Numéro de train assigné
CollectionDate	08/06/03	03/26/04	Date/Time	Date d'enregistrement du relevé
CollectionTime	15:08:38	11:19:25	Date/Time	Heure d'enregistrement du relevé
Longitude	-73.57256317	-73.95030975	Number	Longitude
Latitude	45.49319077	45.40790176	Number	Latitude
Speed	16	1	Long Integer	Vitesse en mi/h
Measure	0.2043917	20.19704	Number	Position linéaire en mille
Offset	4.64014E-05	4.56528E-06	Number	Décalage en mille
GPSFileID	73	73	Long Integer	Identificateur de fichier pour GeTT
RouteID	RigaudO	RigaudO	Long Integer	Identificateur de tracé pour GeTT

5.2 Procédures de calcul de temps de parcours

5.2.1 Segmentation

Le calcul de temps de parcours et de l'heure de départ est basé sur une segmentation virtuelle de la ligne de train. La segmentation délimite les zones de gares et autorise l'identification des arrêts du train et des zones d'origines et de destinations sur la ligne. L'utilisation d'un SIG pour représenter des données semi-spatialisées dans un diagramme vitesse espace permet de déceler un profil d'une très grande régularité (figure 5.2). Ce diagramme est la base de la méthodologie visuelle utilisée pour effectuer la segmentation. Le profil de vitesse permet d'identifier rapidement les zones d'arrêts. Appuyée par une agrégation en zone de 0.1 mile suivie d'une analyse de densité et de vitesse moyenne par zone, une codification des limites de chaque zone potentielle d'arrêt est réalisée. Ces zones virtuelles peuvent ensuite être associées à un identificateur de gare réel. De plus, cet examen démontre qu'une gare peut être segmentée en plusieurs zones d'arrêts virtuelles différentes selon la direction ou la présence d'aires d'attente ou d'aiguillages aux abords du quai. En élargissant de 20 mètres chaque zone d'arrêt, on maximise la possibilité de détecter un arrêt dans cette zone malgré les erreurs potentielles provenant du GPS. Au total, une série de 34 zones d'arrêt de largeurs variant entre 80 et 330 mètres est déterminée et associée aux 19 gares réelles de la ligne.



Suite à cette segmentation visuelle, une nouvelle table de description des zones est ajoutée à la base de données.

Tableau 5.3 Table contenant la codification des zones d'arrêt potentielles

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Description
ID	1	25	Long Integer	Clé primaire de la zone
Nom	Lucien-L'Allier	Dorion	Text	Nom de la gare associée
Debut	0	23 38	Number	Position du début de la zone
Fin	0 20	23 59	Number	Position de la fin de la zone
IdGen	1	17	Long Integer	Identificateur de la gare réelle associée

5.2.2 Temps de parcours

La procédure de détermination des temps de parcours est basée sur la méthode de Quiroga, qui nécessite a priori une référence linéaire des points GPS et une segmentation de la ligne. La méthode consiste ensuite à développer une procédure parcourant les points GPS en ordre temporel et déterminant le segment où se trouve la locomotive. On détermine si la locomotive effectue un arrêt sur le segment et s'il s'agit d'un segment associé à une zone d'arrêt. Dans ce cas, le point d'entrée de la zone constitue l'heure d'arrivée et le point de sortie, l'heure de départ. La figure 5.3 illustre la procédure en boucle pour en déduire les temps de parcours et délais en gare.

L'erreur maximale possible pour déterminer le temps de parcours sur le segment équivaut à la fréquence du relevé soit 25 secondes. À cela s'ajoute l'erreur GPS équivalente à environ 2 secondes si le train roule à 20 mi/h. L'erreur maximale se trouve environ à la moitié de l'ordre de grandeur habituellement utilisé, la minute. Il est à noter qu'une interpolation entre le premier point de la zone et le point précédent offre un gain de précision.

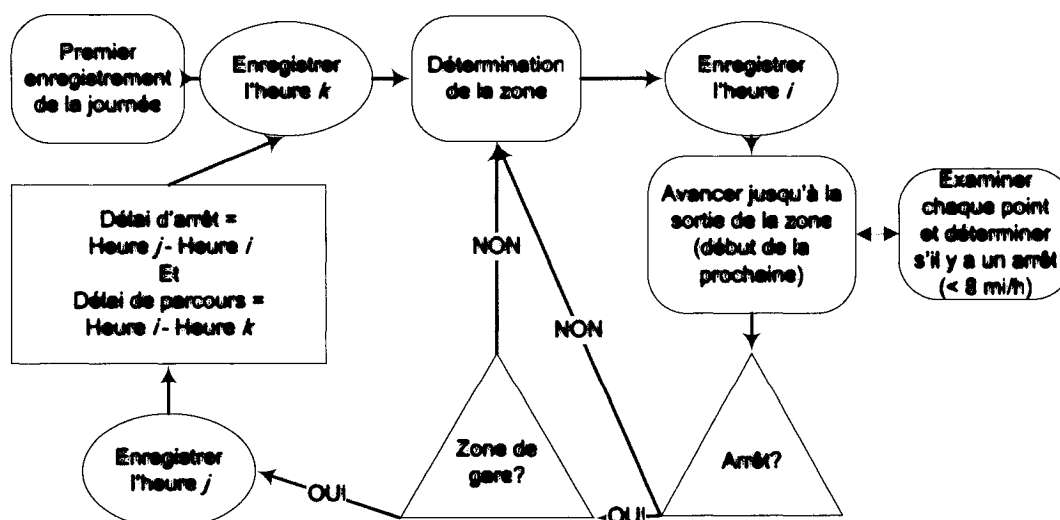


Figure 5.3 Algorithme de calcul des temps de parcours

Le résultat de cette procédure génère une table comprenant les temps de parcours et les délais en gare. Les zones d'origine et de destination sont utilisées pour identifier le parcours effectué. La valeur -1 comme destination identifie un temps d'attente en gare. Il en résulte une table de temps de parcours contenant plus de 129 945 enregistrements.

Tableau 5.4 Table des temps de parcours et des temps d'attente en gare

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Description
ID	1458048	1458145	Long Integer	Clé primaire de l'enregistrement
GareOri	19	20	Long Integer	Identificateur de la gare d'origine
GareDesti	18	-1	Long Integer	Identificateur de la gare de destination
Temps	00:01:39	00:01:38	Date/Time	Temps de parcours ou délai en gare
Date	2003-08-08	2003-08-08	Date/Time	Date
Heure	06:08:21	07:38:25	Date/Time	Heure de début de l'intervalle
Train	10	16	Text	Identificateur de train
Modem	1328	1320	Text	Identificateur du modem

5.3 Caractérisation de la ligne

Les premières analyses historiques des données permettent de décrire les composantes du système de train de banlieue décrites au chapitre 1. Dans un effort de maximiser la connaissance du système imputable à partir des données GPS, une série d'éléments descriptifs hétéroclites est dérivée des relevés de positionnements et permet de caractériser la topologie de la ligne, le service offert, les limites de vitesse, les relations dynamiques, etc.

5.3.1 Description d'une journée et d'un voyage

La figure 5.4 dépeint une journée complète de service pour un jour type sans incident de semaine. On y retrouve les périodes de pointes usuelles, les différents types de parcours et une représentation de ce qui est considéré comme un voyage. Un voyage représente la suite chronologique de parcours intergare et d'arrêt en gare entre deux terminus et portant un numéro de départ distinct. À partir de la table des temps de parcours, on retrouve pour chaque parcours intergare l'heure de départ, l'origine, le temps de parcours, la destination, l'heure d'arrivée ainsi que le temps d'attente avant le

prochain départ. On peut ainsi reconstruire chaque voyage en détail, comme par exemple celui du train 16 le 8 août 2003 au tableau 5.5.

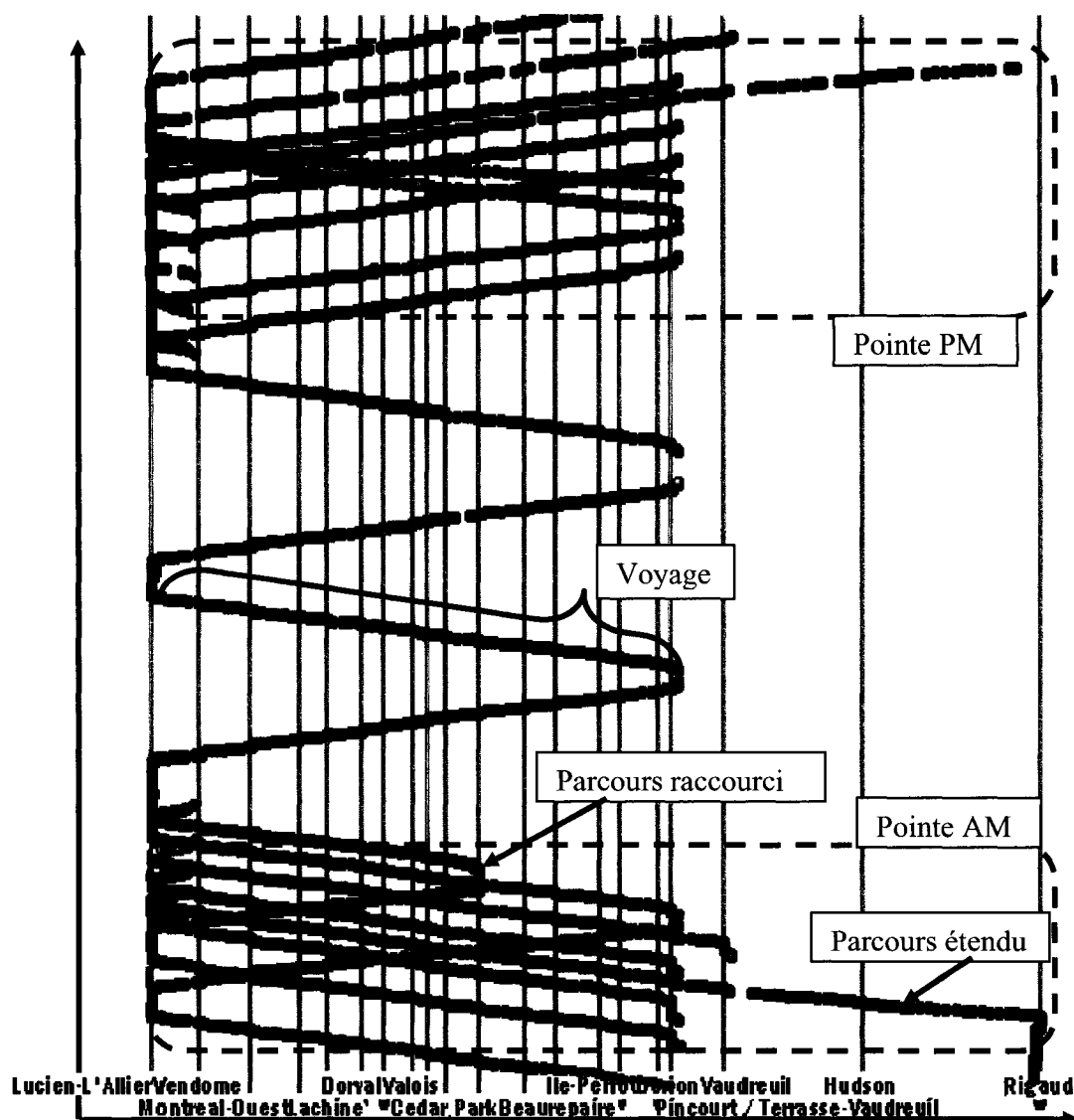


Figure 5.4 Diagramme espace temps pour une journée type (sans la soirée)

X : Distance (Mi) Min : 0 Max : 40.08 Y : Temps (Heure) Min : 5h55 Max : 19h33	Échantillon : 5033 enregistrements Date: 10 octobre 2003 Note : Tous les points reçus après filtrage	Statistiques (Journée complète) Gares : 19 Voyages (Départs) : 25 (12 vers Montréal et 13 vers Rigaud) Quantité de déplacement productif: 952 veh*km Nombre de locomotives : 12
---	--	---

Tableau 5.5 Extrait de la table sur les temps de parcours (-1 indique un temps d'arrêt en gare)

ID	GareOri	GareDesti	Temps	Date	Heure	Train	Modem
1458145	20	-1	0:01:38	2003-08-08	07:38:25	16	1320
1458154	20	19	0:02:47	2003-08-08	07:40:03	16	1320
1458155	19	-1	0:01:16	2003-08-08	07:42:50	16	1320
1458158	19	18	0:01:38	2003-08-08	07:44:06	16	1320
1458159	18	-1	0:01:03	2003-08-08	07:45:44	16	1320
1458166	18	17	0:02:25	2003-08-08	07:46:47	16	1320
1458167	17	-1	0:01:42	2003-08-08	07:49:12	16	1320
1458172	17	14	0:01:38	2003-08-08	07:50:54	16	1320
1458173	14	-1	0:00:56	2003-08-08	07:52:32	16	1320
1458174	14	13	0:01:14	2003-08-08	07:53:28	16	1320
1458175	13	-1	0:01:28	2003-08-08	07:54:42	16	1320
1458180	13	12	0:00:39	2003-08-08	07:56:10	16	1320

5.3.2 Limites de vitesse

Le diagramme position-vitesse ci-dessous illustre un exemple d'identification des limites de vitesse en vigueur à différents endroits sur la ligne. Celles-ci sont fixées selon certains paramètres de sécurité. La représentation globale du profil de vitesse permet d'identifier rapidement la zone de haute vitesse (70 mi/h) entre Hudson et Rigaud, un plafond général autour de 60 mi/h et une zone de basse vitesse (40 mi/h) plus près du centre ville.. En reprenant chaque segment de la ligne dont la vitesse maximum est uniforme et chaque segment de transition, les limites de vitesse sont codifiées dans une table *Access* en prenant soin de distinguer les deux directions. La table résultante est présentée au tableau 5.6

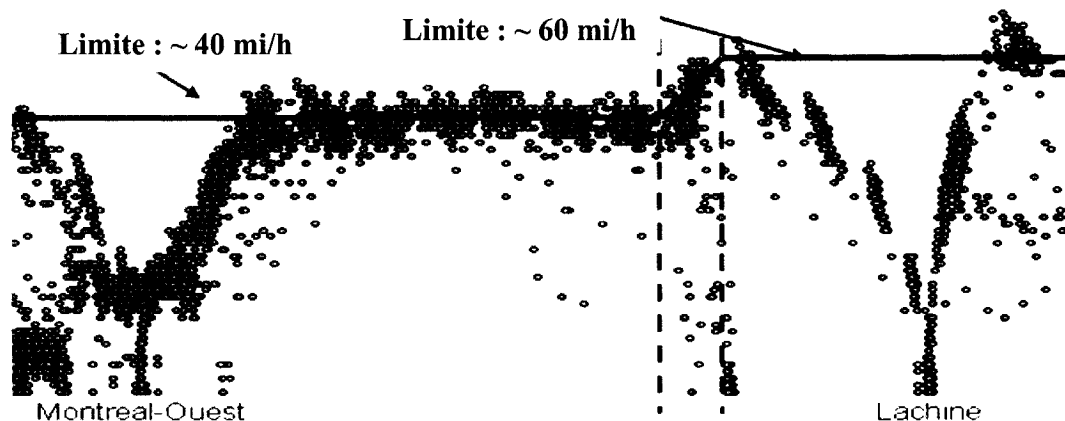


Figure 5.5 Détermination visuelle des limites de vitesse

X : Distance (Mi) Min : 4.09 Max : 8.68

Étendue : 4.59 Miles

Y : Vitesse (Mi/h) Min : 0 Max : 56

Échantillon : 7169 enregistrements.

Période : Du 1^{er} août 2003 au 1^{er} mai 2005.

Autre : Train 112 seulement.

Tableau 5.6 Table contenant la codification des limites de vitesse

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Description
Zoneld	14	24	Long Integer	Clé primaire
Debut	7	29.09	Number	Position linéaire du début de la zone
Fin	14.75	29.5	Number	Position linéaire de la fin de la zone
vMaxDeb	50	54	Long Integer	Vitesse maximale à l'entrée de la zone
vMaxFin	50	58	Long Integer	Vitesse maximale à la sortie de la zone
Direction	0	0	Text	Direction Est ou Ouest

5.3.3 Profil d'élévation

L'accélération des trains étant fortement sensible à la pente, l'étude sommaire de l'élévation sur la ligne est analysée à l'aide des modèles numériques de terrain. La figure 5.6 illustre les régions montagneuses des environs ainsi que le tracé de la ligne. Le profil d'élévation démontre qu'une dénivellation d'environ 40 mètres existe, mais sur plusieurs kilomètres. De ce fait, aucune corrélation notable entre le profil de vitesse et la pente de la voie ferrée n'ayant pu être découverte. À noter que l'élévation est dérivée des MNT provenant de GéoBase (COCG, 2006) plutôt que du relevé GPS directement, l'élévation provenant des receveurs GPS étant d'une précision insuffisante. Par exemple, on retrouve des variations d'élévation de plusieurs dizaines de mètres sans même se déplacer.

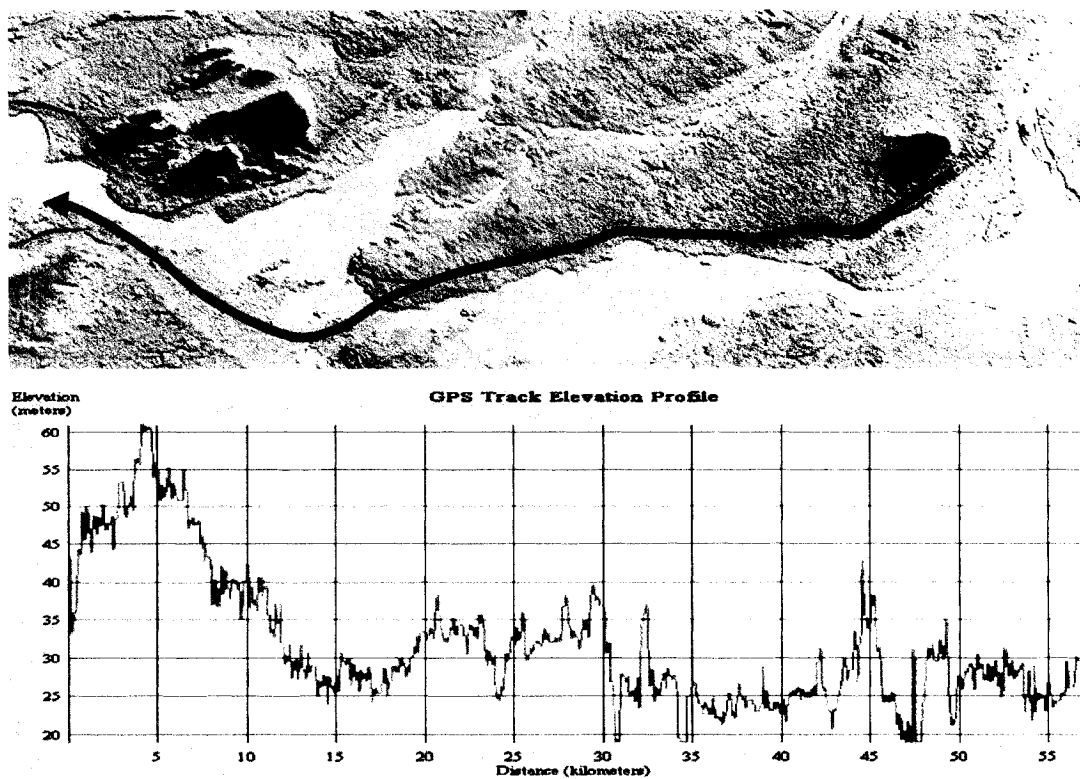


Figure 5.6 Profil d'élévation de la ligne

5.3.4 Type de parcours

Certains trains que l'on peut qualifier d' « express » sont planifiés de manière à ne pas s'arrêter dans certaines gares. L'analyse du profil de vitesse à la figure 5.7 illustre un parcours express. Il en est déduit que les trains express ne ralentissent pas dans les gares où aucun arrêt n'est prévu. Au contraire, la distance intergare étant plus grande, la vitesse maximale atteinte est plus élevée. Évidemment, ces résultats se traduisent dans notre table des temps de parcours par des paires OD non régulières, mais celles-ci ne doivent pas être considérées comme des enregistrements erronés ou hors service.

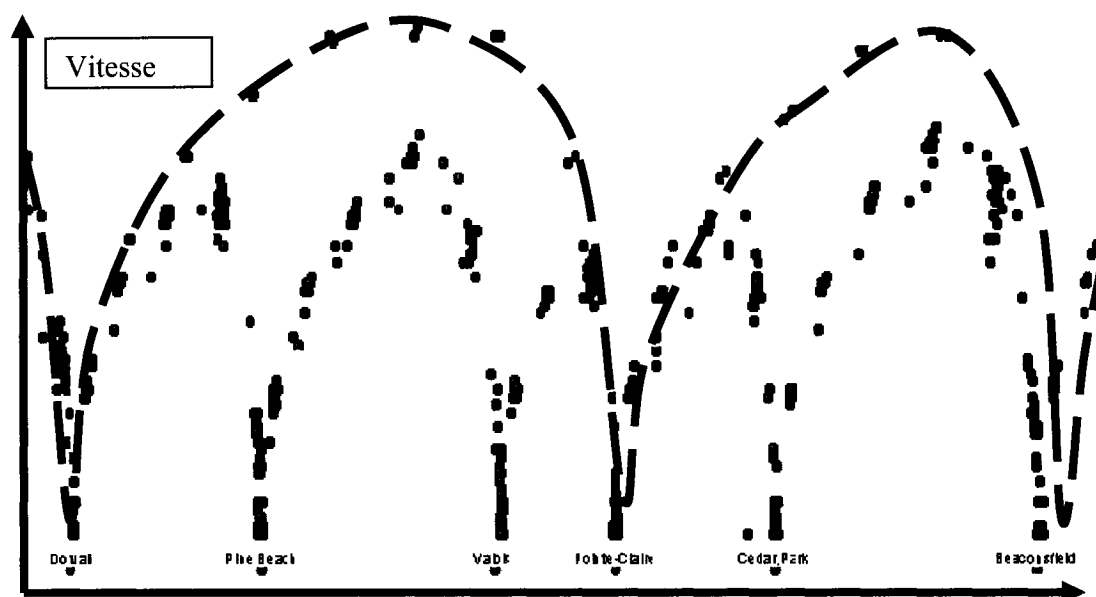


Figure 5.7 Diagramme vitesse position illustrant la différence entre un trajet normal et un trajet express

De plus, l'horaire prévoit un parcours aller-retour tous les jours de semaine vers deux gares éloignées, Hudson et Rigaud. Encore une fois, ces enregistrements peuvent paraître non réguliers, mais constituent des résultats attendus. Le tableau 5.7 recense l'ensemble des types de parcours retrouvés sur une base hebdomadaire. L'horaire est identique pour chaque jour de la semaine et diffère pour le samedi et le dimanche.

Note* : Pour le parcours régulier, les temps de parcours planifiés sont identiques dans les deux directions à l'exception de 2 départs les jours de semaine où le temps de parcours est de 1 :03 :00.

Tableau 5.7 Distribution des différents types de trajet.

Nombre de départ par semaine	Direction	Type	Nombre de Stations	Distance (mi)	Temps de Parcours Planifié
109	E/O	Régulier	17	23.4	1:00*
5	E	Étendu	19	40.08	1:30
5	O	Étendu	19	40.08	1:38
5	O	Raccourci	11	23.4	0:50
5	O	Express	7	10.3	0:30
5	E	Express	10	10.3	0:40
5	E	Raccourci	11	23.4	0:50

5.3.5 Temps d'attente en gare

L'analyse des temps d'attente en gare permet d'identifier non seulement les temps moyens d'embarquement et de débarquement, mais aussi les temps d'immobilisation en gares terminales ou en zones d'attentes. La figure 5.8 illustre un modèle numérique de terrain représentant les délais en gare. Les temps d'attente en gare sont très constants dans le cas des gares non terminales. Par contre, les temps d'attente dans les gares terminales sont plus importants, mais moins significatifs puisque qu'ils sont considérés comme hors service. À noter que les gares de Rigaud, Dorion et Beaconsfield jouent parfois le rôle de terminus. Déjà, on voit apparaître quelques incidents par des pointes irrégulières. Ces cas particuliers font l'objet du prochain chapitre. Une analyse statistique des temps d'attente démontre que le temps d'attente moyen pour les gares non terminales après élimination des valeurs extrêmes est de 1 minute 8 secondes.



Figure 5.8 Temps d'attente en gare

X : Distance (Mi) Min : 0 Max : 40
 Étendue : 4.59 Miles
 Y : Date (jour par jour)
 Min : 7 août 2003 Max : 30 mars 2003
 Z : Temps d'arrêt en gare (S)

Échantillon : 2888 enregistrements.
 Moyenne : 1 min 9 sec
 Médiane : 1 min 6 sec
 Période : Du premier août 2003 au 1^{er} mai 2005. Train 112 seulement.

5.3.6 Détermination du profil régulier de vitesse

Le profil de vitesse d'un train entre deux gares est composé de trois phases :

- L'accélération est la première phase du parcours et permet d'atteindre le plus rapidement possible la vitesse maximum permise. La figure 5.9 illustre le profil d'accélération sur le premier mille en quittant une gare. On remarque qu'une distance d'environ 0.6 mile (~1 km) est nécessaire pour atteindre le plateau de 50 mi/h (80 km/h). Généralement, les variations d'accélération (« jerk ») maximums doivent être limitées pour des raisons de confort.

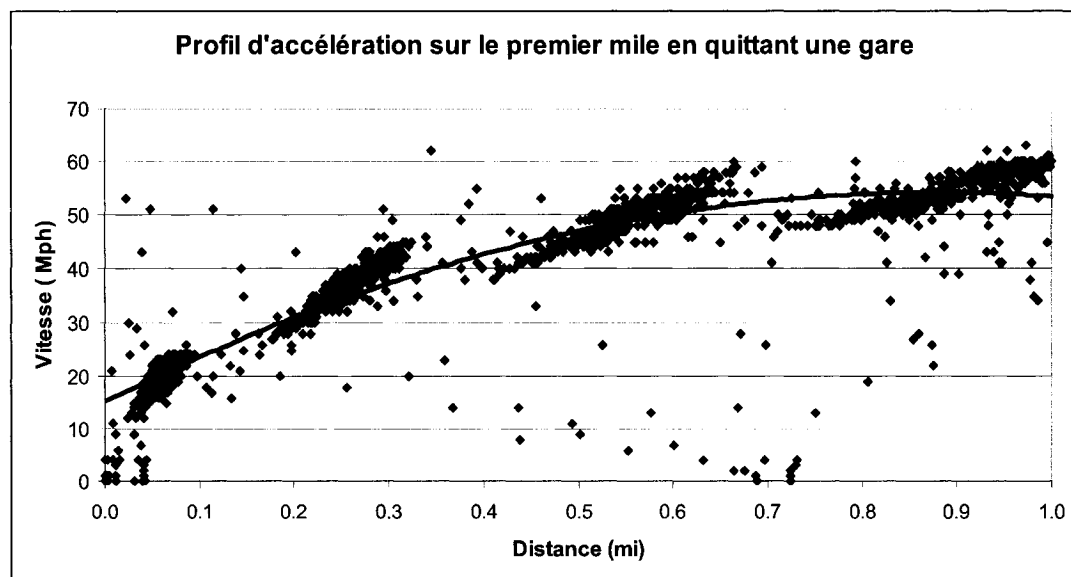


Figure 5.9 Profil d'accélération sur le premier mille en quittant la gare Beaurepaire

X : Distance relative (Mi)	Échantillon : 2807 enregistrements	Statistique
NB : Distance du centre-ville	Période Du premier août 2003 au	Régression
Min : 15.74 Max : 16.74	1 ^{er} février 2004	$y = -50.423x^2 + 88.63x + 15.215$
Étendue : 1 Mile	Autre : Train en pointe AM	$R^2 = 0.8566$
Y : Vitesse (Mi/h)	seulement (12 à 20) En direction	
Min : 0 Max : 63	Montréal.	

- Le régime de vitesse constante est atteint lorsque l'accélération approche 0. La durée de ce régime dépend de la distance. Pour une distance courte d'environ 2 km et moins, elle n'est même pas atteinte. La figure 5.10 illustre un profil

d'accélération très régulier comprenant les trois phases du parcours. Les véhicules sur rail possèdent aussi le régime de libre roulement où la vitesse diminue très lentement.

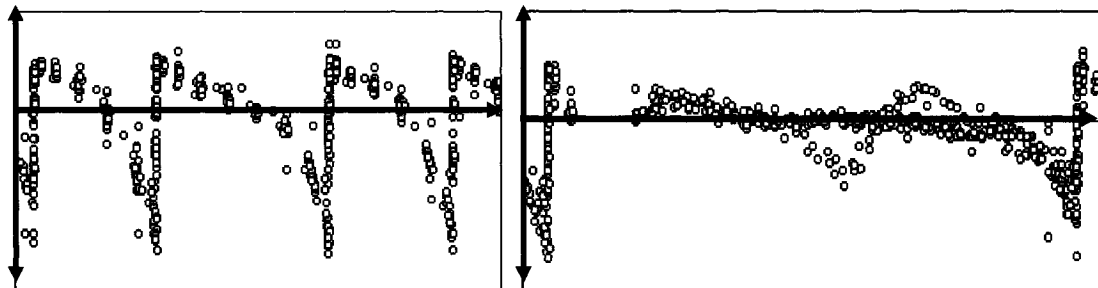


Figure 5.10 Accélération en fonction de la distance – courte distance (gauche) et longue distance (droite)

- Le ratio $\frac{accel_{max}}{decel_{max}} \approx \frac{1}{2}$ explique la différence importante des distances d'accélération par rapport aux distances de freinage. La décélération se réalise généralement dans les 400 mètres précédant une gare.

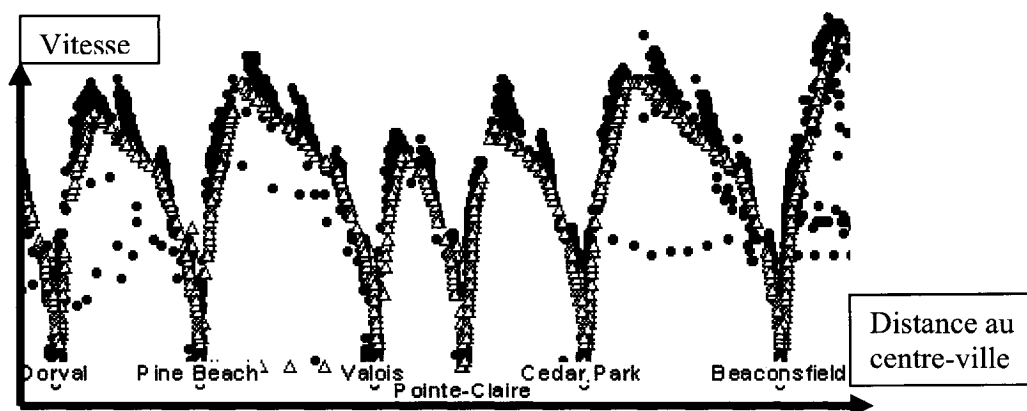
L'analyse du profil d'accélération démontre une régularité dans l'accélération en quittant la gare de même qu'en décélération en arrivant en gare. Ce phénomène peut donc être caractérisé par certaines équations tirées de la physique dynamique. Les équations les plus simples utilisent une accélération constante : $\Delta x = v_{ave} t$ avec $v_{ave} = \frac{1}{2}(v_0 + v)$ et $t = \frac{v - v_0}{a}$. Cette simplification ne permet pas de bien représenter la courbe de vitesse réelle et les régressions de second degré n'offrent pas en tous points la qualité souhaitée. La solution retenue est donc de segmenter le profil d'accélération en zones d'accélération constantes en fonction de la distance parcourue depuis la gare. À chaque segment sont associés une vitesse d'entrée et une vitesse de sortie. Le même exercice est réalisé pour la décélération en fonction de la distance précédant la gare de destination. Les résultats sont présentés au tableau 5.8.

Tableau 5.8 Vitesses attendues à différentes distances de la gare selon le départ ou l'arrivée en gare

Zone	Accel/Décel	Début (mètres)	Fin (mètres)	Vdeb(mi/h)	Vfin (mi/h)
1	Accel	0	161	0	19
2	Accel	161	467	19	33
3	Accel	467	1900	33	54
4	Accel	1900	2542	54	59
5	Décel	0	128	0	22
6	Décel	128	700	22	59

La fusion de l'accélération et la décélération segmentée avec la table contenant les limites de vitesse de la ligne admet la prédiction de la vitesse du train à toute position sur la ligne.

En calculant la distance depuis la dernière gare ainsi que la distance précédant la prochaine gare, la vitesse attendue est interpolée. La limite de vitesse à cette position de la ligne plafonne le résultat. La figure 5.10 illustre le résultat de cette procédure pour le train 112. Le profil est différent selon la direction et selon le type de trajet (express ou non). Il en découle que le calcul de la vitesse attendue nécessite une information sur la chaîne OD d'un voyage pour connaître la distance pour atteindre la prochaine gare.

**Figure 5.11 Profil de vitesse prédit (triangles blancs) et profil de vitesse réel (points noirs)**

Le profil concorde assez fidèlement avec le profil réel et permettra au chapitre 7 de détecter des variations importantes au profil normal de vitesse menant à une détection d'incidents.

5.3.7 Relation entre distance intergare, vitesse maximale et temps de parcours

La dynamique intergare du train se résume par l'analyse de trois indicateurs généraux. En effet, la relation entre la distance à parcourir, la vitesse maximale atteinte et le temps de parcours mesuré sur l'ensemble des parcours possède par définition une forte corrélation. On en déduit à la figure 5.12 une relation capable de décrire le temps de parcours à partir de la distance intergare. Les grandes distances (>4 miles) ont été omises, la relation linéaire ne tenant plus. De plus, l'ajout d'une carte colorée représentant la tendance de la vitesse maximale atteinte en fonction du temps et de la distance permet des évaluations rapides de certains phénomènes. Par exemple, on peut identifier l'effet d'une limitation de vitesse, diminution de 10 mi/h, sur le temps de parcours, augmentation de 2.5 minutes, pour une distance de 2 miles.

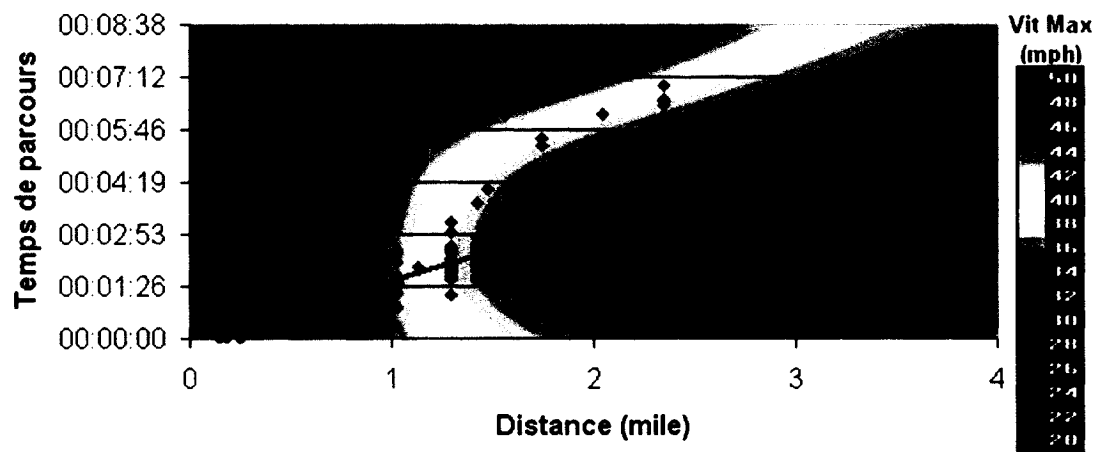


Figure 5.12 Temps de parcours en fonction de la distance intergare et représentation colorée de la vitesse maximale sur le parcours.

X : Distance parcourue (Mi)
Min : 0 Max : 4

Y : Temps de parcours
Min : 0 Max : 7 min

Échantillon :
8251 enregistrements
Période : Du premier août
2003 au 1^{er} mars 2004
Autre : Train 112 seulement

Statistique :
Régression
 $R^2 = 0.90$
Note : Ajustement relatif des
échelles de la carte colorés
et du graphique XY.

5.3.8 Effet de la période de pointe

La plupart des modèles en transport urbain distinguent les périodes de pointe des périodes creuses. Une étude préliminaire ne démontre aucune différence pour les temps de parcours entre la période de pointe et la période hors pointe. Par exemple, sur un échantillon d'environ 1000 temps de parcours pour un parcours en milieu de ligne et un parcours en fin de ligne, la moyenne calculée ne reflète aucune différence entre la période en pointe et hors pointe. Cette recherche se base sur ce résultat ainsi que sur le caractère prioritaire et exclusif d'un rail pour effectuer des analyses globales sans distinction sur les heures de haute affluence.

Tableau 5.9 Moyenne des temps de parcours pointe et hors pointe

Sainte-Anne à Baie-d'Urfé		Vendôme à Lucien-l'Allier	
Hors-Pointe	Pointe	Hors-Pointe	Pointe
00:02:49	00:02:50	00:02:45	00:02:45

5.3.9 Distance de sécurité

La description des incidents au chapitre suivant démontre que les trains ne se dépassent pas et respecte une certaine distance de sécurité. Cette section tente d'estimer l'intervalle de sécurité appliqué lorsque des délais importants surviennent. Une évaluation sommaire des distances de sécurité est réalisée par analyse du diagramme espace temps tel que figuré ci-dessous. L'analyse sur une dizaine de journées avec incident démontre qu'un délai minimal de 4 minutes est mesuré le 2 septembre 2003, mais qu'en moyenne ils sont d'environ 7 minutes.

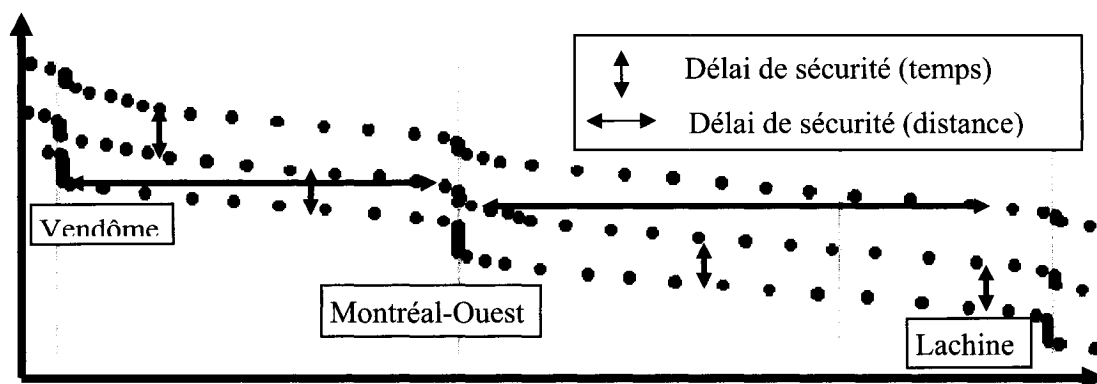


Figure 5.13 Détermination des distances et délais de sécurité dans un diagramme espace temps

Chapitre 6. Détection et description des incidents

Les détails font la perfection, et la perfection n'est pas un détail. [Léonard de Vinci]

Le chapitre précédent expose un éventail de techniques de visualisation et de calculs permettant de caractériser plusieurs éléments d'une ligne de train de banlieue. À partir de cette construction virtuelle, ce chapitre porte l'utilisation de ces données à des fins de planification. Les temps de parcours et les temps en gares calculés précédemment servent maintenant de base pour quantifier la qualité de service et identifier les différents problèmes rencontrés lors de l'exploitation de la ligne de train.

Dans un premier temps, ce chapitre développe une méthode de reconstruction de l'horaire normal basé sur la tendance historique. Cette étape consiste également à reconstituer la chaîne OD habituelle de chaque départ du train. Cette reconstruction du service régulier conduit à plusieurs techniques d'identification des incidents basées sur l'écart au service régulier. Puis, à partir d'un ensemble multivarié comprenant l'espace, le temps, la vitesse, le retard, plusieurs trains et des données de montants descendants, la combinaison des outils de visualisation et d'analyse statistique révèle très précisément le comportement dynamique du train lors de chaque incident.

Au départ, le graphique espace temps classique à la figure 6.1 illustre les perturbations vécues par certains trains. Par contre, l'analyse de densité de point dégage une tendance régulière à respecter l'horaire. La clarification de chacune de ces perturbations devient l'enjeu de ce chapitre, voué à dépeindre le portrait le plus complet de chaque incident dans le but d'en comprendre les causes, les conséquences et les impacts sur les usagers.

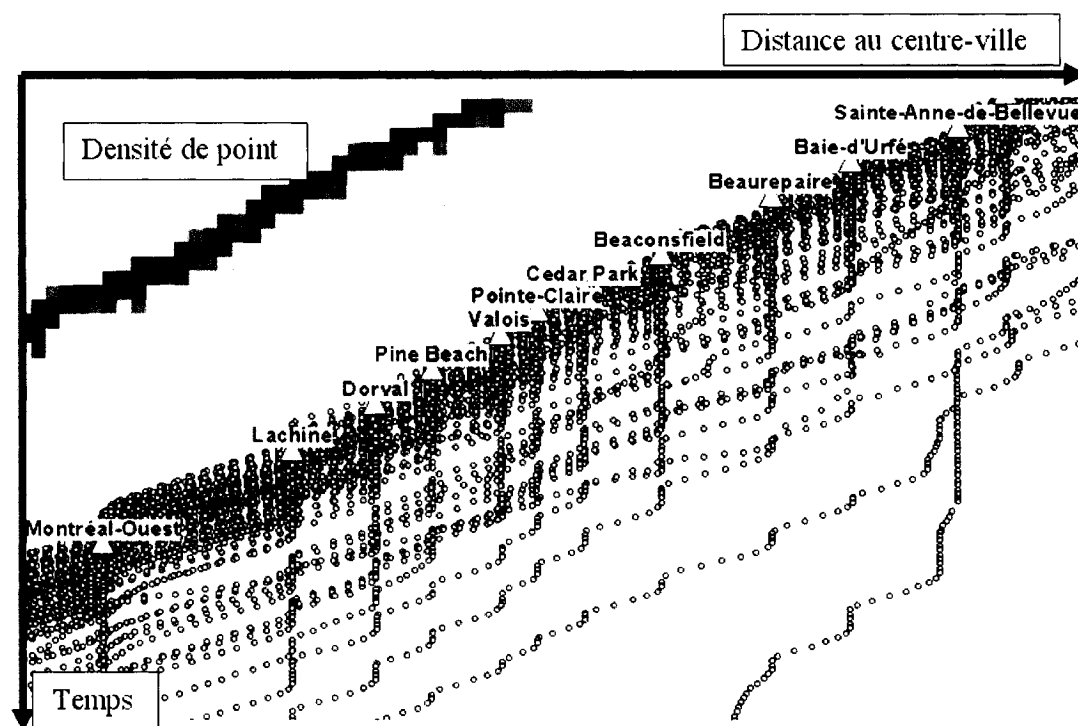


Figure 6.1 Diagramme espace-temps (en bas) et densité de point (en haut) de tous les parcours du train 112 sur la période d'étude.

X : Distance (miles)
Min : 3.34 Max : 22.03
Y : Heure
Min : 7h24 Max : 8h16

Échantillon : 23649 enregistrements
Autre : Train 112 seulement entre
les gares Montréal-Ouest et Sainte-
Anne-de-Bellevue entre le 1^{er} août
2003 et le 1^{er} mai 2004

Échelle de densité (nb points)

0
1 - 50
50 - 100
100 - 400
400 - 10000
No Data

6.1 Reconstruction de l'horaire planifié

6.1.1 Détermination de l'heure de départ médiane

L'analyse de ponctualité de la ligne nécessite la connaissance de l'horaire planifié, base de référence pour déterminer les retards. Par contre, ne connaissant pas a priori l'horaire planifié en vigueur pendant la période d'étude, un effort de reconstruction de l'horaire est réalisé dans cette section.

Le calcul des temps de parcours complets présentés dans le dernier chapitre inclut la détermination des heures de départ à chaque gare. À partir de ce grand échantillon de données historiques, une analyse statistique des distributions des heures de départs ouvre la porte à la reconstruction d'un horaire fictif. En sélectionnant une période où

aucune perturbation n'a affecté le service de manière significative, on détermine une base statistiquement significative décrivant le service régulier.

L'analyse à la figure 6.2 de la distribution des heures de départ calculé pour un voyage à une gare montre la différence entre la médiane et l'horaire planifié connu pour ce départ. Évidemment, le choix de l'heure de référence influe grandement sur la détermination subséquente des retards. La fiabilité étant directement reliée à l'horaire disséminé aux usagers, celui-ci demeure le plus pertinent pour la détermination des retards. Par contre, l'heure de passage médiane après élimination des extrêmes est utilisée dans cette recherche comme horaire de référence. L'impact d'un tel choix sur les indicateurs de ponctualité pourrait faire l'objet d'études plus approfondies.

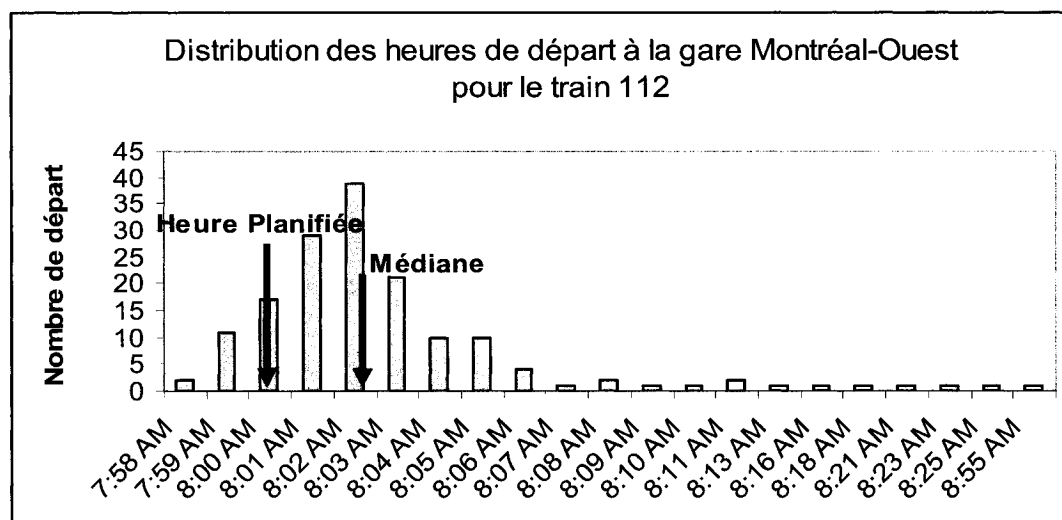


Figure 6.2 Distribution des heures de départ à la gare Montréal-Ouest

Échantillon : 136 enregistrements.

Autre : Train 112 seulement en départ de la gare Montréal-Ouest entre le 1^{er} août 2003 et le 1^{er} mai 2004.

Heure de départ médiane : 8 :02 :22

Heure de départ planifiée : 8 :00 :00

Remarques : Aucun train en avance majeure, une grande concentration des respectent l'horaire planifié et quelques trains sont en retard.

Les distributions des heures de départ en début et fin de ligne (figure 6.3) confirment l'augmentation de la variabilité en approchant la fin d'un parcours. Il en est déduit que les incidents ont tendance à survenir durant un voyage et non pas avant de prendre le départ.

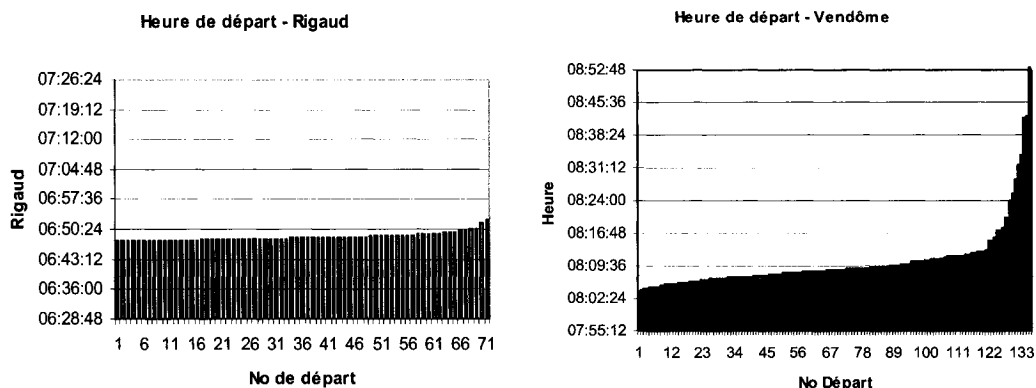


Figure 6.3 Comparaison des distributions des heures de départ pour une gare en début de parcours (Rigaud) et une gare en fin de parcours (Vendôme) pour le train 112

6.1.2 Reconstruction de la chaîne OD

La reconstruction de l'horaire d'un train exige que chaque voyage soit analysé individuellement dans le but d'identifier la suite origine destination du train sur la ligne et d'en déterminer les heures de départs habituelles. La chaîne de paire OD diffère d'un voyage à l'autre à cause des différents types de trajets existants (étendu, express) et des différents quais pouvant être utilisés à une même gare.

La construction d'une matrice origine-destination pour chaque train permet d'identifier les parcours habituels d'un voyage. Ici, chaque origine ou destination représente une des zones de gare virtuelle déterminée précédemment. Pour chaque parcours habituel du train, l'heure de départ médiane est calculée.

Ces résultats sont consolidés dans la base de données *Access* sous deux tables, la table OD ainsi que la table Horaire.

Tableau 6.1 Extrait de la matrice OD et des tables *Access* résultantes pour le train 112 entre le 7 août 2003 et le 28 juin 2004

a) Nombre d'occurrences d'une paire OD

OriDesti	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2	10										
3											
4	274	54	6								
5				420							
7					6						
9				414	2	6					
10									416		
11										410	
12										4	408

Table OD résultante

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Description
ODID	4	31	Long Integer	Clé primaire
Origine	33	13	Long Integer	Identificateur de zone d'origine
Destination	31	12	Long Integer	Identificateur de zone de destination
Direction	0	0	Text	Direction
NoTrain	112	16	Text	Identificateur du train

b) Heure de départ médiane

OriDesti	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1											
2											
3											
4	08:07:32	08:07:57									
5				08:03:24							
7											
9					07:55:25						
10									07:51:55		
11										07:49:02	
12											07:46:10

Table Horaire résultante

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Description
IDHoraire	4	31	Long Integer	Clé primaire
NoTrain	33	13	Text	Identificateur du train
IdGen	31	12	Long Integer	Identificateur de la gare
HeurePredite	0	0	Date/Time	Heure de passage prédite en temps réel
HeurePlanif	112	16	Date/Time	Heure de départ planifiée

6.1.3 Exemple du train 112

La reconstruction d'un voyage complet de la ligne Montréal-Dorion est comparée à l'horaire planifié actuel à la figure 6.4. Dans un premier temps, les parcours OD sont recensés pour retrouver un nombre significatif d'heures de départ pour chaque départ

planifié. La valeur médiane pour chaque gare est ensuite comparée à l'heure de départ planifiée. La différence varie entre 1 et 3 minutes illustrant la tendance à partir légèrement en retard plutôt qu'à l'heure prévue. De plus, cela confirme que l'horaire planifié actuel pour ce voyage n'a pas significativement changé depuis la période de collecte.

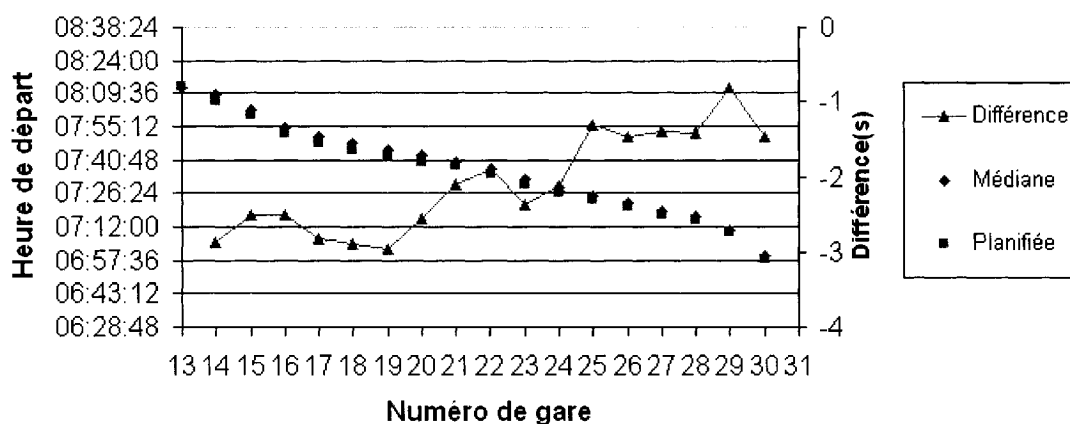


Figure 6.4 Superposition des heures de départs médianes et planifiées.		
X : Numéro de gare	Échantillon : 2802 enregistrements	Statistique (après élimination des extrêmes)
Y : Heure	Autre : Train 112 seulement	Écart type moyen (heure médiane) :
Min : 6h43 Max : 8h24	entre le 1 ^{er} août 2003 et le 1 ^{er} mai 2004	3 min39 sec.
		Moyenne (Différence)= 2 min 8 sec
		Écart type : 36 sec

La construction d'une plateforme de référence est un élément clé pour l'atteinte des objectifs de détection d'incidents. L'exemple du train 112 illustre comment le chaînage OD et les heures de départ associées ont été reconstruits. La validité de l'estimation de l'horaire par rapport à l'horaire planifié étant vérifiée, la même procédure est répétée pour l'ensemble des trains en pointe du matin et devient la base de comparaison pour le calcul de la ponctualité.

6.2 Identification d'incidents

6.2.1 Méthode visuelle

L'estimation du retard est réalisée par la différence entre l'heure de départ et l'heure de référence définie dans la dernière section. De la même manière, le temps de parcours est soustrait au temps de parcours moyen pour estimer le retard accumulé en parcours. Ces deux dernières valeurs sont ajoutées à la table *Access* des temps de parcours et constituent l'information quantitative sur le retard qui est analysé dans ce sous-chapitre.

La base de référence autorise maintenant l'analyse de situations divergentes. En guise de premier exemple d'identification de retard, le diagramme vitesse-distance ci-dessous permet déjà de visualiser rapidement les trains qui ralentissent entre deux gares. La figure 6.5 démontre un exemple simple où le trajet ralenti d'un train est marqué d'un identificateur étoilé. Une première analyse visuelle permet de comprendre certaines causes de retard comme des immobilisations ou des ralentissements.

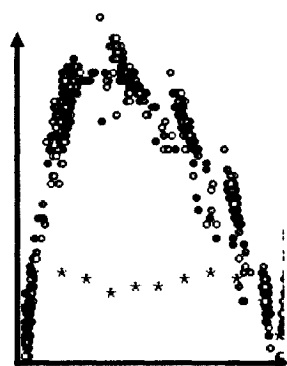


Figure 6.5 Ralentissement d'un train (étoile) suite à l'examen visuel du profil de vitesse.

X : Distance (miles) Min : 13.31 Max : 14.72	Échantillon : 349 enregistrements Autre : Train 112 seulement entre le 1 ^{er} août 2003 et le 1 ^{er} juillet 2004	Remarques : Ralentissement d'un train à environ 20 mi/h pour le parcours intergare.
---	--	--

Ce genre de comportement se traduit nécessairement par des écarts au temps de parcours habituel et par des heures de départ retardées. Une méthode graphique est donc développée pour illustrer rapidement les écarts à l'horaire de référence, et ce, pour chaque départ et chaque temps de parcours. Deux types de retard en découlent : un retard au départ d'une gare et un retard en parcours. L'exemple à la figure 6.6 illustre un train (étoile) qui se dirige de droite à gauche. Celui-ci réduit sa vitesse sur une

portion du parcours. Le résultat schématique coloré illustre les retards au départ des gares et les retards par rapport aux temps de parcours. À l'extrême droite, le train est à l'heure, mais à mesure que le retard augmente avec la réduction de vitesse, les départs accumulent du retard (graduellement du vert au rouge). Ce genre de représentation colorée permet d'identifier rapidement les zones problématiques.

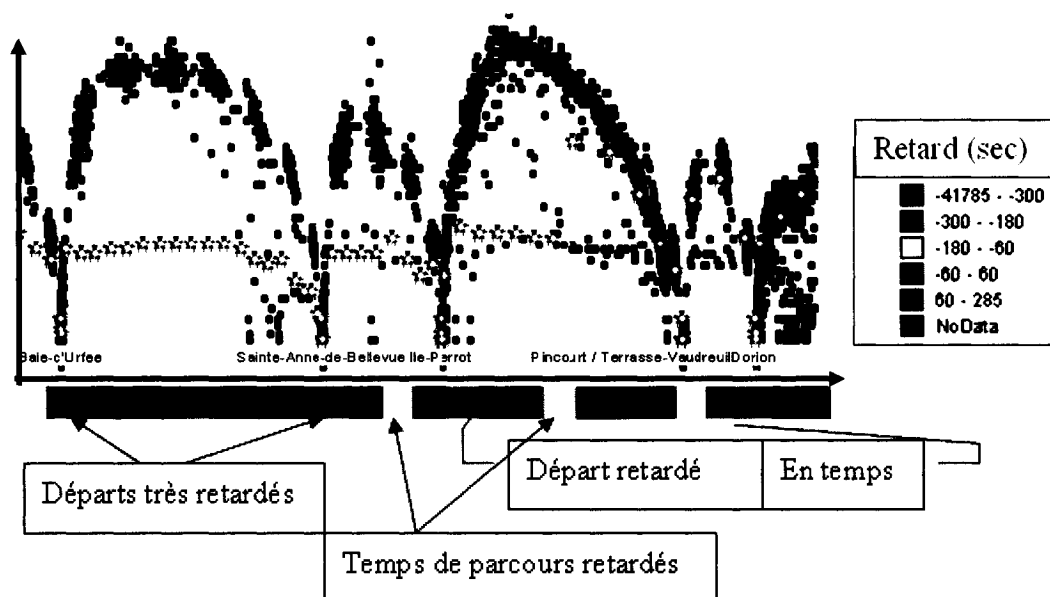


Figure 6.6 Représentation colorée des retards aux départs d'une gare et par rapport aux temps de parcours moyen.

X : Distance (miles)
Min : 17.88 Max : 23.88
Y : Vitesse (Mi/h)
Min : 0 Max : 61

Échantillon : 9435 enregistrements
Autre : Train 112 seulement entre le 1^{er} août 2003 et le 1^{er} juillet 2004

Remarque : Le parcours d'un train (étoile) subit un ralentissement intergare.

Suivant ce modèle de visualisation par couleur, il devient possible de créer une carte résumée où l'ensemble des voyages de la période d'étude se superpose. La carte présentée à la figure 6.7 représente en abscisse le parcours d'un train et en ordonnée, la date du parcours. Ici, le train de semaine #112 est illustré et les espaces vides représentent les fins de semaine. On remarque que la plupart des parcours sont ponctuels (en vert), que certains prennent de l'avance en approchant du centre-ville et que les incidents de retards deviennent clairement identifiables. Grâce à l'interactivité des SIG, il est possible de déterminer à quel moment et à quel endroit a eu lieu

l'incident. La cause peut ensuite être déterminée par des analyses visuelles des diagrammes présentés précédemment.

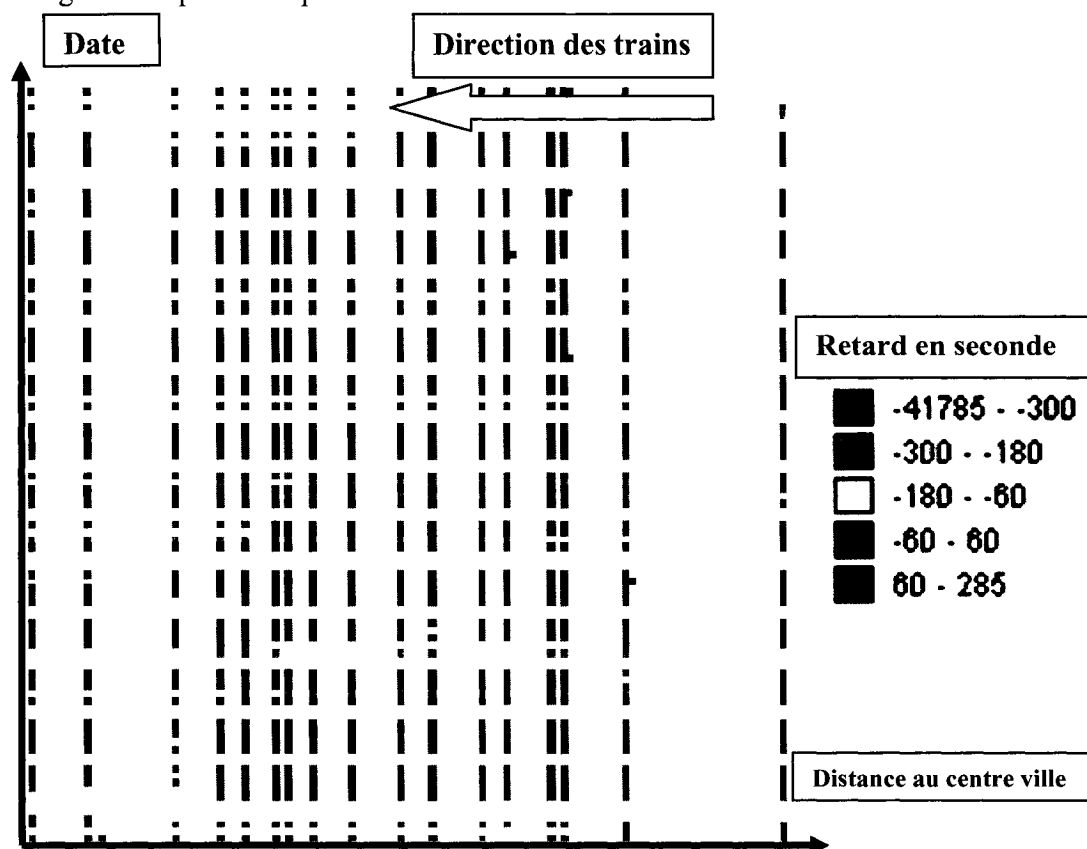


Figure 6.7 Carte de visualisation des retards

X : Distance (miles) Min :0 Max : 40.06	Échantillon : 1275 enregistrements Autre : Train 112 seulement entre le 8 septembre 2003 et le 18 décembre 2003	Remarque : Identification de 7 incidents majeurs (+ de 5 minutes).
Y : Date (Jours depuis le 1 ^{er} août 2003)		

Ce genre de présentation permet donc d'isoler d'un coup d'œil l'ensemble des incidents. De plus, l'organisation matricielle de l'information autorise le traitement automatisé de la grille pour déterminer une série d'indicateurs telle que l'identification des gares subissant les plus longs délais ou le plus fréquemment ainsi que les parcours problématiques.

L'analyse détaillée de quelques délais majeurs conduit à l'identification de quelques faux délais provenant de :

- Une mauvaise affectation du numéro de train.
- Un remplacement, suite à un bris par exemple, du train par un autre. Le train n'est pas réellement en retard, puisqu'un autre le remplace.
- Des temps de parcours erronés lors de cours déplacement hors service, notamment à proximité des gares terminales

Sur l'ensemble des journées à l'étude, neuf ont présenté des anomalies invalidant le calcul de ponctualité. Ces journées présentent toutefois des perturbations majeures au niveau de l'offre de service et peuvent toujours faire l'objet d'une analyse visuelle manuelle aux fins de description.

6.2.2 Rapport synthèse automatisé

Les techniques visuelles interactives grâce au SIG ciblent rapidement des voyages problématiques. Par contre, ces techniques n'offrent pas d'indicateurs de ponctualité englobant la période d'étude. À cet effet, la table sur les incidents ci-dessous est construite, puis remplie automatiquement par macro.

Tableau 6.2 Table de description d'un incident

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Description
IncidentID	2658	2630	Long Integer	Clé primaire
Modem	1328	1327	Text	Identificateur du modem
Train	16	14	Text	Identificateur de train
Date	2003-08-19	09-févr-04	Date/Time	Date de l'incident
HeureDeb	08:11:27	08:14:02	Date/Time	Heure du début de l'incident
RetardMO	-912	-962	Long Integer	Retard enregistré au départ de la gare Montréal-Ouest
Measure	6.498938084	1.924295545	Number	Position du début de l'incident

Le tableau 6.3 résume l'ensemble des incidents identifiés et filtrés sur la période d'étude. Un filtrage est nécessaire pour éliminer les faux retards provenant d'une mauvaise affectation de train. Il est proposé ici de développer une série de règles opérationnelles permettant d'éliminer automatiquement ces erreurs. Le taux de ponctualité retrouvé semble plus faible que le taux moyen selon l'AMT (95%).

Tableau 6.3 Résultat synthèse de ponctualité en partance de la gare Montréal-Ouest (fin de ligne) pour les trains en pointe AM direction centre-ville entre le 3 août et le 28 juin 2004

Nombre de jour de semaine	160
Nombre de voyage	960
Nombre de voyage retardé plus de 3 minutes	114
Nombre de voyage retardé plus de 5 minutes	84
% de voyage retardé plus de 5 minutes	8.75%

6.3 Description des incidents

À la suite de l'identification des journées problématiques, un effort de caractérisation fine, détaillée et clarifiée des incidents est réalisé dans cette section.

6.3.1 Représentation multidimensionnelle

Le premier cas abordé tente d'expliquer une irrégularité majeure dans l'ensemble de données. En effet, suite à l'identification systématique de délais de parcours du train 112 sur plusieurs semaines d'études, la construction superposée des diagrammes espace-vitesse et espaces-temps à la figure 6.8 révèle qu'une limitation de vitesse est appliquée entre Rigaud et Hudson entre le 23 avril 2004 et la fin de la période couverte, soit le 28 juin 2004. Du diagramme espace-temps, on déduit trois ensembles réguliers. Le premier coïncide avec l'heure habituelle de départ à Rigaud. Le second, d'une durée d'environ 10 jours, prend départ à l'heure habituelle, mais subit la limitation de vitesse et le délai de parcours. Finalement, le troisième ensemble illustre le devancement de l'heure de départ d'environ 30 minutes, permettant ainsi au train de poursuivre son trajet selon l'horaire habituel, malgré la limitation de vitesse en vigueur.

L'utilisation d'une représentation superposée des dimensions espace-temps-vitesse, associée à l'interactivité du SIG permet d'expliquer très précisément l'évolution de la dynamique et de la ponctualité sur la ligne suite à une limitation de vitesse de longue haleine.

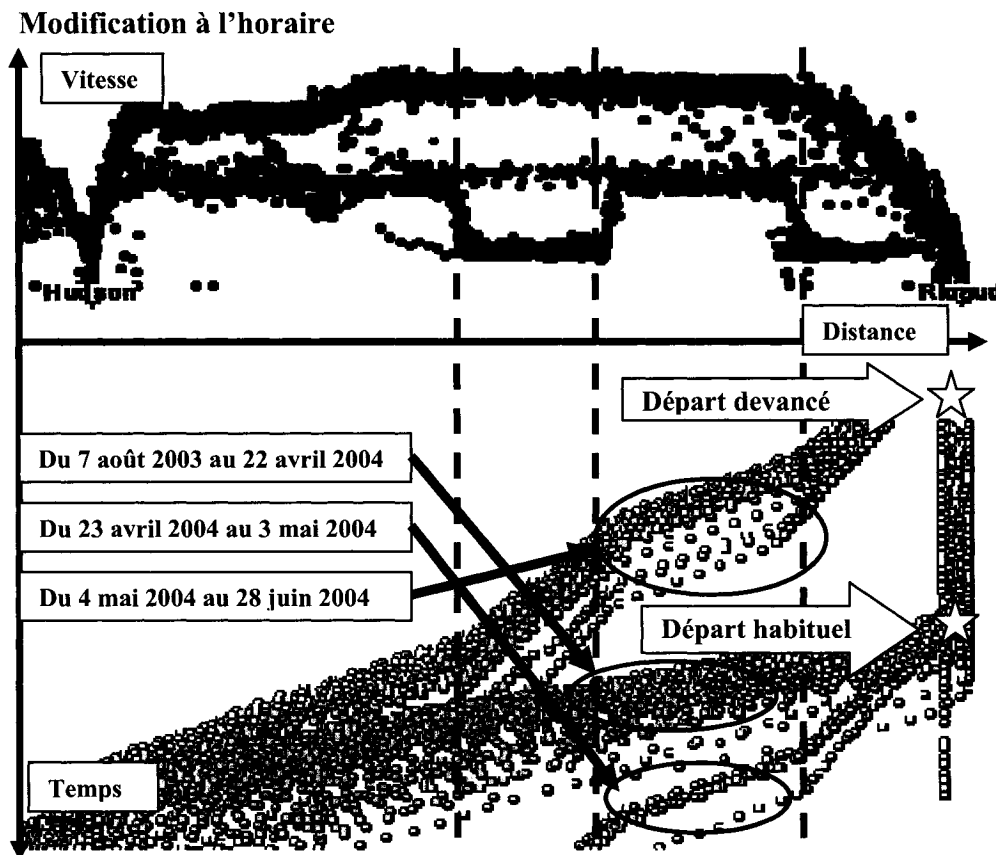


Figure 6.8 Représentation d'une limitation de vitesse temporaire à l'aide d'un diagramme espace vitesse (en haut) et espace temps (en bas) .

X : Distance (miles) Min :31.7 Max : 40.06 Y (Haut) : Vitesse (mi/h) Min :0 Max : 65 Y (Bas) : Temps Min :6h30 Max : 7h10	Échantillon : 1275 enregistrements Autre : Train 112 seulement entre le 7 août 2003 et le 28 juin 2004	Remarque : La limitation semble avoir été en vigueur à partir du 23 avril 2004 jusqu'à la fin de la période d'étude.
--	--	--

Un deuxième cas, la journée du 2 septembre 2003, présente plusieurs trains retardés en milieu de parcours. La conception d'un diagramme espace-temps rehaussé d'une représentation colorée des écarts à l'horaire régulier est illustrée à la figure 6.9. D'un point de vue général, on remarque qu'un incident en début de période de pointe entraînera le retard de 3 trains sur plus de la moitié du parcours. De plus, une représentation côte à côte en haute résolution permet d'expliquer que le retard subi par le troisième train est causé par un ralentissement lors d'un parcours intergare.

Plusieurs conclusions sont déduites de ce genre de représentation. L'analyse des distances entre les trains démontre que les distances de sécurité sont respectées. De plus, on découvre qu'un train ne peut rattraper son retard en accélérant. Au mieux, il peut légèrement diminuer le temps d'attente en gare et ainsi gagner quelques minutes. Les trains ne se dépassent jamais. De ce fait, un retard majeur à l'heure de pointe entraîne le retard de plusieurs trains suivants.

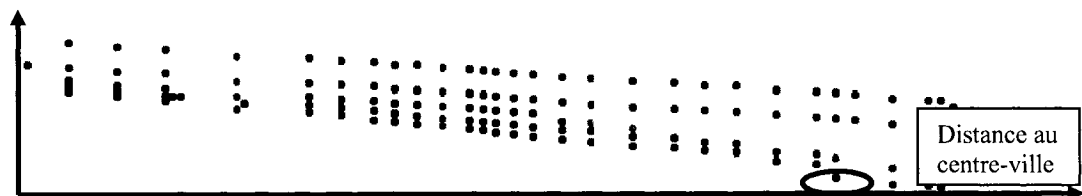


Figure 6.9 Représentation colorée du retard pour une période de pointe AM dans un graphique espace-temps.

X : Distance (miles) Min : 0 Max : 40.06	Échantillon : 182 enregistrements	Échelle de couleur (sec de retard)
Y : Temps (Échelle relative) Min : 7h00 Max : 9h00	Autre : Train en pointe AM direction Centre-ville le 2 septembre 2003.	■ -41785 - -300
Z : Retard (Sec) Min - 1683, Max 24		■ -300 - -180
		□ -180 - -60
		■ -60 - 60
		■ 60 - 285

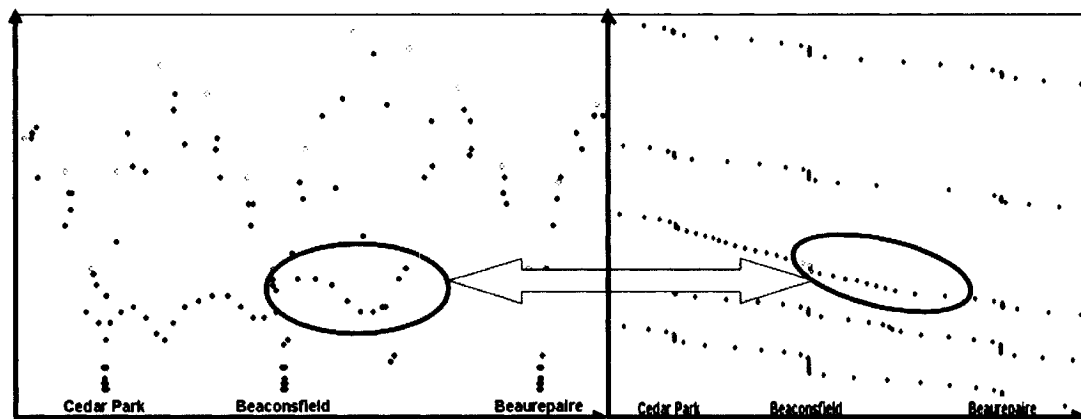


Figure 6.10 Analyse complémentaire à l'aide d'un diagramme espace-temps et espace- vitesse

X : Distance (miles) Min : 0 Max : 40.06	Échantillon : 182 enregistrements	Échelle	Retard (sec) (droite)
Y : Temps (Échelle relative) Min : 7h00 Max : 9h00	Autre : Train en pointe AM direction Centre-ville le 2 septembre 2003.	Train (gauche)	■ -41785 - -300
Z : Retard (Sec) Min - 1683, Max 24		● 112	■ -300 - -180
		● 14	□ -180 - -60
		● 16	■ -60 - 60
		● 18	■ 60 - 285
		○ 20	

La représentation détaillée, multidimensionnelle d'un phénomène et l'utilisation de niveaux de résolution multiples dans un environnement interactif supporté par un SIG offrent simultanément une vision d'ensemble et une représentation quasi chirurgicale de la dynamique évolutive entourant le phénomène. Cela conduit à la catégorisation des délais et à la compréhension du système nécessaire au développement d'une méthode temps réel détaillée au chapitre 7.

6.3.2 Analyse tendancielle

En complément aux analyses pointues offertes par le haut niveau de résolution de la technologie GPS, une analyse tendancielle des retards révèle des phénomènes à caractère saisonnier. L'utilisation d'un modèle numérique de terrain s'avère appropriée pour la représentation tendancielle d'un phénomène à 3 dimensions. Le terrain modélisé à la figure 6.11 manifeste une tendance à voir augmenter le retard en direction du centre-ville, et ce, en approchant le mois de décembre. Ce résultat concorde avec les premières chutes de neige et propose l'hypothèse d'une augmentation des délais durant la période hivernale.

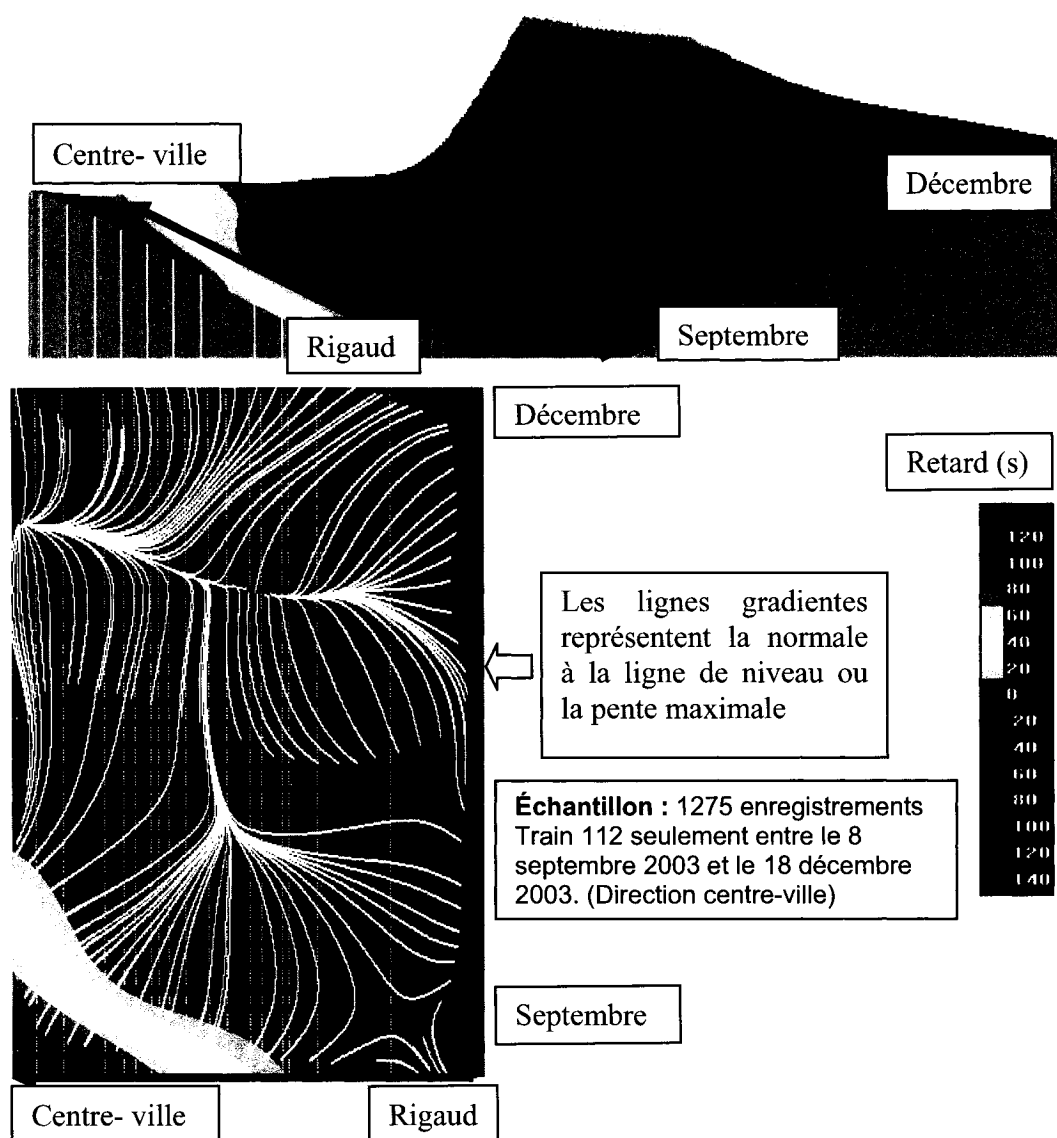


Figure 6.11 Modèle numérique de terrain illustrant les retards en 3D (haut) et 2D (bas)

En ajoutant à cette représentation 3D espace-temps-retard une dimension thématique (ou de catégorie) selon le numéro de train, une visualisation 4D du phénomène est proposée à la figure 6.12 . L'utilisation d'une isosurface délimitant la zone au dessus et au dessous de 12 minutes de retard forme des nuages illustrant les zones espace-temps-

train qui tendent vers un délai problématique. Ici, la tendance montre des délais moins élevés en début de parcours (20^{ième} mille environ), surtout pour les trains 14,16,18 et 20 et distribués sur l'ensemble de la période d'étude. Quoiqu'intéressante, cette visualisation semble plus difficile d'interprétation. L'application formelle de ce type d'outil devrait faire l'objet de recherches plus approfondies.

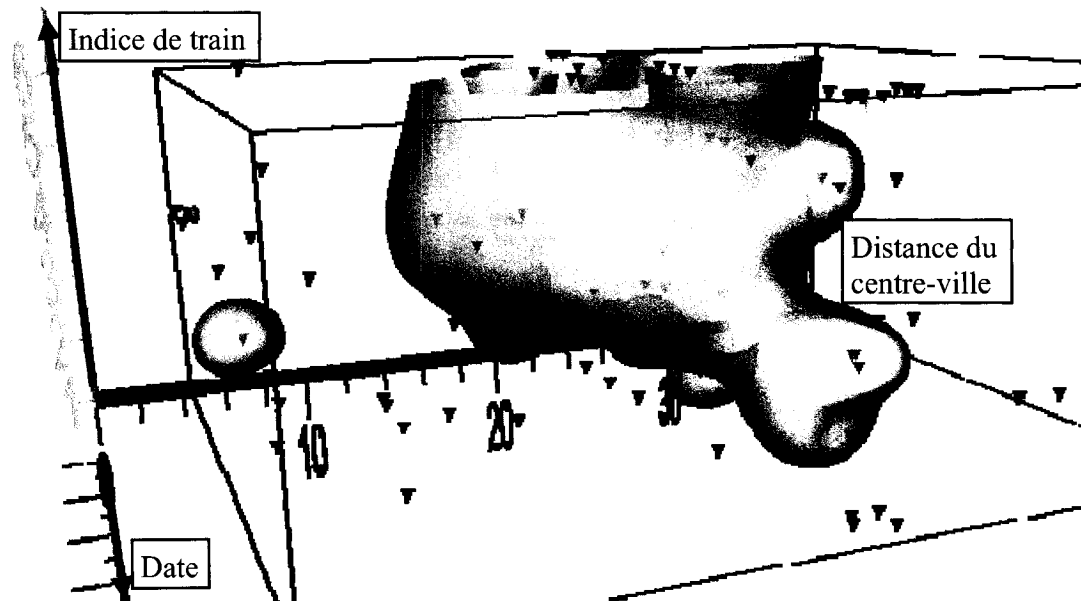


Figure 6.12 Représentation 4D des incidents et de leur retard

X : Distance (milles)

Min : 0 Max : 40.06

Y : Train (voir échelle)

Z : Date (en nombre de jour)

Min : 3 août 2003,

Max : 28 juin 2004

Échantillon : 114 enregistrements, train en pointe AM direction Montréal

Poids xyz : Retard (sec)

Isosurface  : Délimite un retard >12 minutes d'un retard <12 minutes.

Échelle (Y)

Train	Valeur
12	1
112	2
14	3
16	4
18	5
20	6

6.3.3 Impact sur les usagers

Chaque incident n'a pas le même impact sur les usagers. Notre effort de caractérisation des incidents inclut donc une pondération sommaire du retard en fonction du nombre d'usagers affectés. La figure 6.13 illustre le profil de charge à l'heure de pointe en direction de Montréal. Sur l'ensemble des départs, le point de charge maximum se trouve en quittant la gare Lachine. De plus, le nombre de personnes descendantes est

inférieur à 1% du nombre de descendants total avant Dorval. Ceci reste vrai jusqu'à Montréal-Ouest à l'exception du train 40 qui débarque 8% de sa charge à Dorval. De ce fait, tout incident ayant lieu avant la gare Montréal-Ouest affecte presque entièrement les passagers pour ce voyage. En effet, sachant qu'un train peut à peine rattraper un retard accumulé, un incident retardera l'ensemble des passagers dans le train en plus de ceux qui embarquent par la suite.

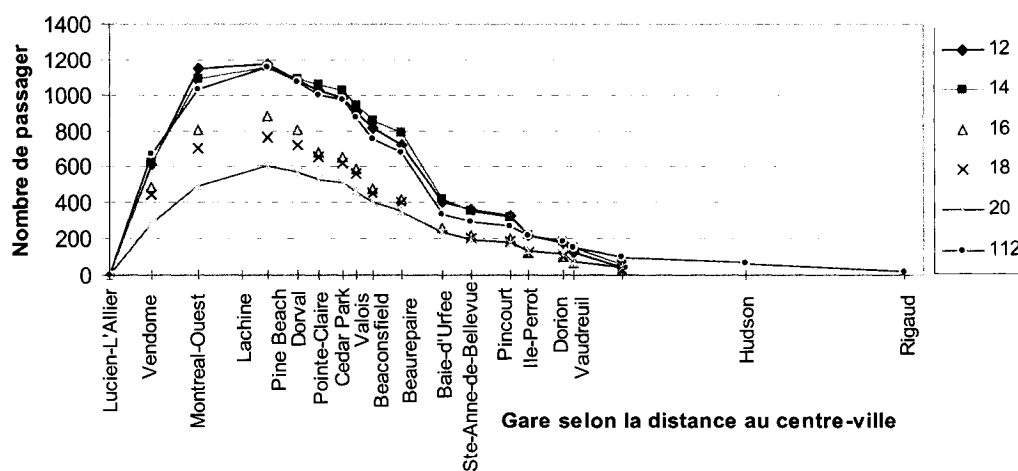


Figure 6.13 Profil de charge sur la ligne Montréal Dorion - Train en pointe du matin (AMT)

Pour arriver à quantifier le retard, le produit du retard accumulé avec le nombre de personnes affectées est utilisé. Pour les trois trains les plus chargés le matin, la charge maximale est d'environ 1150 passagers. Il en découle que pour chaque minute de retard accumulée, environ 20 heures*personnes de retard sont engendrés. Un retard de 15 minutes fait perdre plus 300 heures*personnes.

À partir du calcul des retards à la gare Montréal-Ouest, un sommaire des incidents selon le point de vue des usagers peut être construit. Pour les trains en pointe du matin, 53 de 751 arrivées à Montréal Ouest étaient retardées de plus de 5 minutes pour un total de 53887 secondes de retard. En soustrayant les 5 minutes de retard (300 secondes) considérées acceptables à chaque départ, la quantité de retard inacceptable devient de 633 minutes. Multiplié par une moyenne d'environ 1000 passagers pour ces départs, le

retard total engendré est de 10555 heures*personnes de retards. L'utilisation des délais calculés précédemment en association au profil de charge nous permet de quantifier l'impact d'un retard sur les usagers.

En se basant sur la théorie du coût généralisé moyen (Chapleau, 2002), l'ajout d'une pondération au retard régule son impact en fonction du type de retard. En effet, un retard où le passager attend en gare n'est pas perçu de la même manière qu'un retard vécu assis confortablement dans un train lors d'un ralentissement en parcours. De plus, une immobilisation en gare signifie un retard pour les usagers à bord du train, mais ne constitue pas un retard pour ceux qui viennent d'y débarquer. L'équation ci-dessous propose donc une quantification de l'impact d'un incident en fonction du retard accumulé par les usagers à chaque gare et pondéré (W) selon le type de retard (en train ou en gare).

$$Incident_impact_{pondéré} = \sum_{k=gare_début}^{gare_fin} W * délai_{sec} * Nombre_d'usager$$

Ces considérations conduisent à l'analyse détaillée d'un délai plus long que la fréquence de passage. Dans ce cas, un train retardé d'un temps égal à l'écart avec le train suivant respecte la ponctualité de ce prochain train. La figure 6.14 présente la journée du 2 septembre 2003 où des retards importants perturbent le service. Dès le premier incident, le retard se cumule pour finalement se retrouver légèrement en retard sur le passage planifié (ligne bleue) suivant. La largeur des lignes verticales représente la charge de personnes en attente à la gare. Cette situation se traduit donc par une charge importante lors de l'arrivée du train cumulant les montants de deux départs planifiés. Par contre, une partie de cette charge vit son embarquement selon les heures habituelles et ne subit donc aucun retard. Par ce fait même, le train suivant, aussi en retard, se trouve à embarquer une charge minimale de personnes. Le retard de ce train a donc un impact total amoindri. Ajoutant à ces considérations les contraintes d'espace des wagons et les comportements des usagers lors d'un retard (itinéraire alternatifs,

etc.), le problème de quantification du retard de la perspective usager devient très complexe et constitue un des axes de recherches futures proposés.

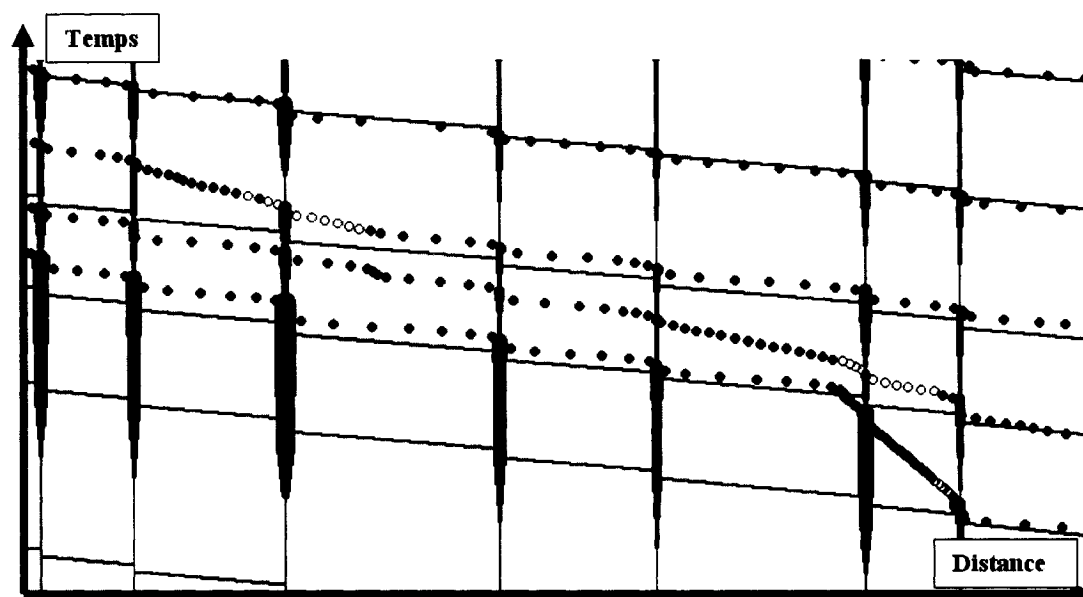


Figure 6.14 Diagramme espace-temps illustrant le retard, l'horaire planifié et la charge à chaque gare.

X : Distance (miles)

Min : 12.2 Max : 22.2

Y : Temps (Échelle relative)

Min : 7h04 Max : 8h16

Échantillon : 370 enregistrements

Autre : Train en pointe AM direction Centre-ville le 2 septembre 2003.

Échelle

Charge

~ < 1

~ ↓

~

~ ≥ 400

Retard (sec)

● ≥ -3599 < -300

○ ≥ -300 < -180

● ≥ -180 < 60

● ≥ 60 < 120

Planifié

~

6.3.4 Évolution temporelle

Les représentations statiques présentées jusqu'à maintenant exploitent peu les concepts de navigation dans l'espace informationnel. Dans cette optique, un navigateur temporel permet d'apprécier la dimension évolutive du service et d'en illustrer la dynamique. Pour ce faire, les technologies informationnelles couplées à la rapidité des ordinateurs offrent une plateforme de développement permettant d'expérimenter des applications interactives de navigation temporelle.

Cette section présente une méthode simple et rapide pour apprécier l'évolution temporelle du service sur la ligne de train de banlieue. L'objectif de ce genre de représentation consiste à suivre l'évolution d'un phénomène et de gagner ainsi en flexibilité analytique. À première vue, il paraît naturel de suivre le déplacement d'un train, mais grâce aux différents indicateurs développés auparavant, une intégration de ces différents calculs dans une animation permet de cibler rapidement les incidents et d'en suivre la progression d'un point de vue global. La simplicité de la méthode réside dans le fait que l'animation se fait directement dans Excel auquel on a greffé une macro permettant de naviguer dans une base de données. Il s'agit alors de réaliser un tri strictement croissant sur le champ représentant la dimension temporelle et de faire varier la plage de données à illustrer.

La figure 6.15 présente deux captures d'écran provenant du navigateur. De la perspective de la locomotive, l'évolution s'examine selon les dimensions espaces, temps, vitesses et retards. Du point de vue usagers, les files d'attente à chaque gare ainsi que le retard accumulé des usagers sont illustrés. Dans le cas d'un retard au dessus de la fréquence de passage, les files d'attente se composent de personne ne subissant pas le même délai, une discrimination s'impose donc en fonction du train originalement attendu. D'ailleurs, les arrivées en gare font l'objet d'une distribution déterministe des montants descendants pour chaque train à chaque gare. La navigation s'effectue par tranche variable de temps, le niveau de résolution maximal étant à la minute. L'exemple ci-dessous illustre l'évolution d'un incident et son impact sur le retard des usagers.

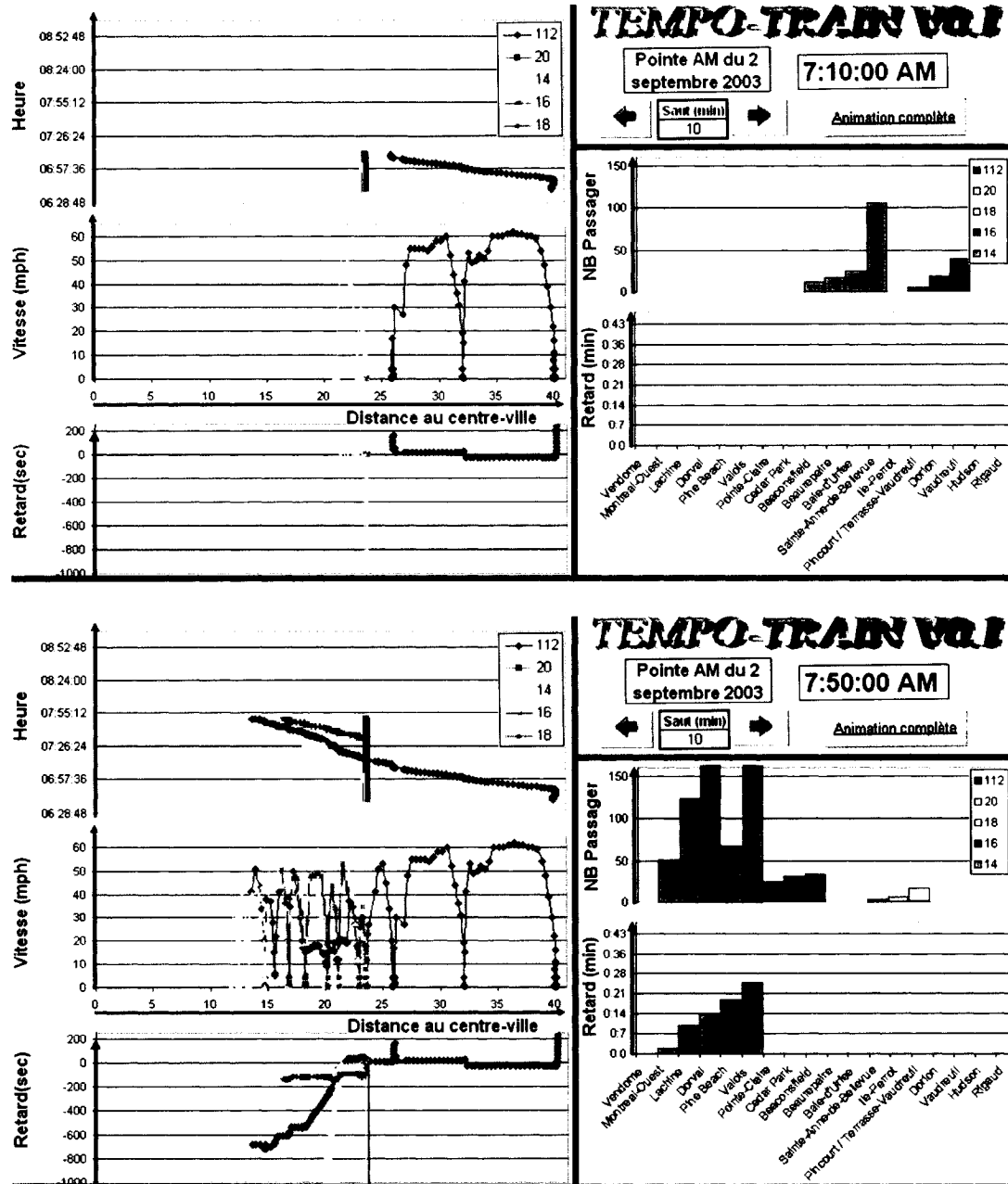


Figure 6.15 Illustration d'une application Excel simulant l'évolution temporelle de diagrammes (à gauche de haut en bas) espace-temps, espace-vitesse, espace-retard et d'histogrammes illustrant (à droite de haut en bas) la longueur de l'attente à chaque gare et du retard accumulé selon le groupe.

Dans le même ordre d'idée, la technologie VRML peut être mise à contribution pour la représentation d'un phénomène évolutif. À cet effet, une première visualisation à la figure 6.16 démontre la capacité de représenter un phénomène multidimensionnel. Aux trois dimensions s'ajoute la coloration des points comme indicateur du train et la coloration des traits comme indicateur d'une quatrième variable, soit le retard. À cette représentation statique peut s'ajouter une animation, mais celle-ci n'est pas développée dans cette recherche.

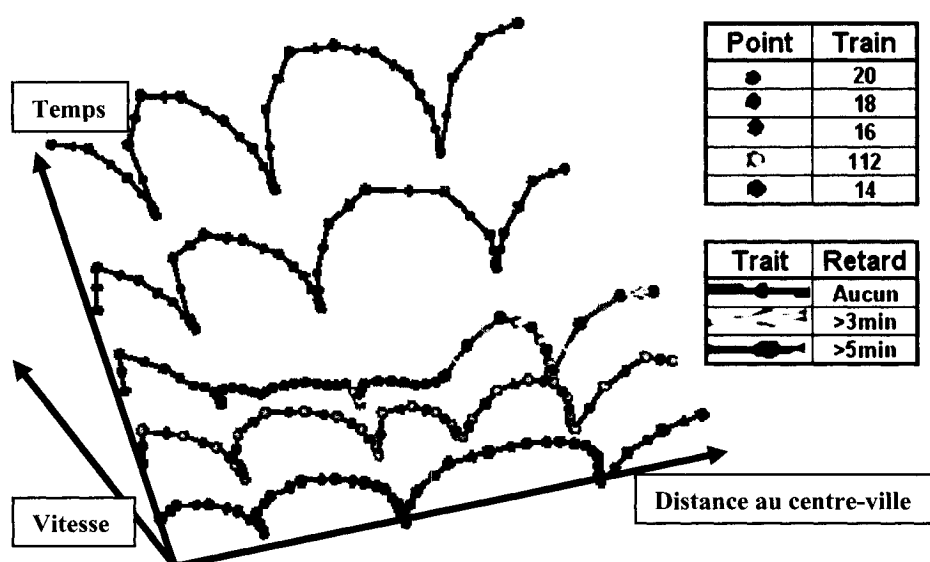


Figure 6.16 Visualisation VRML espace temps vitesse avec représentation du retard

X : Distance (miles)	Y : Temps	Z : Vitesse (mi/h)	Échantillon : 370 enregistrements
Min : 12.2	Min : 7h04	Min : 0	Autre : Train en pointe AM
Max : 22.2	Max : 8h16	Max : 65	direction Centre-ville le 2
			septembre 2003.

6.3.5 Catégorisation des incidents

Dans l'objectif de prédire l'impact des incidents sur le service, une catégorisation et une classification s'imposent. La figure 6.17 schématise un ensemble de qualificatifs entourant l'occurrence d'un incident.

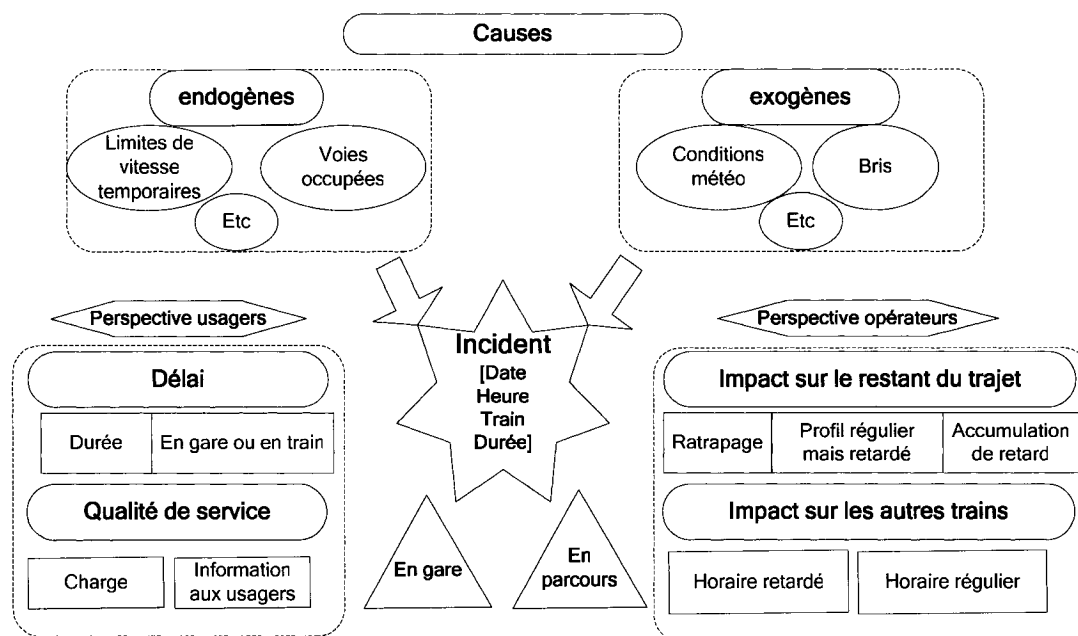


Figure 6.17 Caractérisation et catégorisation des incidents

Un incident possède une ou plusieurs causes et entraîne une série de conséquences affectant les opérations ainsi que les usagers. De ce fait, cette recherche permet de construire une catégorisation basée sur les diverses représentations et calculs réalisés jusqu'à maintenant. La catégorisation résume une bonne partie de ces résultats.

Premièrement, une analyse tendancielle, historique ou ponctuelle permet d'expliquer certaines causes directement attribuables à la dynamique sur la ligne provenant des données GPS. À cette catégorisation préliminaire, il est possible de greffer une série d'attributs permettant de regrouper certains types d'incidents basés sur des facteurs externes. Les conditions météorologiques, l'état de la flotte de locomotives, les bris ou obstructions de la voie, etc. offrent une possibilité d'étude de corrélation avec les incidents, mais constituent des voies de recherches futures.

De plus, chaque incident se décrit précisément en fonction du lieu, de l'heure, du train et de sa durée. De manière générale, deux catégories majeures distinguent les délais en gare des délais en route. La première est assez intuitive et s'applique généralement dans le cas d'un délai où le train est immobilisé en gare. La deuxième est plus complexe dans le sens où le retard sur un parcours, donc en mouvement entre deux gares, se mesure en calculant une variation majeure au profil de vitesse régulier.

Subséquemment, les conséquences sur la ligne sont perçues d'un point de vue opérationnel ou du point de vue usager. Dans le premier cas, un train retardé peut ensuite rattraper son retard, le conserver ou même aggraver sa situation en continuant de cumuler un retard. De plus, un incident et le délai subi par un train peuvent entraîner un ajustement du service des trains suivants, notamment aux heures de pointe. Du point de vue usager, le retard peut être quantifié en terme de charge et de retard accumulé. L'impact de ces facteurs se mesure en terme de qualité de service.

La combinaison des indicateurs et des techniques de visualisation offre les outils nécessaires pour réaliser en grande partie cette catégorisation. De surcroît, une détection automatique de l'incident, suivie d'une description la plus complète possible permet la construction d'un rapport synthèse pouvant être disséminé aux opérateurs et possiblement aux usagers. Le prochain chapitre présente une version temps réel d'un programme de détection et description de l'incident, suivi d'une prédiction de l'heure d'arrivée en gare.

Chapitre 7. Temps réel et prédiction

Un bon politicien est celui qui est capable de prédire l'avenir et qui, par la suite, est également capable d'expliquer pourquoi les choses ne se sont pas passées comme il l'avait prédit [Winston Churchill]

Face à ce défi de prédiction, qu'est-ce qu'un bon ingénieur planificateur ? Est-il celui qui ne peut prédire l'avenir, mais qui, auparavant, est capable d'expliquer en détail tous les scénarios possibles ? La compréhension du système offerte par les expérimentations réalisées jusqu'à maintenant autorise l'élaboration d'un modèle de prédiction basé sur les comportements antérieurs et la connaissance de l'état du système actuel apporté par le GPS. À cet effet, ce chapitre propose de se tourner sur le moment présent et sur le proche avenir. Il présente une approche affinée de traitement dans un contexte d'utilisation temps réel et automatisé. En ce sens, le calcul du retard, la détection des incidents et l'émission d'une prédiction des heures de départs s'allient pour former un outil de surveillance de la performance en temps réel.

7.1 Procédure de détection d'incidents temps réel

Jusqu'à maintenant, la détection d'incidents est réalisée grâce à une analyse comparative basée sur une tendance historique des temps de parcours et des heures de départs. Cette technique s'avère efficace pour un traitement différé, mais ne peut s'appliquer dans un contexte temps réel où le temps de parcours et l'heure de départ ne sont pas connus avant de franchir un segment virtuel de la voie ferrée. De ce fait, la procédure de détection temps réel proposée dans ce chapitre augmente le niveau de résolution d'identification du retard à chaque relevé de position reçu. Ce traitement désagrégé au niveau de l'élément atomique de positionnement offre une identification rapide d'un incident. Il en résulte une analyse du comportement du train permettant d'établir une prédiction des heures de départ.

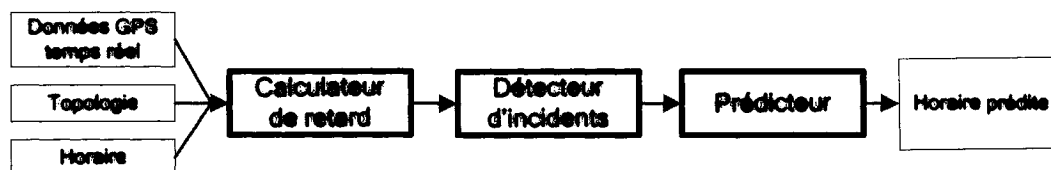
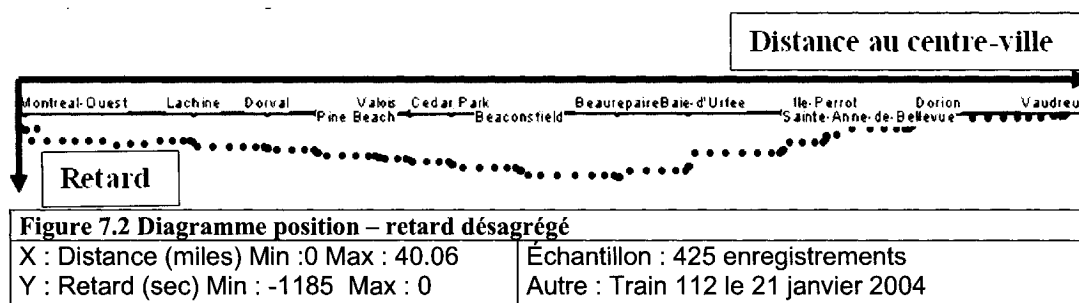


Figure 7.1 Flot de traitement présenté à ce chapitre

7.1.1 Approche désagrégée

L'approche désagrégée en temps réel consiste à calculer le retard accumulé à chaque position GPS reçue. Le résultat net de cette technique est illustré par le diagramme position retard désagrégé de la figure 7.2. Contrairement aux autres figures présentées jusqu'à maintenant, ce graphique affiche chaque relevé reçu ainsi que la valeur du retard lui étant associée à ce moment. Il en résulte un niveau de résolution plus élevé et une trace plus fine. Ce traitement ouvre la porte à la détection d'incidents en temps réel au rythme de la réception des relevés GPS.



Les horaires et temps de parcours médians calculés précédemment forment les bases de référence nécessaire au calcul du retard. En fonction de la position dans le segment du point reçu, une base de référence et le calcul à effectuer sont déterminés. On distingue 4 catégories de points à la figure 7.3 :

1. Le premier point suivant le départ d'une gare. Celui-ci est comparé à l'heure de départ habituelle pour déterminer le retard. Il s'agit du point le plus important, car il se réfère directement à l'horaire planifié.

2. Chaque point en parcours. Comparés au profil de vitesse régulier, ils permettent de quantifier le retard lors d'un ralentissement et de l'additionner au retard calculé lors du départ (1).
3. Le premier point lors de l'arrivée en gare. Celui-ci permet de calculer le temps de parcours depuis le départ et de le comparer au temps de parcours habituel. Le retard devient la somme de ce délai de parcours avec le retard calculé au départ de la gare. Ce délai vient ajuster et valider le calcul du retard réalisé en 2.
4. Chaque point en gare. Un délai additionnel est ajouté à partir du moment où le retard calculé en 3 additionné à l'heure de départ habituelle est dépassé.

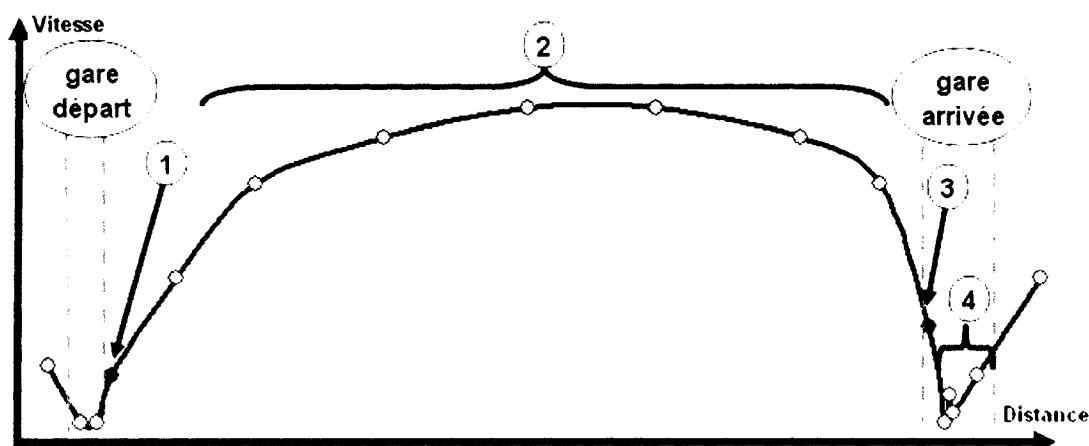


Figure 7.3 Les 4 catégories de calcul du retard désagregé.

Le calcul désagregé du retard fait donc intervenir plusieurs analyses statistiques et visuelles et permet par la suite la détection d'incidents. Celle-ci se divise en deux catégories, soit la détection des délais en gare (départs retardés) et la détection des délais en route (ralentissements et arrêts d'urgence).

7.1.2 Détection d'un incident en gare

La définition d'un incident en gare est plus nuancée qu'elle ne le paraît. Le terme incident représente ici un événement ponctuel qui entraîne une irrégularité de service. Un train quittant une gare en retard n'indique pas à quel moment a eu lieu l'incident. Il

est donc possible que ce retard soit le résultat d'incidents survenus en amont sur la ligne et non pas d'un incident à cette gare. Il devient alors important de distinguer un départ normal en tenant compte d'un retard accumulé précédemment d'un départ problématique dû à un délai à cette gare précisément.

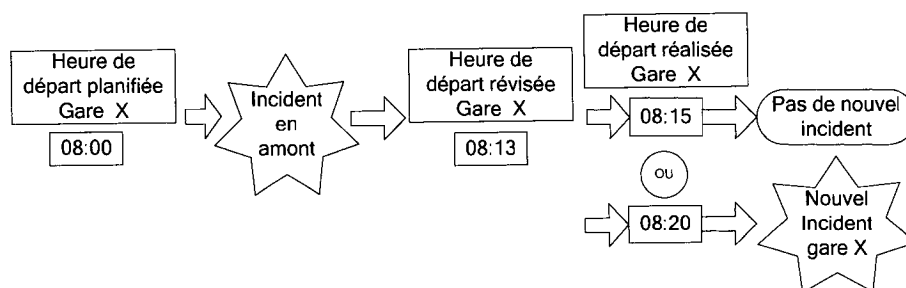


Figure 7.4 Distinction entre un délai causé par un incident précédent ou par un nouvel incident

En somme, la détection d'incidents nécessite l'ajout d'un attribut conservant l'information sur la variation de ce retard en fonction du retard de référence lors du dernier incident. Avec cette technique, un train subissant un retard à une gare, mais poursuivant selon un horaire retardé régulier, est associé à un seul incident. Au contraire, un train accumulant un retard supplémentaire à plusieurs gares tout au long de son trajet est associé à une série d'incidents.

7.1.3 Détection d'un incident en route

Cette deuxième section est plus complexe, car le retard sur un parcours se calcule non seulement par rapport à l'heure d'arrivée prévue, mais aussi en détectant une variation majeure au profil de vitesse régulier décrit au chapitre 5. En effet, une dérogation à ce profil entraîne nécessairement un retard. Le profil de vitesse très régulier du train de banlieue permet donc le développement d'une méthodologie de détection d'incident en route, et ce, dès la réception de chaque relevé de position. Deux bases de référence sont disponibles pour calculer un écart, soit la vitesse régulière, soit la relation distance parcourue - temps écoulé. Les deux sont intimement reliées, mais certaines nuances permettent de ne pas considérer la distance parcourue. En effet, connaissant la distance

depuis la gare de départ, il est possible d'en déduire le temps normal pour réaliser ce parcours. Par contre, il est fréquent qu'une perte de signal ou une mauvaise affectation de train empêche de connaître la gare d'origine et d'en déduire la distance parcourue. De plus, pour les parcours comprenant des limites de vitesse variantes, il devient difficile de conserver une relation générique. Pour ces raisons, l'utilisation du profil de vitesse régulier comme élément de comparaison est retenue. Une procédure en deux temps détermine premièrement un écart à la vitesse habituelle de roulement et deuxièmement, estime le retard accumulé.

Un incident se détecte par un écart au profil de vitesse régulier. L'écart acceptable consiste en une tranche de plus ou moins 8 mi/h autour de la vitesse attendue. En effet, un écart de 9 mi/h pour un trajet type de 2 miles à une vitesse type de 50 mi/h entraîne environ 30 secondes de retard. Les retards en deçà de cette valeur peuvent être négligés. La figure 7.5 illustre un écart problématique. Pour calculer le retard associé à cet écart, on suppose qu'au moins deux enregistrements consécutifs doivent présenter une vitesse sous la zone acceptable. La formule suivante permet alors de déterminer le

délai accumulé entre ces deux positions :
$$Délai_{t_2,t_1} = \frac{(vit_{reg1} + vit_{reg2})/2}{Dist_2 - Dist_1} - (t_2 - t_1).$$

Cette formule consiste à effectuer la différence entre le temps écoulé réellement et le temps écoulé en prenant la vitesse moyenne habituelle entre les deux points. Pour chaque point sous la normale suivant, le même raisonnement est appliqué pour un calcul cumulatif du retard. Lorsque le retard atteint 1 minute, on considère que l'heure d'arrivée prévue doit être repoussée et lorsque le retard dépasse 3 minutes, on considère qu'un incident majeur est survenu.

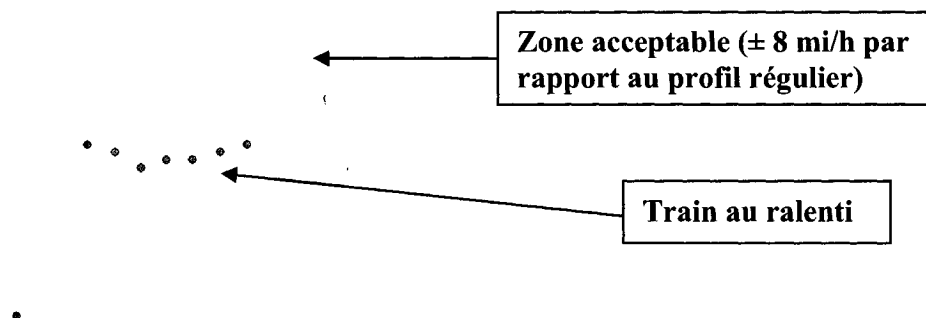


Figure 7.5 Exemple d'un train au ralenti déterminé par un écart à la zone de vitesse acceptable

La détection d'un incident en temps réel autorise la génération d'un rapport (présenté au tableau 6.2) interactif indiquant la nature de l'incident et le retard cumulé en ce point. Couplé avec les rapports provenant des autres locomotives, un portrait complet de la situation actuelle est dépeint et ouvre la voie à une prédiction sur l'évolution de la situation pour des fins de dissémination de l'heure d'arrivée.

7.2 Prédiction de l'heure de départ

La prédiction de l'heure de départ constitue le deuxième module de traitement de l'information temps réel (figure 7.3). La prédiction de l'heure d'arrivée en gare s'effectue après la détection d'un premier incident. Ce choix résulte dans le fait qu'aucune donnée utilisée dans cette recherche ne permet d'émettre une prédiction de retard avant même qu'un premier délai se manifeste.

7.2.1 Élaboration de la procédure

La prédiction de l'arrivée est une opération délicate, car elle peut avoir des conséquences négatives sur certains indices de performance. Pour illustrer ce phénomène, imaginons que l'on détecte un train en retard de 8 minutes en début de ligne et que l'on diffuse cette information aux gares en aval. Si jamais le train arrive en

retard de 4 minutes seulement, cela équivaut à une avance de 4 minutes sur l'heure annoncée, ce qui est inacceptable au niveau des usagers. Le train devrait donc être retenu en gare pour satisfaire à cet horaire temporaire. De ce fait, le retard devient plus grand qu'il aurait dû l'être. La prédiction doit donc évaluer plusieurs phénomènes pour essayer de développer un modèle prédictif fiable. Voici quelques considérations préliminaires :

- La prédiction de l'heure d'arrivée en gare et sa validation nécessitent un paramètre d'entrée de base, soit la quantification du retard au temps présent. La section précédente démontre que cela peut être fait à tout moment, soit en route, soit en gare.
- Connaissant le retard à un moment x et sa cause, les scénarios de rattrapage ou d'accumulation du retard doivent être étudiés.
- Les filtres de Kalman qui prennent en compte les passages précédents du train représentent la technique la plus utilisée dans la littérature pour la prédiction de temps de parcours. Ce modèle tient compte des conditions dynamiques du système pourvu que ces conditions persistent un certain temps (Welch, Bishop, 2006).
- Il importe aussi de déterminer les dispositions englobant l'émission d'une mise à jour de l'heure de départ.

La littérature propose plusieurs modèles de prédiction s'appliquant à des systèmes de transport à haute fréquence et sensible aux conditions de trafic. Le chapitre 2.3 présente la théorie sur le sujet. Les modèles de prédiction sont appuyés par des modèles mathématiques comme les filtres de Kalman. Par contre, le cas du train de banlieue est différent puisque la nature des incidents est très variable et dans, plusieurs cas, non corrélée aux incidents précédents. De plus, la faible fréquence permet la poursuite d'un service normal pour les trains suivant un train retardé. À la lumière de l'analyse des incidents, certaines généralités sont déduites :

- Comme un train ne rattrape généralement pas son retard, l'hypothèse qu'un retard accumulé à une gare i par un train tr engendre un retard équivalent pour tous les départs restants du train tr est posée.

- Les limites de vitesse temporaires vont engendrer un délai supplémentaire sur tous les trains durant l'application de la limite.
- Dans le cas où un train accumule un retard se rapprochant de l'intervalle qui le sépare du prochain train à l'horaire et sachant qu'aucun dépassement de train n'a été identifié précédemment, on suppose que le train suivant subira aussi un retard en fonction des distances de sécurité en vigueur.
- Il n'est pas possible de prédire fidèlement les comportements des trains suite à de très grands retards (60 minutes et plus), des pannes majeures, ou toute autre situation exceptionnelle nécessitant des modifications à l'horaire habituel.

La figure 7.6 résume les principales causes de délais et méthodes utilisées pour leur estimation. Les temps de parcours étant sensibles aux limites de vitesse temporaires, une estimation par filtre de Kalman est proposée. Par contre, les délais en gare semblent très spécifiques à un train et par conséquent ne peuvent être généralisés aux trains subséquents. De ce fait, ils ne font pas l'objet d'estimation. Aussi, les distances de sécurité faisant l'objet de règles strictes, leur application est réalisée de manière déterministe. Finalement, le modèle doit permettre des interventions manuelles provenant des délais planifiés sur la ligne ou en réaction à un événement majeur.

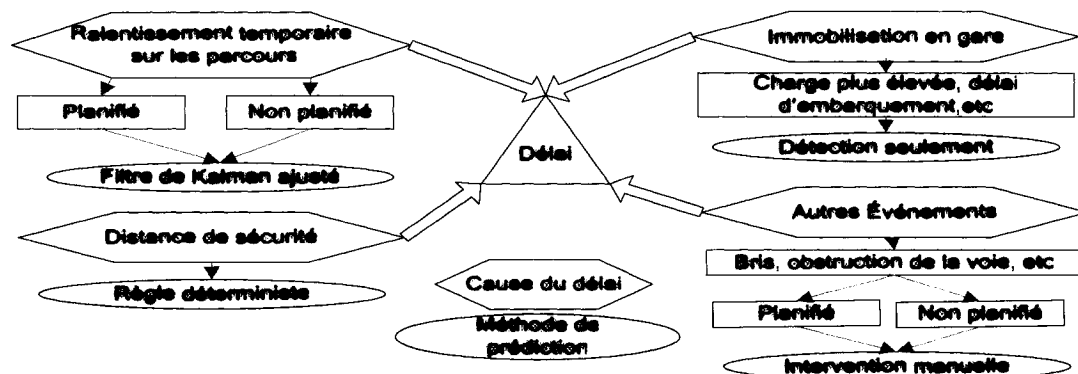


Figure 7.6 Différentes causes de délais à modéliser dans la procédure d'estimation des heures de départs

La première expérimentation implémente une solution simpliste servant de barèmes aux autres expérimentations. Cette solution considère que l'heure de départ estimée (HDE) pour un train i à la gare tr est égale au maximum entre l'heure de départ planifiée (HDP) additionnée de la valeur actuelle du délai (DA) pour ce train et l'heure de départ estimé du train précédant additionnée du délai de sécurité (DS).

$$HDE_{i,tr} = \text{MAX}(HDP_{i,tr} + DA_{tr}, HDE_{i,tr-1} + DS)$$

L'heure d'arrivée estimée (HAE) peut aussi être dérivée à partir de l'heure de départ estimée et du temps de parcours habituel (TP) sur le parcours p entre i et $i-1$.

$$HAE_{i,tr} = HDE_{i-1,tr} + TP_p$$

Cette solution prévoit une modification de l'heure estimée de départ à chaque variation du délai ΔD de plus de x minutes à l'horaire. De plus, l'heure de départ réel (HDR) est comparée à chaque estimation HDE en prenant soin de déterminer le temps écoulé entre l'heure où l'estimation est produite et le départ réel de la gare (délai d'estimation DE).

La deuxième solution expérimentée ajoute un filtre de Kalman dynamique sur les délais de parcours. Le développement du filtre est basé sur des recherches antérieures (Shalaby, Farhan 2003; Welch, Bishop, 2006). Le filtre de Kalman ajuste l'état du système à certains intervalles de temps et à chaque nouvel enregistrement sur l'état du système. Le temps de parcours estimé DPE sur un segment k au temps t est recalculé pour chaque nouvelle mesure de temps de parcours (DPM). Les mises à jour de temps et les mises à jour de mesures sont ici couplées en une seule itération pour fin de simplification. Voici la structure du filtre :

$$K_t = \frac{P_{t-1} + Q}{P_{t-1} + Q + R}$$

$$DPE_t = DPE_{t-1} + K_t(DPM_t - DPE_{t-1})$$

$$P_t = (1 - K_t)(P_{t-1} + Q)$$

Où Kt désigne la mesure du gain et Pt indique la mesure de l'erreur à cette itération. Q et R représentent les variances du système dans le temps et des mesures. La variance se calcule à partir des n derniers délais de parcours de la journée.

$$Q = R = \frac{\sum_{i=1}^n (DP_i - \overline{DP})^2}{n}$$

On considère comme valeur initiale un délai estimé DPE nul et une erreur P de 1. Ce choix est arbitraire, mais devrait converger rapidement. Ici la valeur DPE_0 peut prendre la valeur d'un délai prédéfini, par exemple associé à une limite de vitesse temporaire planifiée à l'avance. De ce fait, le filtre considère le délai comme la norme au départ.

$$DPE_0 = 0 \text{ ou } DPE_0 = \overline{DP}$$

$$P_0 = 1$$

Le délai estimé DE au départ de la gare i pour un train spécifique tr dépend du délai actuel DA de ce train, de la somme des délais estimés sur chaque segment entre la gare i et la position actuelle du train j et de la somme d'autres délais planifiés $DPlan$.

$$DE_{i,tr} = DA_{tr} + \sum_{p=i}^j DPE_p + \sum DPlan$$

$$HDE_{i,tr} = MAX(HDP_{i,tr} + DE_{i,tr}, HDE_{i,tr-1} + DS)$$

$$HAE_{i,tr} = HDE_{i-1,tr} + TP_p + DPE_p$$

7.2.2 Résultats

L'estimation préliminaire des heures d'arrivée en gare pour la journée problématique du 2 septembre 2003 engendre l'émission de 295 prédictions pour les trains de l'heure de pointe AM seulement. Le tableau 7.1 décrit la table utilisée pour enregistrer chaque prédiction. Pour cette première expérimentation, une prédiction est émise suite à une variation de plus de 1 minute sur le délai estimé du train, et ce, après l'estimation d'un retard initial de plus de 3 minutes. La figure 7.7 illustre les 16 prédictions émises pour

le train 112 à la gare Montréal-Ouest. Dès 7h26 (36 minutes avant le départ planifié), une première prédiction du retard est réalisée. Par la suite, de nouvelles prédictions du retard se succèdent suite à l'arrivée de nouvelles informations concernant le retard réel du train pour finalement émettre une dernière prédiction environ 5 minutes avant le passage du train. Trois conclusions sont tirées de ce graphique. Premièrement, l'émission d'une prédiction d'un délai suivie d'une prédiction d'un délai moins important n'est pas souhaitable pour les raisons évoquées à la dernière section. De plus, la dernière estimation suppose un départ estimé plus tardif que le départ qui sera effectivement réalisé. Cette situation est aussi à proscrire car elle représente un départ en avance pour la personne se fiant à l'estimation. Finalement, l'estimation doit tendre vers une prédiction plus précise et plus rapidement, soit le coin supérieur gauche de la zone objectif.

Tableau 7.1 Table comprenant l'ensemble des prédictions émises

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Description
idPredit	71592	78900	Long Integer	Clé primaire
idGenOri	14	5	Long Integer	Identificateur de la gare de départ
idGenDesti	13	3	Long Integer	Identificateur de la gare d'arrivée
NoTrain	20	112	Text	Identificateur de train
HeureEstime	08:22:45	08:04:31	Date/Time	Heure estimée de passage
HeureEstimation	08:22:49	07:03:49	Date/Time	Heure où l'estimation est réalisée
DateJour	2003-08-22	2004-04-28	Date/Time	Date

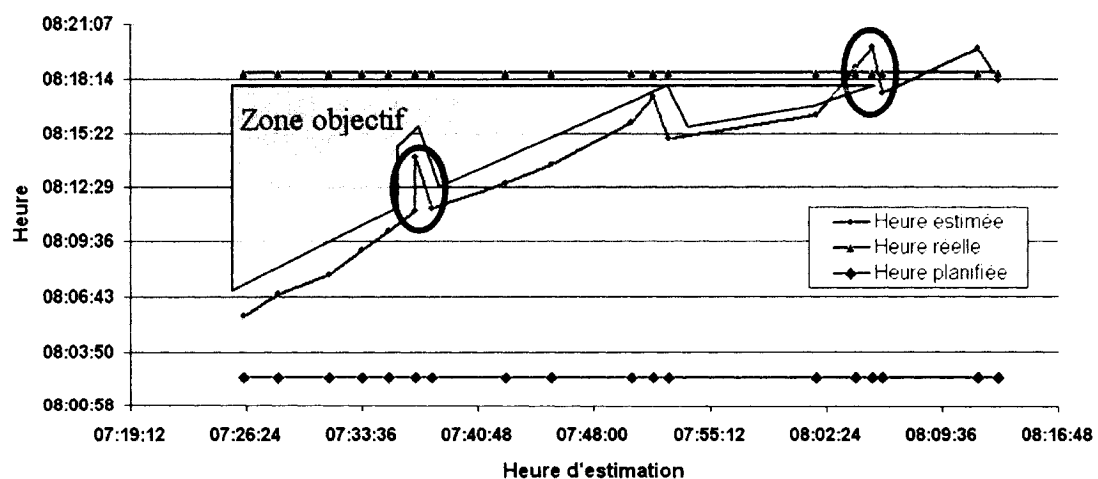


Figure 7.7 Simulation des différentes estimations de l'heure de départ du train 112 à la gare Montréal-Ouest le 2 septembre 2003

Suite à l'analyse des irrégularités mises à jour par le graphique précédent, la révision des procédures *Access* pour le calcul du retard révèle quelques erreurs d'implémentation. La figure 7.8 reprend la même simulation avec les correctifs. De plus, l'estimation réalisée avec et sans le filtre de Kalman permet d'en apprécier sa valeur. Celui-ci permet ici de gagner deux minutes en précision pour trois estimations. Le filtre n'apporte rien de plus pour les segments n'enregistrant pas de variation de temps de parcours.

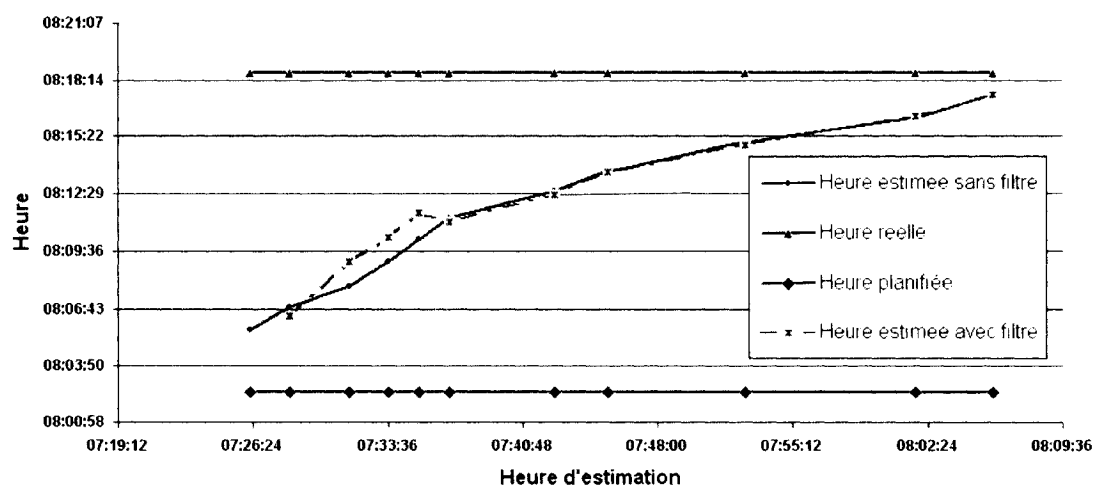


Figure 7.8 Reprise de la simulation avec correctifs.

L'analyse graphique est reprise pour les autres trains de cette journée et présente des résultats semblables à l'exception du train 16 illustré à la figure 7.9. Celui-ci exhibe en effet un rattrapage d'environ 3 minutes, invalidant ainsi l'heure de départ estimé. Bien que ces rattrapages soient rares, il est possible que certains trains réussissent à gagner quelques minutes. Dans le cas présent, la charge du train 16 est largement diminuée par le passage retardé des trains précédents, ce qui peut expliquer ce comportement.

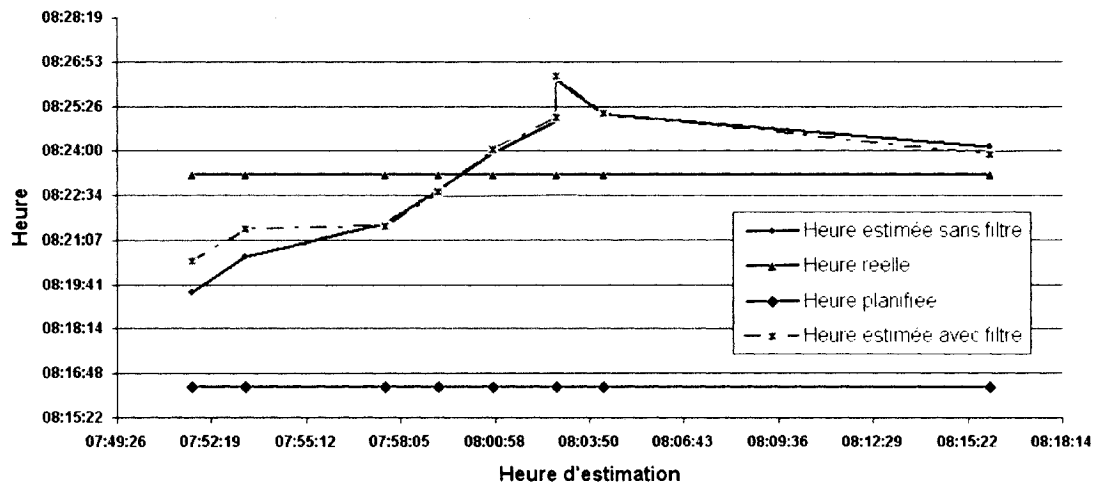


Figure 7.9 Simulation des différentes estimations de l'heure de départ du train 16 à la gare Montréal-Ouest le 2 septembre 2003. Cas d'un train qui rattrape légèrement son retard.

L'application de la procédure pour les trains en pointe AM sur la période complète à l'étude engendre plus de 8949 émissions de prédictions de l'heure de départ. La figure 7.10 présente la distribution de l'erreur entre l'estimation et la réalisation de l'heure de passage. L'ensemble des estimations améliore l'heure de passage planifiée à l'exception des estimations qui sont devancées par le départ réel du train. Cette zone représente 30% des estimations. Par contre, il est possible de forcer une sous-estimation de la prédiction pour corriger ce problème. Cette opération équivaut à translater vers la droite le graphique ci-dessous. Par exemple, pour une sous-estimation de 3 minutes, la zone inacceptable chute à 10% environ.

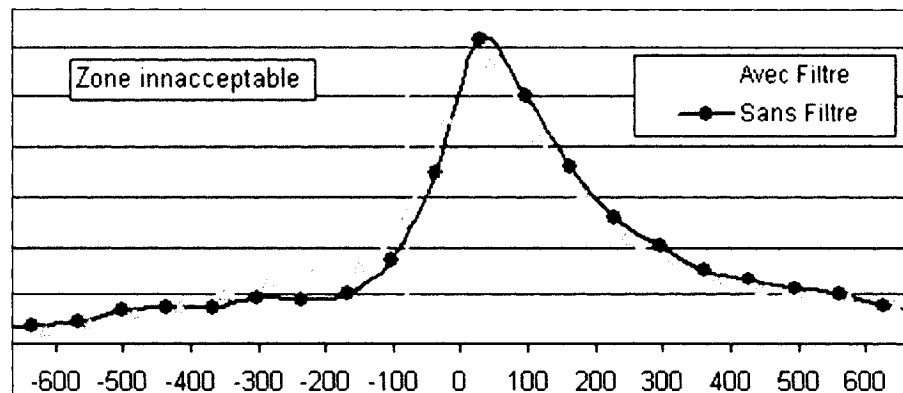


Figure 7.10 Distribution de la différence en seconde entre l'heure de départ réelle et l'heure de départ estimée. Une différence négative signifie que le train devance l'heure de départ estimée.

Le tableau 7.2 compare la qualité de ces estimations en fonction de l'utilisation du filtre de Kalman.

Tableau 7.2 Qualité des estimations avec l'ajout d'un filtre de Kalman

	Nombre d'estimation	%
Plus précises	1564	24.8%
Moins précises	292	4.6%
Précisions semblables	4438	70.5%

La figure 7.11 illustre l'effet des estimations sur la distributions des écarts à l'horaire. Les estimés procurent des résultats plus près de l'heure de passage réelle, par contre les passages en avance sur l'heure prédite sont plus fréquents qu'avec l'heure planifiée.

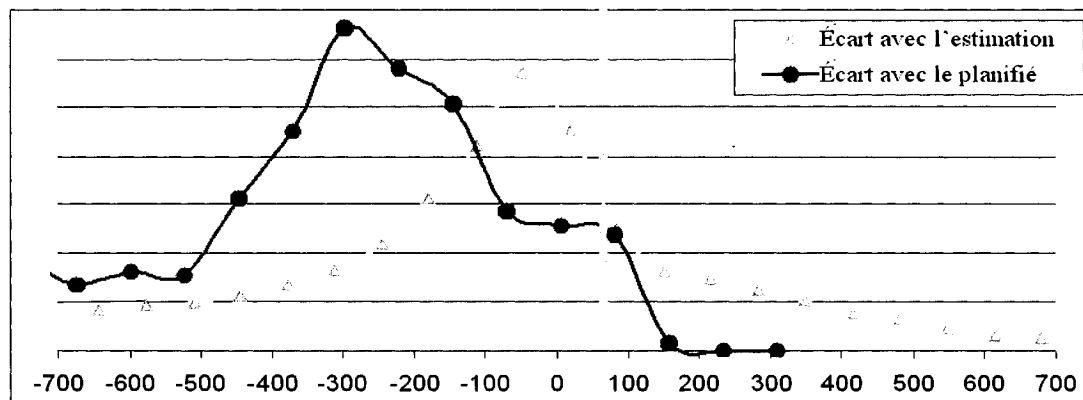


Figure 7.11 Distribution des écarts à l'horaire planifié vs distribution des écarts à l'horaire estimé.

À priori, l'utilisation du filtre est à conseiller, mais l'étude des résultats démontre que le filtre a pour effet d'augmenter le nombre d'estimations devançant l'heure de départ réelle. Ce résultat s'explique par la non-corrélation entre le ralentissement d'un train entre deux gares et le train suivant. La figure 7.12 illustre un exemple simple de ce genre de situation. Suite au délai cumulé de plus de 15 minutes entre les gares, le filtre de Kalman estime un délai d'au moins huit minutes sur le prochain temps de parcours. Ce délai ne se produisant pas, l'heure de départ estimée se retrouve trop retardée.

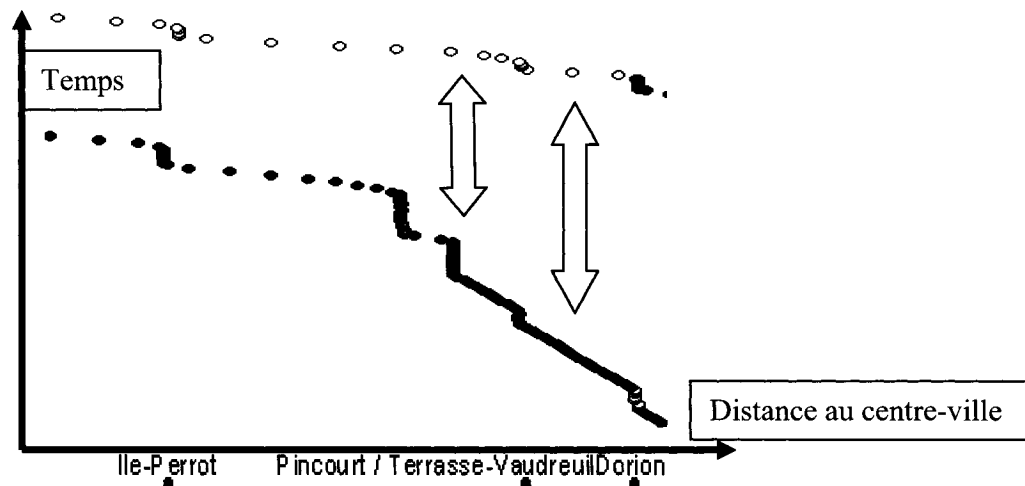


Figure 7.12 Exemple de faible corrélation entre un passage subissant un ralentissement interstation et le passage suivant.

X : Distance (miles) Min : 20.5 Max : 23.6 Y : Temps (Échelle relative) Min : 7h32 Max : 8h22 Z : Retard (Sec) Min - 1683, Max 0	Échantillon : 122 enregistrements Autre : Train 16 et 20 le 16 février 2004.	Échelle de couleur (sec de retard) ■ -41785 - -300 ■ -300 - -180 □ -180 - -60 ■ -60 - 60 ■ 60 - 285
---	---	--

En résumé, un algorithme de prédiction doit définir l'impact d'une prédiction trop tardive et générant un passage en avance du train par rapport à cette prédiction. À cet effet, une sous-estimation volontaire est envisageable pour éviter ce genre de situation. De plus, l'utilisation d'un filtre de Kalman sur les temps de parcours semble améliorer légèrement les estimations. Par contre, il occasionne aussi des erreurs majeures lorsque la corrélation entre deux temps parcours subséquents est faible. L'estimation dynamique de cette corrélation pourrait possiblement être réalisée à partir de facteurs externes et ainsi améliorer l'utilisation de ce genre de filtre.

Le modèle simple de prédiction des heures de départ s'est avéré applicable dans un contexte temps réel, procurant une information de meilleure précision que l'horaire planifié. Malgré cette amélioration généralement notable par rapport à une heure de départ planifiée, la prédiction des heures de départs demeure une opération délicate lorsque mise dans un contexte usager. L'implémentation de la procédure proposée se

veut une première exploration des techniques de prédictions basées sur les résultats obtenus précédemment dans cette recherche. L'analyse approfondie de plusieurs scénarios de prédiction et d'adaptation du modèle outrepassé les objectifs fixés.

Chapitre 8. Conclusion

« Sur la terre, deux choses sont simples : raconter le passé et prédire l'avenir. Y voir clair au jour le jour est une autre entreprise. » (Armand Salacrou)

Issue d'un historique GPS provenant des locomotives d'une ligne de train de banlieue, cette recherche a structuré une expérimentation adressant les questions de performance du service de transport offert. Pour ce faire, la dynamique spécifique d'un train évoluant dans la complexité du transport urbain collectif a été définie dans le cadre d'une analyse de performance. La littérature contient différentes définitions de qualité, performance et indicateur pertinents, mais la pierre angulaire demeure la perspective usager, quantifiable en terme de ponctualité et temps de parcours. La suite de la recherche s'est donc articulée autour de ces deux indicateurs.

La revue de littérature s'est ensuite penchée sur l'outil de mesure utilisé, le GPS. Celui-ci devenant un outil privilégié dans le monde du transport et de la mobilité urbaine, plusieurs récentes applications pertinentes aux mesures de performance ont démontré la qualité de cet outil à offrir des indicateurs de haute précision, fréquence et résolution. Par contre, cette richesse informationnelle peut devenir un borbier difficilement exploitable et des efforts d'organisation, de description et de dérivation synthétique d'information s'imposent.

Puis, face à un problème spatio-temporel de taille importante, le monde en pleine effervescence de l'analyse, la gestion et la visualisation de phénomènes multidimensionnels sont abordées. À ce titre, les SIG constituent des systèmes d'avant-garde par leur approche à trois niveaux : organisation des données, traitement et présentation. À cet effet, l'effort soutenu de structuration de l'information dans une base de données facilite l'intégration des procédures de traitement et l'exportation vers

des outils externes. De plus, la conservation de l'intégrité des données originales et la minimisation de l'utilisation de données externes constituent des enjeux majeurs maximisant la portabilité des analyses. Au niveau de la couche présentation, la visualisation de phénomènes dynamiques, spatio-temporels et pluridimensionnels est un domaine en pleine évolution, mais où l'atteinte d'un équilibre entre complexité et clarification demeure un défi à relever.

Basés sur la littérature, la performance d'un train de banlieue, le GPS, l'analyse et la visualisation de données spatiotemporelles démontrent que ces sujets sont actuels, riches et effervescents au sein de la communauté scientifique. Toutes ces connaissances gravitent autour de plusieurs questions de transport. Appliquées dans ce mémoire à la question de la performance du train, elles se transforment en un outil de diagnostic haute définition.

À cet effet, le premier chapitre des expérimentations a décrit notre sujet d'étude dans les plus fins détails. La référence linéaire et l'utilisation d'un SIG comme outil de présentation de données partiellement spatiales ont ouvert la porte à la découverte d'un profil de vitesse d'une très haute régularité offrant ainsi une approche par segmentation. L'automatisation des calculs de temps de parcours a permis de caractériser l'ensemble des parcours sur la période d'étude. Limites de vitesse, distance de sécurité, type de parcours, temps de parcours, temps d'attente forment un portrait décrivant l'allure générale de la ligne et des différentes dynamiques s'y produisant. L'effet révélateur escompté est donc atteint.

Connaissant mieux notre objet d'analyse et ces habitudes régulières, le deuxième chapitre exploite ce nouveau coffre à outils pour identifier le moindre comportement anormal, d'en déterminer l'origine spatio-temporelle ainsi que la cause dynamique. Une exploitation poussée des représentations interactives à l'aide de modèles numériques de terrain, d'animation et de visualisation multidimensionnelle a démontré

l'aptitude à détailler et clarifier un phénomène évoluant sur une période variable passant d'une vision sur plusieurs mois à une haute précision à la seconde. Par contre, la dualité entre une visualisation simple et clarifiante et une représentation complexe mais confondante demeure un problème. Le développement d'une visualisation complexe doit s'assurer d'un maximum de clarté, respectant ainsi le défi méthodologique de Manheim.

Une courte réflexion sur l'impact des indicateurs de performance sur les usagers a dégagé une multitude de questionnements entourant la définition floue de la ponctualité. En effet, les délais transposés dans la perspective des usagers confrontent l'interprétation des indicateurs de ponctualité. Le délai vécu en train ou en gare n'a pas le même impact. Un train en retard de 20 minutes à une gare, mais dont le train précédant, en retard aussi, a embarqué les passagers n'engendre pas la même quantité de retard. Ces nuances remettent en question les indicateurs de ponctualité, ceux-ci ne reflétant peut-être pas la perspective usager.

Malgré ces questions, le rôle proposé de paparazzi dont l'objectif était de capturer chaque incident et de les représenter le plus fidèlement possible est réussi en identifiant finement les journées problématiques, leurs causes et conséquences. Par la suite, le dernier chapitre a démontré qu'un calcul désagrégé du retard basé sur une différenciation avec les éléments réguliers découverts dans cette recherche permettait une détection des incidents en temps réel. Puis, l'ultime tentative de prédire les heures de départ s'est avérée plus complexe. Le cas du train ne respectant pas la plupart des modèles s'appliquant aux véhicules sensibles au trafic, le développement d'une procédure alliant quelques règles découvertes et un filtre de Kalman sensible aux derniers temps de parcours a permis de démontrer qu'une telle procédure peut rapprocher l'heure de départ prédite de l'heure de départ réelle. Par contre, plusieurs situations entraînent des résultats pouvant être considérés comme inacceptables, comme la question des départs devançant une heure de départ prédite.

Pour conclure, cette recherche démontre l'applicabilité d'une approche à trois niveaux comprenant une base de données GPS structurée, des procédures de traitement pour la dérivation d'information et une couche présentation complexe illustrant en détail la dynamique du service offert, les caractéristiques physiques du système, les indicateurs de performances et les incidents. Il en résulte un outil de diagnostic de haute résolution. Un historique GPS recèle d'une information de haute qualité et la présente recherche démontre qu'une exploitation coordonnée de celle-ci devient une base de référence, un modèle empirique capable d'offrir au planificateur une vision d'ensemble et agrégée du service offert ainsi qu'une décomposition désagrégée offrant la résolution nécessaire à la compréhension d'un comportement déviant et au développement de services automatisés de dissémination d'information temps réel.

D'un point de vue plus général, il est possible d'évaluer le niveau de maturité¹ du processus informationnel appliqué dans cette recherche. En effet, ce mémoire est lui-même qualifiable en terme de performance, standardisation, qualité et amélioration continue. À cet effet, cette recherche applique une méthode spécifique, répétable, comprenant un contrôle de qualité de base, ce qui constitue un niveau de maturité initial. L'atteinte d'un niveau plus élevé soulève une série de recommandations.

Premièrement, un contrôle de la qualité permanent s'impose pour filtrer automatiquement les principales problématiques soulevées dans le mémoire soit : les erreurs dues à la technologie GPS même; les assignations de trains erronées et les journées marquées par des perturbations de service majeures. Aussi, l'utilisation d'un horaire reconstruit comme base de référence ne respecte pas la définition pure de ponctualité, associée à un horaire planifié disséminé aux usagers. De plus, la mise en contexte de chaque résultat selon la perspective usager ou la perspective de l'opérateur

¹ Inspirée des niveaux de maturité d'un processus de développement logiciel (CMM du Software Engineering Institute)

nécessite un apport de données externes au processus et une définition empirique harmonisée du concept de ponctualité. La présentation des données constitue un domaine en constante évolution et devrait permettre une amélioration continue de la visualisation des résultats. Enfin, l'application de ce procédé pour des fins de prédiction et de dissémination temps réel nécessite une étude plus approfondie axée sur l'impact usager d'un tel service et sur les conséquences provenant des inéluctables erreurs du domaine de la clairvoyance.

Finalement, la «scrutinisation²» du train de banlieue aura révélé un athlète de haut calibre, répétant (assez souvent ?) un parcours d'une régularité exemplaire. Lui, qui chaque jour semble défiler sur une allure monotone en direction des banlieues montréalaises, peut maintenant bénéficier de clichés hautement détaillés révélant des performances parfois hors du commun. Au programme d'entraînement de l'athlète s'ajoute maintenant un ensemble d'outils d'analyse et de visualisation, supplément vitaminé pour de meilleures performances et pour s'assurer une santé de *fer* !

« *C'est en revenant de Rigaud : Hein hon fi ton rigolo* » (La Famille Soucy)

² Traduction libre de l'anglais « scrutinize » : To examine or observe with great care; inspect critically.

Références

AMT (2006). Rapport Annuel 2005 - 10 ans de parcours. 63 pages.

AMT. (2006). Site web de la l'Agence Métropolitaine des Transports. Page consultée le 7 juin 2006, tiré de www.amt.qc.ca

AXHAUSEN, K. W. (2000). Presenting and Preserving Travel Data. Transportation Research E-Circular, E-C008, 23 pages.

BELLISS, G. (2004). Detailed Speed and Travel Time Surveys using Low Cost GPS Equipment. IPENZ Transportation Group Technical Conference, 13 pages.

BERTINI, R. L. et EL-GENEIDY, A. (2003). Generating transit performance measures with archived data. Transportation Research Record, 1841, 109-119.

BISSON, B. (2005). Trains de banlieue. La Presse, 7 mars 2005, p. A1.

BULLOCK, P., JIANG, Q. et STOPHER, P. (2005). Using GPS Technology to Measure On-Time Running of Scheduled Bus Services. Journal of Public Transportation, 8(1), 20 pages.

CALCCIT. (2005). Automatic Vehicle Location. Page consultée le 12 juin 2006, tiré de http://www.calccit.org/itsdecision/serv_and_tech/Automatic_vehicle_location/automatic_vehicle_location_summary.html

- CAO, G. et CHAPLEAU, R. (2006). Visualisation 3D des objets du transports urbain : tendance ou chinoiserie? 41e congrès annuel de l'AQTR, Québec, 13 pages.
- CHAPLEAU, R. (1992). La modélisation de la demande de transport urbain avec une approche totalement désagrégée. World Conference on Transportation Research, Lyon, 20 pages.
- CHAPLEAU, R. (2002). CIV3601 - Système de transport - Plan de cours. École Polytechnique de Montréal.
- CHAPLEAU, R. (2004). Visual-is-action du transport urbain. 39e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Québec, 21 pages.
- CHAPLEAU, R., ALLARD, B., TRÉPANIÉ, M. et MORENCY, C. (2002). TRAIN : Théorie de la Relativité Analysée Interactivement... à Nouveau. 37e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Québec, 23 pages.
- CHAPLEAU, R. et MORENCY, C. (2003). Étude de la mobilité en Complémentarité et Compétitivité ($E=mc^2$): le cas du train à Montréal. Routes et transports, 32(2), 5-17.
- COCG. (2006). GéoBase Canada. Page consultée le 10 juillet 2006, tiré de <http://www.geobase.ca>
- CONNOR, P. (2005). Train Operations. Railway Technical Web Pages. Page consultée le 7 mai 2006, tiré de <http://www.railway-technical.com/>.
- DORVAL, P. (2005). Train performance calculator worksheet, AMT: Excel Worksheet, développé à l'AMT. AMT.

- DUEKER, K. J. et TON, T. (2002). Geographical information systems for transport. In D. Hensher and K. Button, Handbook of Transport Modelling (1, pp 253-268). Pergamon/Elsevier Science.
- FERREIRA, O. (2004). GPS TrackMaker – Help File. Page consultée le, tiré de <http://www.gpstm.com>.
- FEXPE, E. S., WINDHOLZ, T., BEARD, K. et NOVAK, K. (2003). Quality and Accuracy of Positional Data in Transportation. NCHRP Report 506. Washington. Transportation Research Board.
- FHWA (1998). Travel Time Data collection Handbook. Report No. FHWA-PL-98-035. Washington. Federal Highway Administration.
- FOUR, S., GUIVARCH, C. et LAFON, X. (2004). La valeur du temps. École Nationale des Ponts et Chaussées.
- FTA - DOT (2005). Best Practices for Using Geographic Data in Transit: A Location Referencing Guidebook. Report Number: FTA-NJ-26-7044-2003.1. Washington. Federal Transit Administration U.S. Department of Transportation.
- FURTH, P. G., HEMILY, B. J., MULLER, T. H. J. et STRATHMAN, J. G. (2003). Uses of Archived AVL-APC Data to Improve Transit Performance and Management: Review and Potential. TCRP WebReport 23. Washington. Transportation Research Board.

GARMIN. (2000). GPS Guide for beginners. Page consultée le 13 juin 2006, tiré de <http://www.garmin.com>

HÄGERSTRAND, T. (1970). What about people in spatial science? Papers of the Regional Science Association, 24, 7-21.

HENSHER, D., STOPHER, P., BUTTON, K. et HAYNES, K. (2004). Handbook of Transport 5: Transport Geography and Spatial Systems. Pergamon/Elsevier Science.

HILL, J. et BOND, L. (1995). Modelling moving block railway signalling systems using discrete event simulation. Bath, England. School of Electronic and Electrical Engineering, University of Bath.

HOESCHEN, B., BULLOCK, D. et SCHLAPPI, M. (2005). Estimating intersection control delay using large data sets of travel time from a global positioning system. Transportation Research Record(1917), 18-27.

HOROWITZ, A. J. (2004). The vehicle : Propulsion and resistance. Page consultée le 6 juin 2006, tiré de <http://www.uwm.edu/~horowitz/PropulsionResistance.html>

IEEE. (2005). IEEE Reliability Society - Reliability Engineering. Page consultée le 6 juin 2006, tiré de

JARA-DÍAZ, S. R. (2002). Allocation and valuation of travel-time savings. In D. Hensher and K. Button, Handbook of Transport Modelling (1, pp 303-318). Pergamon/Elsevier Science.

KIMPEL, T. J., STRATHMAN, J. G. et CALLAS, S. (2004). Improving Scheduling Through Performance Monitoring Using AVL and APC Data. Portland. Center for Urban Studies, College of Urban and Public Affairs, Portland State University.

KIMPEL, T. J., STRATHMAN, J. G. et DUEKER, K. J. (2000). Time Point-Level Analysis of Passenger Demand and Transit Service Reliability. Portland. Center for Urban Studies, College of Urban and Public Affairs, Portland State University.

KOWOMA GPS. (2005). Position Determination with GPS. GPS - explained. Page consultée le 13 juin 2006, tiré de <http://www.kowoma.de/en/gps/positioning.htm>

LIN, W.-H. et BERTINI, R. L. (2004). Modeling schedule recovery processes in transit operations for bus arrival time prediction. Journal of Advanced Transportation, 38(3), 347-365.

LIN, W.-H. et ZENG, J. (1999). Experimental study of real-time bus arrival time prediction with GPS data. Transportation Research Record(1666), 101-109.

MANHEIM, M. L. (1979). Fundamentals of transportation systems analysis. MIT Press series in transportation studies. Cambridge, Mass. MIT Press.

MARCHAL, F. H., J et AXHAUSEN, K. W. (2005). Efficient Map Matching of Large Global Positioning System Data Sets: Tests on Speed-Monitoring Experiment in Zürich. Transportation Research Record (1935), 93-100.

- MILLER, H. J. (2004). Activities in space and time. In D. Hensher, P. Stopher, K. Button and K. Haynes, Handbook of Transport 5: Transport Geography and Spatial Systems (pp 647-658). Pergamon/Elsevier Science.
- MISHALANI, R. G., MCCORD, M. M. et FORMAN, S. F. (2004). Schedule-based and autoregressive bus running time modeling in the presence of driver-bus heterogeneity. 9th International Conference on Computer-Aided Scheduling of Public Transport, San Diego, 18 pages.
- MORENCY, C. (2004). Contributions à la modélisation totalement désagrégée des interactions entre mobilité urbaine et dynamiques spatiales. Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal, Montréal.
- MOVABLE TYPE. (2006). Calculate distance and bearing between two Latitude/Longitude points. Page consultée le 26 juin 2006, tiré de <http://www.movable-type.co.uk/scripts/LatLong.html>
- MULLER, T. H. J. et KNOPPERS, P. (2005). TRITAPT - TRIp Time Analysis in Public Transport. Page consultée le 11 juin 2006, tiré de <http://tritapt.nl/>
- NCHRP (2003). Quality and Accuracy of Positional Data in Transportation. NCHRP Report 506. Washington. Transportation Research Board.
- NEUMANN, A. (2005). Thematic Navigation in Space and Time - Interdependencies of Spatial, Temporal and Thematic Navigation for Cartographic Visualization. Proceedings of the 22nd International Cartographic Congress, A Coruna, Spain, 22 pages.

- OKUNIEFF, P. E. (1997). AVL Systems for Bus Transit. Synthesis of Transit Practice 24. Washington. TCRP.
- OWU. (2004). Geography 222 The Power of Maps. Page consultée le 12 juillet 2006, tiré de http://go.owu.edu/~jbkrygie/krygier_html/geog_222/geog_222_lo/geog_222_lo_13.html
- OXTS. (2005). Comparing Speed and Velocity Measurements from GPS and INS. Page consultée le 13 juin 2006, tiré de http://www.oxts.co.uk/product.asp?active_page_id=199
- PACK, M. L., WEISBERG, P. et BISTA, S. (2005). Four-Dimensional Interactive Visualization System for Transportation Management and Traveler Information. Transportation Research Record(1937), 152-158.
- PATNAIK, J., CHIEN, S. et BLADIKASZ, A. (2004). Estimation of Bus Arrival Times Using APC Data. Journal of Public Transportation, 7(1), 20 pages.
- QUIROGA, C. A. (1997). An integrated GPS-GIS methodology for performing travel time studies. Thèse de doctorat, Louisiana State University, Baton Rouge, 1997.
- QUIROGA, C. A. et BULLOCK, D. (1998). Travel time studies with global positioning and geographic information systems: an integrated methodology. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 6(1-2), 101-127.
- QUIROGA, C. A. et PEREZ, M. (2002). Gett 1.0 - User manual.

- SHALABY, A. et FARHAN, A. (2003). Bus travel time prediction model for dynamic operations control and passenger information systems. 82nd annual meeting of the Transport Research Board, Washington, 15 pages.
- SHALABY, A. et FARHAN, A. (2004). Prediction Model of Bus Arrival and Departure Times Using AVL and APC Data. Journal of Public Transportation, 7(1), 21 pages.
- STI CANADA. (2006). Au sujet des STI. Page consultée le 6 juin 2006, tiré de <http://www.itscanada.ca/francais/aboutits.htm>
- STM. (2006a). Planibus - 10 de Lorimier. Page consultée le 6 juin 2006, tiré de <http://www.stm.info/bus/planibus/10.pdf>
- STM. (2006b). Site web de la Société de Transport de Montréal. Page consultée le 8 juin 2006, tiré de <http://www.stm.info/>
- THE PHYSICS CLASSROOM. (2004). Vectors - Motion and Forces in Two Dimensions. Page consultée le 6 juin 2006, tiré de <http://www.physicsclassroom.com/Class/vectors/vectoc.html>
- THEVENIN, T. (2002). Quand l'information géographique se met au service des transports publics urbains. Thèse de doctorat, Université de Franche-Comté.
- TRB (2003a). Transit Capacity and Quality of Service Manual. Washington. Transportation Research Board.
- TRB (2003b). Real-Time Bus Arrival Information Systems. TCRP Synthesis 48. Washington. Transportation Research Board.

- TRB (2003c). A Guidebook for Developing a Transit Performance-Measurement System. TCRP Report 88. Washington. Transportation Research Board.
- TTC. (2006). Site de la Toronto Transit Commission. Page consultée le 8 juin 2006, tiré de www.ttc.ca
- U.S. DOT. (2006). What is ITS? Page consultée le 6 juin 2006, tiré de http://www.its.dot.gov/its_overview.htm
- VUCHIC, V. (1981). Urban public transportation : systems and technology. Englewood Cliffs, New Jersey. Prentice Hall.
- WELCH, G. et BISHOP, G. (2006). An Introduction to the Kalman Filter. Chapel Hill. Department of Computer Science, University of North Carolina.
- WIKIPÉDIA. (2006a). Fiabilité. Page consultée le 6 juin 2006, tiré de <http://fr.wikipedia.org/wiki/Fiabilit%C3%A9>
- WIKIPÉDIA. (2006b). Définition de diagnostic. Page consultée le 14 juillet 2006, tiré de <http://fr.wikipedia.org/wiki/Diagnostic>
- WOLF, J. (2004). Defining GPS and its capabilities. In D. Hensher, P. Stopher, K. Button and K. Haynes, Handbook of Transport 5: Transport Geography and Spatial Systems (pp 411-431). Pergamon/Elsevier Science.
- WOLF, J., SCHONFELDER, S., SAMAGA, U., OLIVEIRA, M. et AXHAUSEN, K. W. (2004). Eighty weeks of global positioning system traces: Approaches to enriching trip information. Transportation Research Record(1870), 46-54.

ZITO, R., D'ESTE, G. et TAYLOR, M. A. P. (1995). Global positioning systems in the time domain: How useful a tool for intelligent vehicle-highway systems? Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 3(4), 193-209.

Annexe A. PAPII

Cette annexe présente un survol de l'application PAPII (Procédure d'Analyse de la Performance et Identification des Incidents) utilisée dans cette recherche pour automatiser une partie des procédures de traitements de données GPS provenant des locomotives de l'AMT. Développée en VBA *ACCESS*, l'application consiste en une suite de procédure interagissant avec la base de données illustrée ci-dessous.

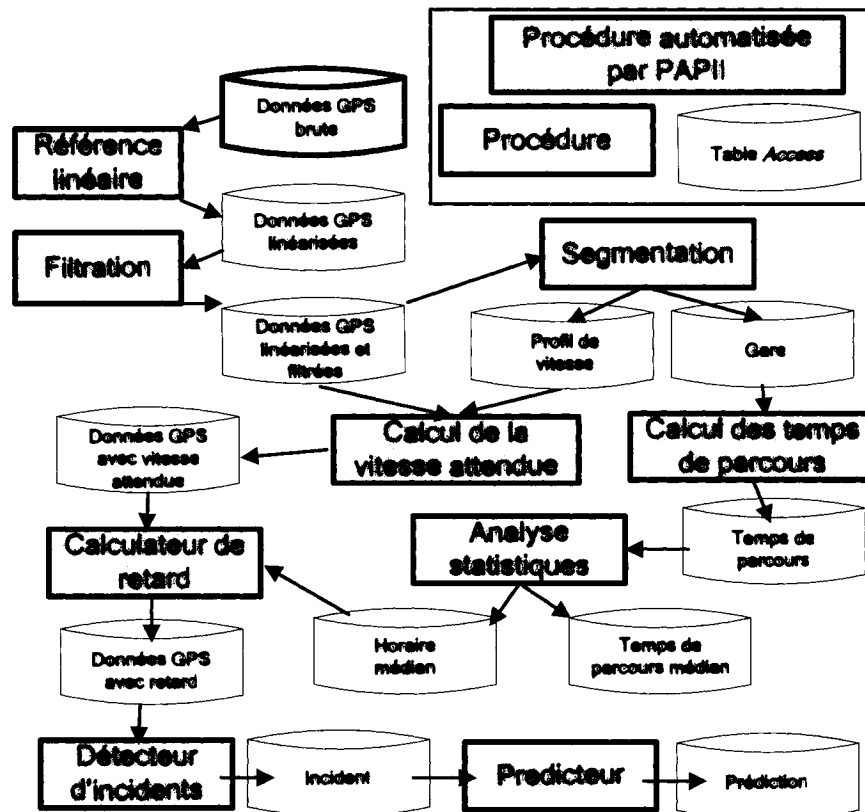


Figure A.1 Procédures automatisées par le logiciel PAPII

Architecture générale

L'application est divisée en 4 modules VBA Access :

- *Le module PAPII.* Module principal parcourant chaque position GPS pour en dériver les entrées et sorties des segments, les temps de parcours et calculer la vitesse attendue. Chaque temps de parcours est envoyé au module Predicteur pour mettre à jour le filtre de Kalman. Ce module fait aussi appel au module de calcul du retard en fonction de la position du point dans le segment tel que définit au chapitre 7.
- *Le module CalculRetard.* Ce module associe à chaque point une estimation du retard et fait appel au détecteur d'incident dans le cas d'un retardement de plus 3 minutes.
- *Le module Detecteur.* Il effectue le suivie de l'évolution du délai d'une locomotive pour en déterminer l'état. Il interagit avec la table *incident* pour conserver le statut de la locomotive et l'évolution de l'incident. Il effectue une vérification de l'évolution du retard et dans le cas d'une variation dépassant un certain seuil, il appelle le module de prédiction pour effectuer une estimation des heures de départ.
- *Le module Prédicteur.* Il reçoit chaque relevé de temps de parcours et mets à jour le temps de parcours estimé. Il permet aussi d'émettre une série de prédictions des heures de départs basée sur les estimations des temps de parcours et les délais actuels du train.

Pour une simulation sur un historique, les modules peuvent être appliqués indépendamment, mais en s'assurant que les données nécessaires en entrées ont été calculées précédemment. La figure A.1 permet d'identifier les préalables pour un module. La figure A.2 présente le menu permettant de démarrer le programme.



Figure A.2 Menu de démarrage

Description des tables

Huit tables et trois requêtes dérivées sont nécessaires au fonctionnement du programme.

La table originale, source de l'ensemble des données dérivées dans cette recherche est décrite ci-dessous.

Tableau A2.1 Table GPSPointAll

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Description
ID	41309	778296	Long Integer	Clé primaire de l'enregistrement
Modem	1320	1327	Text	Identificateur du récepteur GPS
NoTrain	19	22	Text	Numéro de train assigné
CollectionDate	08/06/03	03/26/04	Date/Time	Date d'enregistrement du relevé
CollectionTime	15:08:38	11:19:25	Date/Time	Heure d'enregistrement du relevé
Longitude	-73.57256317	-73.95030975	Number	Longitude
Latitude	45.49319077	45.40790176	Number	Latitude
Speed	16	1	Long Integer	Vitesse en mi/h
Measure	0.2043917	20.19704	Number	Position linéaire en mile
Offset	4.64014E-05	4.56528E-06	Number	Décalage en mile
GPSFileID	73	73	Long Integer	Identificateur de fichier pour GeTT
RouteID	RigaudO	RigaudO	Long Integer	Identificateur de tracé pour GeTT
Comment			Text	Commentaire
VitPredit	22	0	Long Integer	Vitesse attendue à cette position
Retard	-123	-12	Long Integer	Retard calculé à cette position

Contenu : Les données GPS traditionnelles à l'exception du champ NoTrain qui représente une information dérivée préalablement. Les champs en gris constituent les informations dérivées dans cette recherche, les plus pertinentes étant en gras. Measure et Offset proviennent de la référence linéaire, VitPredit du calcul de la vitesse attendue et Retard provient du module de calcul du retard.

Requête dérivée. La requête *qallfilterbyoffset* est utilisée pour trier les points et filtrer selon le offset.

Tableau A2.2 Table Gare

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Description
ID	1	25	Long Integer	Clé primaire de la zone
Nom	Lucien-L'Allier	Dorion	Text	Nom de la gare associée
Debut	0	23.38	Number	Position du début de la zone
Fin	0.20	23.59	Number	Position de la fin de la zone
IdGen	1	17	Long Integer	Identificateur de la gare réelle associée

Contenu : Délimitation des gares (segmentation virtuelle) et association aux gares réelles. Plusieurs segments peuvent être associés à la même gare réelle.

Tableau A2.3 Table TempsLigne

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Description
ID	1458048	1458145	Long Integer	Clé primaire de l'enregistrement
GareOri	19	20	Long Integer	Identificateur de la gare d'origine
GareDesti	18	-1	Long Integer	Identificateur de la gare de destination
Temps	00:01:39	00:01:38	Date/Time	Temps de parcours ou délai en gare
Date	2003-08-08	2003-08-08	Date/Time	Date
Heure	06:08:21	07:38:25	Date/Time	Heure de début de l'intervalle
Train	10	16	Text	Identificateur de train
Modem	1328	1320	Text	Identificateur du modem

Contenu : Chaque parcours effectué par un modem, en tenant compte de l'heure de départ et du temps de parcours. La valeur -1 au champ *GareDesti* indique un temps d'arrêt.

Requête dérivée. La requête *ParcoursAMComplet*, joint l'information sur les gares, l'horaire et le temps de parcours habituel. Cette requête n'est pas nécessaire au fonctionnement du programme.

Tableau A2.4 Table Zones

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Description
Zoneld	14	24	Long Integer	Clé primaire
Debut	7	29.09	Number	Position linéaire du début de la zone
Fin	14.75	29.5	Number	Position linéaire de la fin de la zone
vMaxDeb	50	54	Long Integer	Vitesse maximale à l'entrée de la zone
vMaxFin	50	58	Long Integer	Vitesse maximale à la sortie de la zone
Direction	0	0	Text	Direction Est ou Ouest

Contenu : Délimitation des zones associées à une limite de vitesse où une variation de la limite de vitesse.

Tableau A2.5 Table OD

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Description
ODID	4	31	Long Integer	Clé primaire
Origine	33	13	Long Integer	Identificateur de zone d'origine
Destination	31	12	Long Integer	Identificateur de zone de destination
Direction	0	0	Text	Direction
NoTrain	112	16	Text	Identificateur du train

Contenu : Chaîne origine destination de chaque train. Référence aux segments définis dans la table gare. Le contenu provient d'une analyse statistique sur les parcours habituels. NB. Pour cette recherche, les trains en direction Montréal, pointe AM, seulement sont codifiés. De ce fait, tous les trains suivent la même chaîne OD.

Requête dérivée. La requête *queryOD* est utilisée pour joindre les informations sur les segments associés à l'origine et la destination provenant de la table *Gare*.

Tableau A2.6 Table Horaire

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Description
IDHoraire	4	31	Long Integer	Clé primaire
NoTrain	33	13	Text	Identificateur du train
IdGen	31	12	Long Integer	Identificateur de la gare
HeurePredite	0	0	Date/Time	Heure de passage prédite en temps réel
HeurePlanif	112	16	Date/Time	Heure de départ planifiée

Contenu : L'heure de passage de chaque train à chaque gare. Basé sur une étude statistique des heures de départs. NB. Pour cette recherche, les trains en direction Montréal, pointe AM, seulement sont codifiés.

Tableau A2.6 Table TPMoyen

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Description
id	392	394	Long Integer	Clé primaire
GareOrildGen	18	19	Long Integer	Identificateur de la gare de départ
GareDestildGen	17	18	Long Integer	Identificateur de la gare d'arrivée
Tpmoyen	00:03:43	00:08:24	Date/Time	Temps de parcours habituel
TPEstime	00:03:42	00:08:30	Date/Time	Temps de parcours estimé
TP1	00:03:41	00:08:35	Date/Time	Dernier temps de parcours
TP2	00:03:43	00:08:24	Date/Time	Avant dernier temps de parcours
TP3	00:03:43	00:08:24	Date/Time	Avant avant dernier temps de parcours
DelaiNormal	0	0	Long Integer	Delai initial. <>0 si délai prévu.
Pt	0.85	20.41	Double	Erreur nécessaire au filtre de Kalman

Contenu : Le temps de parcours habituel entre deux gares et l'enregistrement des derniers temps de parcours pour utilisation avec un filtre de Kalman. NB : Les temps de parcours habituels sont indépendants du train (voyage).

Requête dérivée. La requête *TPMoyenTrier* est utilisée pour s'assurer de l'ordonnancement préalable dans certaines procédures.

Tableau A2.7 Table Incident

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Description
IncidentID	2658	2630	Long Integer	Clé primaire
Modem	1328	1327	Text	Identificateur du modem
Train	16	14	Text	Identificateur de train
Date	2003-08-19	09-févr-04	Date/Time	Date de l'incident
HeureDeb	08:11:27	08:14:02	Date/Time	Heure du début de l'incident
RetardMO	-912	-962	Long Integer	Retard enregistré au départ de la gare Montréal-Ouest
Measure	6.498938084	1.924295545	Number	Position du début de l'incident

Contenu : Description d'un incident incluant l'heure de début et le retard accumulé. Cette table contient un maximum de 1 enregistrement par train par jour.

Tableau A2.8 Table Prediction

Champs	Exemple1	Exemple2	Type	Description
idPredit	71592	78900	Long Integer	Clé primaire
idGenOri	14	5	Long Integer	Identificateur de la gare de départ
idGenDesti	13	3	Long Integer	Identificateur de la gare d'arrivée
NoTrain	20	112	Text	Identificateur de train
HeureEstime	08:22:45	08:04:31	Date/Time	Heure estimée de passage
HeureEstimation	08:22:49	07:03:49	Date/Time	Heure où l'estimation est réalisée
DateJour	2003-08-22	2004-04-28	Date/Time	Date

Contenu : Description d'une prédiction incluant l'heure où la prédiction a été réalisée et l'heure prédite pour le passage d'un train à une gare. Toutes les estimations réalisées sont conservées.

Requête dérivée. La requête *HeurePredite2* joint l'information sur l'heure de passage planifiée. Cette requête n'est pas nécessaire au fonctionnement du programme.

Procédure principale

PAPII est une application séquentielle et procédurale qui consiste à traiter en ordre temporel chaque relevé GPS. PAPII traite les données provenant de chaque modem de manière indépendante. En fait, la procédure ci-dessous s'exécute en pseudo parallèle pour chaque modem. Cette boucle recommence donc à chaque jour et pour chaque modem. Il s'agit d'une procédure basée sur une segmentation réalisée au préalable. À cette boucle générale vient se greffer les appels aux procédures de calcul de la vitesse attendue, du retard, etc. Ces procédures ont été décrites conceptuellement en plusieurs endroits du mémoire et sont documentées directement dans le code.

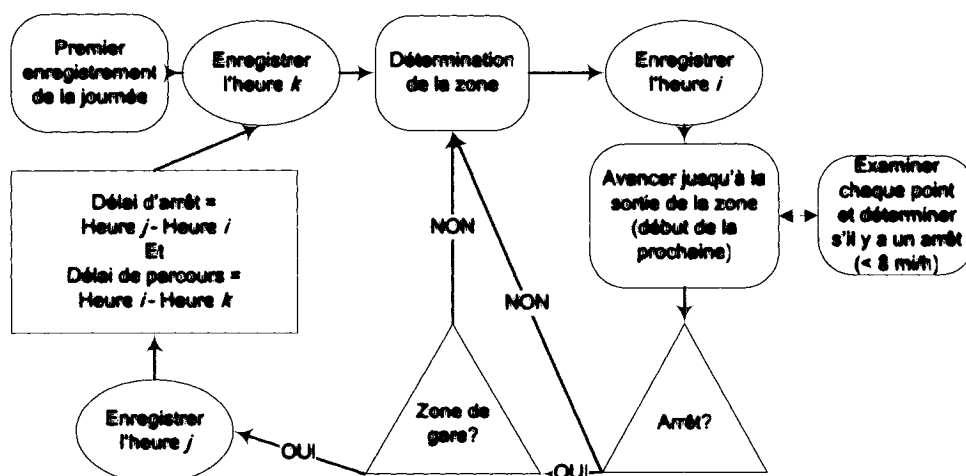


Tableau A2.3 Boucle principale de traitement des données

Contexte temps réel de réception des données

Sachant que les relevés GPS peuvent arriver de différentes locomotives (modem) et que des pannes peuvent survenir et interrompre le traitement réalisé par PAPII, toutes les variables représentant l'état du traitement d'un modem sont conservées dans la table *StatusModem*. Celle-ci comprend 39 champs. Toutes variables devant persister dans le temps résident donc dans cette table. Un arrêt du logiciel ou autre panne n'affecte pas l'état du traitement, celui-ci pouvant reprendre au même endroit. Il s'agit aussi d'un

mécanisme de transfert permettant de traiter des relevés provenant de différents modem, et de charger / décharger l'état de ceux-ci sans problèmes. Cette technique permet un traitement pseudo parallèle de l'information. Une seule contrainte de traitement des données demeure et demande de traiter les relevés dans un ordre temporel propre à chaque modem (i.e. les données sont ordonnées selon chaque modem mais peuvent être désordonnée d'un modem à l'autre, le traitement étant indépendant dans ce cas)

Remarques

Les détails procéduraux se trouvent directement commentés dans le code de chaque module. Le calcul des temps de parcours est fonctionnel pour l'ensemble des déplacements sur la ligne Montréal-Rigaud. Les autres modules ne sont réalisés que pour les trains 12,112,14,16,18 et 20. L'ajout d'autres trains nécessite la mise à jour des tables et l'adaptation du module de prédiction. L'utilisation en temps réel est réalisable à condition de calculer à priori la référence linéaire et d'assigner le numéro de train.