

Titre: Modélisation espace-temps du métro de Montréal
Title:

Auteur: Stéphane Blais
Author:

Date: 2007

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Blais, S. (2007). Modélisation espace-temps du métro de Montréal [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/8070/>

Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/8070/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Martin Trépanier, & Robert Chapleau
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÉLISATION ESPACE-TEMPS DU MÉTRO DE MONTRÉAL

STÉPHANE BLAIS
DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES
ET DE GÉNIE INDUSTRIEL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

MÉMOIRE PRÉSENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLÔME DE MAÎTRISE ÈS SCIENCES APPLIQUÉES
(GÉNIE INDUSTRIEL)
OCTOBRE 2007



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: 978-0-494-36900-5

Our file *Notre référence*

ISBN: 978-0-494-36900-5

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 protège 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.

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

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

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

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MODÉLISATION ESPACE-TEMPS DU MÉTRO DE MONTRÉAL

présenté par : BLAIS Stéphane

en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées

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

M. AGARD Bruno, Doctorat et président

M. TRÉPANIER Martin, ing., Ph.D., membre et directeur de recherche

M. CHAPLEAU Robert, ing., Ph.D., membre et codirecteur de recherche

Mme MORENCY Catherine, ing, Ph.D., membre

REMERCIEMENTS

L'auteur désire remercier tous ceux qui l'ont soutenu et encouragé au travers la rédaction de cet ouvrage. Des remerciements particuliers aux professeurs Martin Trépanier du département de mathématiques et de génie industriel, et Robert Chapleau du département des génies civil, géologique et des mines, qui ont su guider et inciter l'auteur à la réflexion tout au long de ces deux années de formation. Grâce à leur soutien intellectuel et financier, ils ont fait grandir l'auteur à chacun des conseils prodigués et ont laissé une marque indélébile dans ses souvenirs.

Des remerciements vont aussi à la famille de l'auteur, ses parents Denis et Thérèse, par lesquels les valeurs importantes de détermination et d'entrain au travail ont su être transmises afin de permettre la réalisation de ce projet. Sans oublier sa sœur Julie, qui possède une excellente connaissance de la langue française et qui a inspiré, plus d'une fois l'auteur, par la détermination qu'elle démontre afin de compléter son propre mémoire : tu vas réussir !

Cette partie ne serait complète sans remercier les collègues et amis du département de transport de l'école Polytechnique de Montréal, qui ont su écouter et prodiguer de judicieux conseils. Un grand merci à Vincent, Marlène, Isabelle, Émilie, Tim, Alfred, Stéphanie, Sandrine, Marc, Charles, Marie-Christine, Jean-Sébastien et Hubert. Sans oublier les membres du groupe Madituc : Daniel, Guillaume et Bruno.

Pour terminer, l'auteur tient à remercier tous ses amis, qui, à chacune des discussions, élargissent l'horizon de ses connaissances dans des domaines complètement divergents, et, finalement, un merci très particulier à sa douce moitié, Joanie, qui a été soumise à la gamme complète des états d'âme de l'auteur et qui désire, malgré tout, continuer à le supporter.

RÉSUMÉ

Le métro de Montréal fonctionne par consignes de vitesse transmises au travers d'un découpage de la voie en cantons fixes, de longueur variable. Ses activités sont supervisées par son centre de contrôle. En plus d'assurer la sécurité des quelques 700 000 usagers quotidiens et de veiller sur l'exploitation du service du réseau, d'importantes données sur l'occupation des cantons des voies par les trains sont sauvegardées. Cet archivage est constitué des temps d'activation et de désactivation des cantons de tout le réseau.

Ce mémoire de maîtrise atteint l'objectif visé de démontrer que les données d'occupation de voie provenant d'un système ferroviaire découpé en cantons fixes de longueur variable peuvent être utilisées afin d'en extraire différents indicateurs de performance. Pour y parvenir, les données typiques du métro de Montréal sont classées, traitées et analysées.

Les mesures des différents indicateurs de performance, extraits des données d'occupation de cantons lors d'une période de pointe du matin, permettent d'apprécier les potentialités révélatrices du traitement de ces données en ce qui touche la performance générale du métro sous diverses perspectives. La performance du métro de Montréal peut être observée selon les temps de parcours, les profils de vitesses, les intervalles, les temps d'arrêt aux stations, les temps de retournement, la visualisation de la propagation des incidents et les effets de ceux-ci sur la qualité du service offert aux voyageurs.

Le présent projet de recherche couvre les différents éléments de la performance opérationnelle d'une infrastructure de transport en site propre. Les notions fondamentales et les concepts associés aux mouvements des véhicules dans un système de transport en commun sont revisités au vu des considérations de capacité et de sécurité.

ABSTRACT

The subway of Montreal functions by transmitting the speed instructions through the tracks that are cut in fixed blocks of variable length. His activities are supervised by its control center. Not only does it ensure the safety of some 700 000 daily users and manage the service of the network, but it also records important data on the occupancy of the blocks by the trains. This archive of data consists of time of activation and deactivation of blocks over the entire network.

This paper accomplish the pursued goal of showing that data of occupancy of tracks, cut out in fixed blocks of variable length, can be used in order to extract various performance indicators from them. For that purpose, typical data of the subway of Montreal are classified, processed and analyzed.

Measurements of the various performance indicators, extracted from the occupancy data of blocks during the morning peak period, makes it possible to appreciate the potentialities of these data in the visualization of the general performance of the subway. The performance of the Montreal's metro can be observed under various perspectives, of which, travel times, speed profiles, headways, dwell times, turnaround times, visualization of the spread of incidents and the impact of these service delays on the quality of the service offered.

This research covers the various elements of the operational performance of an exclusive right of way transport infrastructure. The concepts associated with the movements of vehicles in a public transport system are explained with capacity and safety considerations.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT	vi
TABLE DES MATIÈRES	vii
LISTE DES TABLEAUX	x
LISTE DES FIGURES	xi
LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS	xvii
LISTE DES ANNEXES.....	xix
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 - REVUE DE LITTÉRATURE.....	6
1.1. Les notions fondamentales d'un réseau de transport en commun	7
1.2. Principes de sécurité ferroviaire	9
1.3. Techniques et technologies associées aux mesures des mouvements	16
1.4. L'utilisation de grandes quantités de données pour caractériser une offre de transport en commun	19
1.5. Les indicateurs de performance	25
1.5.1. L'accessibilité au réseau	26
1.5.2. L'intervalle et la fréquence	28
1.5.3. Capacité réalisable	29
1.5.4. Temps de parcours et vitesse.....	30
1.6. Conclusion	31

CHAPITRE 2 - MÉTHODOLOGIE	33
2.1. Contexte montréalais	33
2.1.1. Les infrastructures du métro de Montréal	34
2.1.2. Les statistiques d'exploitation du métro de Montréal	41
2.2. Représentation spatialisée des éléments du réseau.....	43
2.3. Description des données	45
2.4. Prétraitement des données	46
2.5. Traitement des anomalies	51
CHAPITRE 3 - DÉTERMINATION DES INDICATEURS DE PERFORMANCE	54
3.1. L'accessibilité au réseau.....	55
3.2. L'intervalle et la fréquence.....	56
3.3. Capacité réalisable.....	56
3.4. Le travail et la productivité.....	61
3.5. Temps de parcours.....	62
3.5.1. Temps en station	64
3.5.2. Temps de retournement.....	66
3.6. Vitesses	67
3.7. Conclusion	76
CHAPITRE 4 - EXPÉRIMENTATIONS SUR LES INDICATEURS DE PERFORMANCE	79
4.1. Étendue du réseau	82
4.2. Trains en service, intervalle et fréquence	84
4.3. Capacité	89
4.4. Temps de parcours	91
4.5. Profil de vitesse	98
4.5.1. Temps d'arrêt en station.....	102
4.5.2. Temps de retournement.....	105

4.6.	Correspondance	106
4.7.	Détection des incidents	110
4.7.1.	Effets sur les temps d'arrêt en station	111
4.7.2.	Effets sur les intervalles de service	113
4.7.3.	Régulation suite à un incident	116
4.8.	Conclusion	117
DISCUSSION ET CONCLUSION		119
RÉFÉRENCES		125
ANNEXES		134

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Caractéristiques des voitures.....	37
Tableau 2-2 : Les cinq stations les plus achalandées en 2001 (Usagers par année).	41
Tableau 2-3 : Tableau comparatif des lignes sur les différentes statistiques opérationnelles de la STM pour l'année 2002.	42
Tableau 2-4 : BDD originale	45
Tableau 2-5 : BDD originale agrémentée des champs d'identifications complémentaires.	50
Tableau 2-6 : Nom des fichiers Excel de données originales reclassées par direction.....	51
Tableau 2-7 : Aperçu du fichier Ligne2_CV.xls.....	52
Tableau 2-8 : Aperçu du fichier Ligne2_HB.xls.....	52
Tableau 3-1 : Données d'occupation de voies et applications potentielles.	77
Tableau 4-1 : Longueur totale des lignes en exploitation.....	82
Tableau 4-2 : Distance moyenne entre les stations	83
Tableau 4-3 : Longueur moyenne des interstations.....	83
Tableau 4-4 : Nombre de véhicules en service sur le réseau par quart d'heure.	89
Tableau 4-5 : Aperçu des différents facteurs de la capacité réalisable.....	91
Tableau 4-6 : Temps de parcours moyens.....	92
Tableau 4-7 : Vitesses moyennes de parcours selon les directions	98
Tableau B-1 : Longueur totale des cantons des stations de la ligne 1.....	136
Tableau B-2 : Longueur totale des cantons des stations de la ligne 2.....	137
Tableau B-3 : Longueur totale des cantons des stations de la ligne 5.....	138
Tableau F-1 : Nomenclature des stations.....	168

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Principe de signalisation des cantons fixes par consignes de vitesse.....	11
Figure 1-2 : Principe de signalisation des cantons fixes par distance à faire.....	12
Figure 1-3 : Principe de signalisation des cantons mobiles.	13
Figure 1-4 : Communication des consignes de vitesse par balises et antennes.	14
Figure 1-5 : Contrôle automatique des consignes de vitesse.	14
Figure 1-6 : Détail du circuit de voie.	15
Figure 1-7 : Représentation spatialisée des informations par couche de données.....	23
Figure 1-8 : Représentation spatialisée des nœuds d'arrêts d'une intersection.	24
Figure 1-9 : Indicateurs de performance selon les intervenants, les catégories et exemples.....	26
Figure 2-1 : Plan du réseau du métro de Montréal.....	34
Figure 2-2 : Vue des pneumatiques du matériel roulant du métro de Montréal.	35
Figure 2-3 : Bogie d'un système de métro sur pneumatiques.....	36
Figure 2-4 : Plan et élévation d'une voiture motrice.	37
Figure 2-5 : Dessin explicatif de la bande de roulement et du bogie.....	38
Figure 2-6 : Coupe du tunnel montrant le profil en cuvette.....	39
Figure 2-7 : Circuit de voie et joints isolants dans le métro de Montréal.	40
Figure 2-8 : Consignes de vitesse des cantons selon la position des trains.	40
Figure 2-9 : Évolution de l'achalandage et de l'offre de service du métro de Montréal	42
Figure 2-10 : Représentation spatialisée du métro de Montréal par nœuds et par arrêts.....	44
Figure 2-11 : Exemple de visualisation des événements chronologiques des cantons.....	46

Figure 2-12 : Représentation des suffixes des cantons et parité des noms selon le tronçon de lignes et la direction de la voie du métro de Montréal	47
Figure 2-13 : Diagramme espace-temps selon les évènements sur les cantons	48
Figure 2-14 : Diagramme espace-temps selon les évènements sur les cantons par chacun des trains	49
Figure 3-1 : Mesures de performance et éléments d'opération de base d'un système de transport.....	55
Figure 3-2 : Équation de la capacité réalisable.	57
Figure 3-3 : Éléments qui composent le temps d'arrêt aux stations.	59
Figure 3-4 : Diagramme espace-temps de deux trains consécutifs décrivant les différentes variables incluses dans le calcul de la capacité.....	60
Figure 3-5 : Graphique de temps de parcours.	62
Figure 3-6 : Diagramme espace-temps représentant les composantes du temps de cycle.....	63
Figure 3-7 : Schéma représentant le calcul du temps de parcours.	64
Figure 3-8 : Schéma représentant le temps en station.....	64
Figure 3-9 : Aiguille de retournement en terminus.....	66
Figure 3-10 : Profil de vitesse de la « marche type ».....	67
Figure 3-11 : Variation de la distance, de la vitesse et de l'accélération dans le temps.	69
Figure 3-12 : Vitesse dans l'espace.....	71
Figure 3-13 : Vitesse dans l'espace à l'activation des cantons.	73
Figure 3-14 : Vitesse dans l'espace à la désactivation des cantons.	74
Figure 3-15 : Vitesse dans l'espace lorsque le canton est plus grand que le train.	74
Figure 3-16 : Vitesse ponctuelle.	75
Figure 3-17 : Condensé de tous les calculs de vitesses possible.....	76
Figure 4-1 : Diagramme espace-temps de la ligne 2.....	80
Figure 4-2 : Diagramme espace-temps de deux trains consécutifs sur la ligne 2.	81
Figure 4-3 : Agrandie du diagramme espace-temps de la ligne 2.....	81

Figure 4-4 : Représentation des calculs de la longueur moyenne d'interstation.	82
Figure 4-5 : Représentation des calculs de la longueur moyenne des interstations réelles.....	83
Figure 4-6 : Variation de l'intervalle à travers l'heure de pointe.....	85
Figure 4-7 : Intervalle de service de la ligne 2, direction Côte-Vertu	86
Figure 4-8 : Corrélation entre l'intervalle et le nombre de trains en service.	87
Figure 4-9 : Intervalle de service selon la direction.....	87
Figure 4-10 : Fréquence de service selon la direction.	88
Figure 4-11 : Capacité de transport des directions, selon le quart d'heure.	90
Figure 4-12 : Diagramme des temps de parcours moyens selon la ligne et la direction.....	92
Figure 4-13 : Diagramme des temps de parcours du métro de Montréal.....	93
Figure 4-14 : Exemple des temps de parcours mesurés pour la ligne 2, direction Côte-Vertu.....	94
Figure 4-15 : Représentation du temps de parcours des interstations pour chacun des trains.....	95
Figure 4-16 : Tendance entre le temps de parcours et la longueur des interstations.	96
Figure 4-17 : Régression linéaire des temps de parcours selon les longueurs des interstations et des lignes, sans les terminus.	96
Figure 4-18 : Calcul du chemin le plus court à l'aide de Viper.	97
Figure 4-19 : Temps de parcours de correspondance en heure de pointe du matin.....	98
Figure 4-20 : Application dans l'espace des équations des moyennes de vitesse.....	99
Figure 4-21 : Diagramme espace-vitesse des stations hors centre-ville de la ligne 2.....	100
Figure 4-22 : Diagramme espace-vitesse des stations du centre-ville de la ligne 2.....	101

Figure 4-23 : Profils de vitesse obtenus comparés aux consignes de vitesses possible.....	102
Figure 4-24 : Temps d'arrêt moyen en station pour la ligne 2.....	103
Figure 4-25 : Temps d'arrêt en stations pour la ligne 2, direction Côte-Vertu.....	104
Figure 4-26 : Moyenne des temps d'arrêt aux stations selon les quarts d'heure pour l'ensemble du réseau.....	105
Figure 4-27 : Temps de retournement des trains aux terminus.....	106
Figure 4-28 : Station de correspondance Lionel-Groulx.	107
Figure 4-29 : Temps des arrivées et des départs des trains à la station Lionel-Groulx.	108
Figure 4-30 : Présentation animée VRML de la station Lionel-Groulx.	109
Figure 4-31 : Intervalles de la station Lionel-Groulx, direction Côte-Vertu.	110
Figure 4-32 : Aperçu des retards sur le diagramme espace-temps de la ligne 2, direction Côte-Vertu.....	112
Figure 4-33 : Temps d'arrêt en station avec valeurs extrêmes, ligne 2 direction Côte-Vertu.....	113
Figure 4-34 : Intervalle de service entre les trains 13 à 21, pour la ligne 2, direction Côte-Vertu.....	114
Figure 4-35 : Temps de remplacement des trains 13 à 21, pour la ligne 2, direction Côte-Vertu.....	115
Figure 4-36 : Diagramme vitesse-temps du train 16 de ligne 2, direction Côte-Vertu.....	116
Figure 4-37 : Temps de remplacement des trains de la ligne 2, direction Côte-Vertu.....	117
Figure A-1 : Diagramme espace-temps de la ligne 1.....	134
Figure A-2 : Diagramme espace-temps de la ligne 2.....	135
Figure A-3 : Diagramme espace-temps de la ligne 2.....	135
Figure C-1 : Temps de parcours interstations sur la ligne 1, direction Angrignon.	140

Figure C-2 : Corrélation entre les temps de parcours et la longueur des interstations sur la ligne 1, direction Angrignon, sans l'interstation terminus.....	140
Figure C-3 : Temps de parcours interstations sur la ligne 1, direction Honoré-Beaugrand.	141
Figure C-4 : Corrélation entre les temps de parcours et la longueur des interstations sur la ligne 1, direction Honoré-Beaugrand, sans l'interstation terminus.	141
Figure C-5 : Temps de parcours interstations sur la ligne 2, direction Côte-Vertu.....	142
Figure C-6 : Corrélation entre les temps de parcours et la longueur des interstations sur la ligne 2, direction Côte-Vertu, sans l'interstation terminus.....	142
Figure C-7 : Temps de parcours interstations sur la ligne 2, direction Henri-Bourassa.	143
Figure C-8 : Corrélation entre les temps de parcours et la longueur des interstations sur la ligne 2, direction Henri-Bourassa, sans l'interstation terminus.	143
Figure C-9 : Temps de parcours interstations sur la ligne 5, direction Snowdon....	144
Figure C-10 : Corrélation entre les temps de parcours et la longueur des interstations sur la ligne 5, direction Snowdon, sans l'interstation terminus.....	144
Figure C-11 : Temps de parcours interstations sur la ligne 5, direction St-Michel....	145
Figure C-12 : Corrélation entre les temps de parcours et la longueur des interstations sur la ligne 5, direction St-Michel, sans l'interstation terminus.....	145
Figure D-1 : Temps d'arrêt aux stations de la ligne 1, direction Angrignon.	146
Figure D-2 : Temps d'arrêt aux stations de la ligne 1, direction Honoré-Beaugrand.	146

Figure D-3 : Temps d'arrêt aux stations de la ligne 2, direction Côte-Vertu.	147
Figure D-4 : Temps d'arrêt aux stations de la ligne 2, direction Henri-Bourassa. ...	147
Figure D-5 : Temps d'arrêt aux stations de la ligne 5, direction Snowdon.	148
Figure D-6 : Temps d'arrêt aux stations de la ligne 5, direction St-Michel.	148
Figure E-1 : Intervalle de service de la ligne 2, direction Côte-Vertu à la station Lionel-Groulx.....	149
Figure E-2 : Intervalle de service de la ligne 2, direction de Henri-Bourassa à la station Lionel-Groulx.....	149
Figure E-3 : Intervalle de service de la ligne 1, direction de Angrignon à la station Lionel-Groulx.....	150
Figure E-4 : Intervalle de service de la ligne 1, direction de Honoré-Beaugrand à la station Lionel-Groulx.	150
Figure F-1 : Temps d'arrêt aux stations de la ligne 1, direction Angrignon.	152
Figure F-2 : Réseau prolongé du métro tel que proposé par la CTCUM en 1974.....	153
Figure F-3 : Réseau de métro proposé par le ministère des Transports en 1979.	154
Figure F-4 : Réseau de métro actuel et dates d'ouverture des tronçons 1966.	156
Figure F-5 : Vue des pneumatiques du matériel roulant du métro de Montréal.	157
Figure F-6 : Bogie d'un système de métro sur pneumatiques.....	159
Figure F-7 : Plan et élévation d'une voiture motrice.	160
Figure F-8 : Coupe du tunnel montrant le profil en cuvette.....	162
Figure F-9 : Dessin explicatif de la bande de roulement et du bogie.....	163
Figure F-10 : Exemple de répartition des postes de redressement et des postes de district sur le réseau de métro.....	164
Figure F-11 : Tableau optique du poste de contrôle et de commande Providence. ...	165

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

AMT :	Agence Métropolitaine de Transport
APC :	Automatic Passenger Counter (Compteur de passager automatique)
AVL :	Automatic Vehicle Localisation (Localisation de véhicule automatique)
BM :	Bureau du Métro
BTM :	Bureau de Transport Métropolitain
CCM :	Centre de Communication du Métro
CDV :	Circuit de Voie
COS :	Centre Opérationnel de la Surveillance
CTCUM :	Commission de Transport de la Communauté Urbaine de Montréal
CTM :	Commission de Transport de Montréal
CUM :	Communauté Urbaine de Montréal
GIS :	Geographic Information System (Système d'Information Géographique)
GPS :	Global Positionning System (Système de Positionnement Global)
LOS :	Level of Service (Niveau de service)
MTQ :	Ministère des Transports du Québec
OCS :	Operations Control Systems
PA :	Pilote Automatique
PCC :	Poste de Commandes et de Contrôle
PCM :	Poste de Commandes et de Mesures
PD :	Poste de District

PR :	Poste de Redressement
RATP :	Régie Autonome des Transports Parisiens
ROW :	Right-Of-Way (piste de roulement)
SÉD :	Secteur de Dénombrement
SLR :	Système Léger sur Rails
STCUM :	Société de Transport de la Communauté Urbaine de Montréal
STM :	Société de Transport de Montréal
TCO :	Tableau de Contrôle Optique
TU :	Transit Unit (voir UT)
UT :	Unité de Transport

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A – DIAGRAMMES ESPACES-TEMPS	134
ANNEXE B – LONGUEUR DES STATIONS ET NOMBRE DE CANTONS ASSOCIÉS.....	136
ANNEXE C – TEMPS DE PARCOURS AUX INTERSTATIONS	139
ANNEXE D – TEMPS D'ARRÊT AUX STATIONS	146
ANNEXE E – INTERVALLE DE SERVICE DE LA STATION LIONEL-GROULX	149
ANNEXE F – HISTORIQUE DU MÉTRO DE MONTRÉAL.....	151
ANNEXE G – L'ATTRACTIVITÉ DES STATIONS DE MÉTRO	169

INTRODUCTION

Les célébrations de 2006 soulignant le 40e anniversaire de la mise en service du métro de Montréal ont permis de mettre en lumière toute l'importance qu'a pu prendre ce mode de transport dans le cœur de ses usagers. Il serait, dès lors, impossible d'imaginer une métropole prospère sans son métro qui déplace, chaque jour de semaine, 700 000 usagers. Malgré son utilité, le métro est plus qu'un mode de transport pour les citoyens de Montréal, il représente une fierté, autant sur le plan technologique que sur le plan architectural et artistique. Aujourd'hui, le métro subit une cure de rajeunissement par le renouvellement de son centre de contrôle, de son matériel roulant et par l'ajout de trois stations à la ville de Laval. Les travaux entrepris apporteront aussi des changements dans la façon dont les usagers pourront payer leurs titres de transport. En effet, le nouveau système de perception utilisera des cartes à puce. Avec ce nouveau mode de transaction, il sera alors possible de traiter un nombre impressionnant de nouvelles données sur les habitudes des usagers. Néanmoins, avant même que toutes ces nouvelles données soient accessibles, il est important de traiter les données qui sont actuellement disponibles. Est-il possible de connaître, avec précision, le niveau de service qui est offert aux usagers ?

Motivations

Pour répondre à cette question, il est nécessaire de connaître avec précision le déplacement des véhicules permettant ainsi d'estimer les diverses caractéristiques opérationnelles du service. Bien des systèmes offrent des outils pour mesurer le déplacement de véhicules de transport en commun afin de les suivre dans le temps et l'espace. Pour le métro de Montréal, le déplacement des véhicules peut être suivi par l'équipement déjà en place. Effectivement, le métro de Montréal fonctionne par consignes de vitesse transmises au travers d'un découpage de la voie en cantons fixes, de longueur variable. Par conséquent, les données d'occupation de voie par les

véhicules sont accessibles. Il devient alors possible d'extraire la dérivation approximative du profil de vitesse des rames de métro, de calculer les temps de parcours aux interstations et de déterminer les temps d'embarquements et de débarquements aux stations.

Tout comme l'utilisation de données GPS sur les autobus ou sur les trains, l'analyse des données d'occupation de voie est une étape importante dans la caractérisation de l'offre de service. Cette caractérisation permet d'établir le niveau de qualité du service offert aux usagers. Ainsi, la connaissance fine de ces caractéristiques contribue à l'évaluation des effets sur les usagers.

Objectifs

Ce mémoire de maîtrise a comme objectif de démontrer que les données d'occupation de voie provenant d'un système ferroviaire découpé en cantons fixes de longueur variable peuvent être utilisées afin d'en extraire différents indicateurs de performance. Pour y parvenir, des données typiques du métro de Montréal sont classées, traitées et analysées.

Par la suite, les mesures des différents indicateurs de performance, extraits des données d'occupation de cantons lors d'une période de pointe du matin, permettent d'apprécier les potentialités révélatrices du traitement de ces données en ce qui touche la performance générale du métro sous diverses perspectives, dont, la visualisation de la propagation des incidents et les effets de ces incidents sur la qualité du service offert aux voyageurs.

Le présent projet de recherche couvre les différents éléments de la performance opérationnelle d'une infrastructure de transport en site propre. Les notions fondamentales et les concepts associés aux mouvements des véhicules dans un système de transport en commun sont revisités au vu des considérations de capacité et de sécurité.

Contenu

Ce document se divise en quatre parties majeures. La première partie est une revue de littérature répertoriant les principaux documents et articles de recherche touchant les déplacements spatiotemporels de véhicules de transport en commun. Par ces articles de recherche, les éléments de planification et de caractérisation d'un réseau de transport sont identifiés. De plus, les concepts permettant d'analyser les réseaux de transport en commun sont présentés. Pour ce faire, l'utilité qui peut être faite de différents indicateurs de performances est expliquée. Finalement, il est question des techniques et des méthodes liées à la capture, à l'utilisation et à la visualisation de données spatiotemporelles.

La seconde partie décrit les données reçues et utilisées pour le sujet, en plus d'exposer la méthodologie employée. Ce chapitre a pour objectif d'analyser les données d'occupation de voie du métro de Montréal. Les données recueillies ont été extraites d'un système de localisation des trains par cantons fixes de longueurs variables lors de la période de pointe du matin, soit entre 7 h 30 et 9 h 30. L'analyse de ces données passe par le dévoilement de différents problèmes, dont ceux d'exactitude des données, d'erreurs de lecture et d'anomalies.

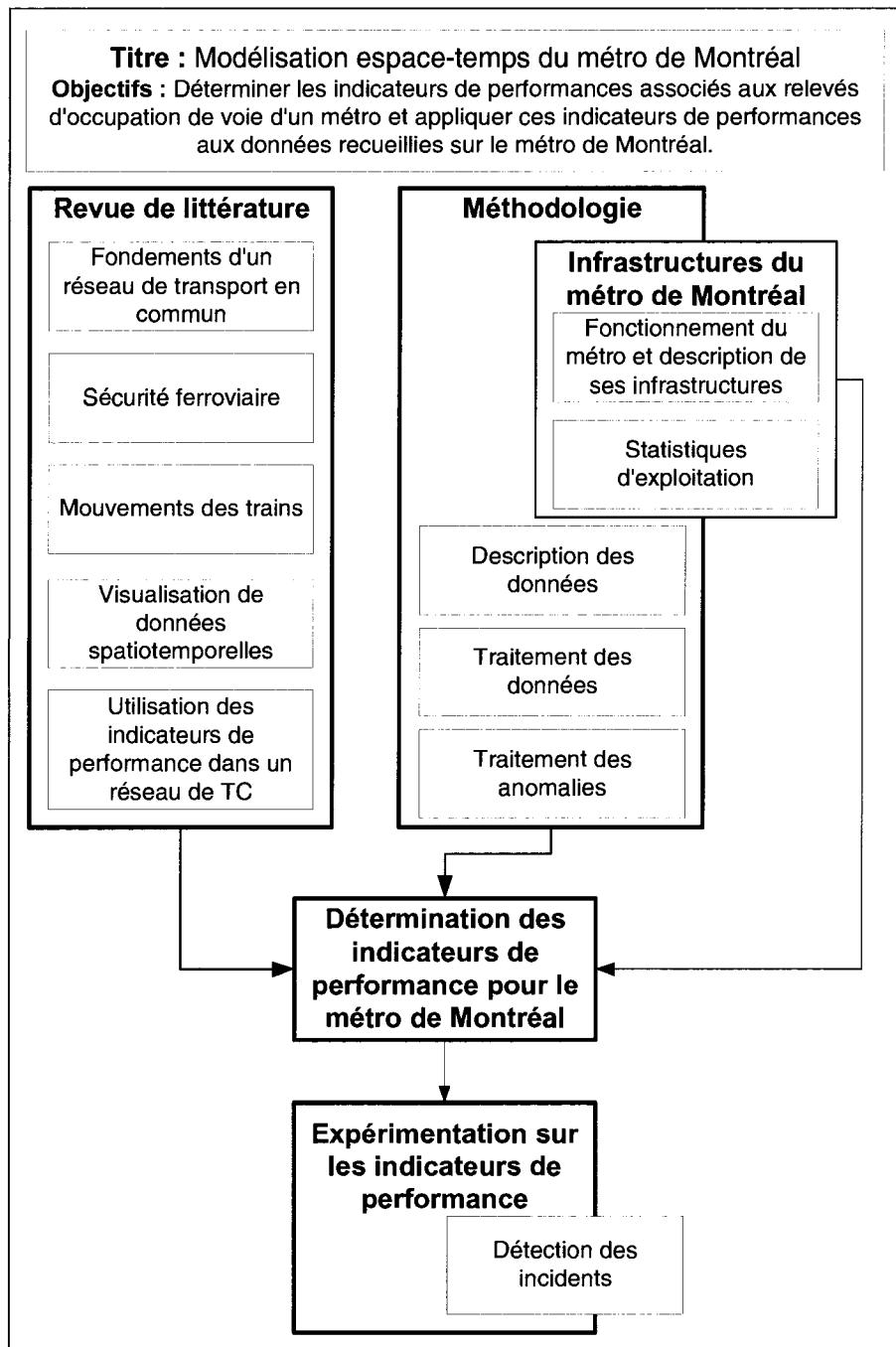
La troisième partie traite des différents indicateurs de performance. Pour ce faire, différents indicateurs de performance sont établis mathématiquement. Ceci, dans le but d'identifier comment ils peuvent être extraits à partir des données disponibles. Cette analyse mathématique passe aussi par l'établissement de formules permettant de calculer les indicateurs de performance de vitesse et de temps de parcours. De plus, la représentation spatiale est utilisée dans le but d'offrir une meilleure visualisation des indicateurs à l'étude

La quatrième partie fait l'analyse des résultats obtenus à partir des expérimentations effectuées et entame une discussion sur ces résultats. Ce chapitre caractérise l'offre de service du métro de Montréal au travers différents indicateurs de performance. Ces indicateurs sont : l'étendue du réseau, le nombre de trains en service, l'intervalle et la

fréquence des trains, la capacité des lignes, le temps de parcours et le profil de vitesse. Ces indicateurs sont présentés à l'intérieur de divers graphiques et tableaux, dont les diagrammes espaces-temps permettant une visualisation fine. Certains indicateurs obtenus peuvent être comparés avec les informations officielles émises par la STM.

Une section supplémentaire du chapitre quatre présente une démonstration des techniques de détermination des retards sur la ligne 2, direction Côte-Vertu et une analyse de ces retards au niveau de l'ensemble de cette ligne. Afin de réaliser cette tâche, le diagramme espace-temps est analysé finement avant de détailler les temps d'arrêt en station et les temps d'intervalle des trains.

La figure suivante permet de clarifier les étapes et la structure de cette recherche en présentant le plan de celle-ci.



CHAPITRE 1 - REVUE DE LITTÉRATURE

Ce chapitre présente une revue de littérature pertinente à cette recherche. Lors des recherches littéraires relatives au sujet de l'étude des mouvements des véhicules à partir de cantons fixes de longueur variable, un constat sur le très faible nombre d'articles scientifiques disponibles est fait. Effectivement, un seul article touchant directement le sujet est accessible, celui de Dixon et al. (2006) qui reprend des données d'occupation de voie du métro de Boston afin de faire ressortir différents indicateurs de performance pour améliorer sa planification. Cependant, les données de Dixon ont été corrigées préalablement à leur utilisation tandis qu'à l'intérieur de cette recherche les données utilisées sont celles directement extraites du système.

Ce chapitre débute par la revue des principales notions d'un réseau de transport en commun (Khisty *et al.*, 1998; Manheim, 1979; Morlok, 1978; Vuchic, 1981, 2005, 2007). Par la suite, dans l'optique de déterminer l'origine exacte des données, une revue sur les principes de sécurité ferroviaire est faite (Connor, 1998; MétroPole, 2006; Pearson, 1973; Teague *et al.*, 1976). Puis, comme peu d'articles scientifiques sur l'utilisation de système de localisation de véhicule automatique [AVL] pour un métro sont disponibles, une revue sur l'utilisation et les techniques d'exploitation des AVL pour les réseaux d'autobus est effectuée (Greenfeld, 2000; Horbury, 1999; Okunieff, 1997). Ensuite, une revue sur l'utilisation et la visualisation d'une grande quantité de données spatiotemporelles est présentée (Chapleau, 2001; Furth, 2006; Manheim, 1979; Miller, 1999; Thevenin, 2001). Finalement, puisque le but de cette recherche est de déterminer les indicateurs de performance pouvant être extraits d'un relevé d'occupation de voies du métro de Montréal découpées en cantons fixes de longueur variable, la dernière section présente une revue sur l'utilité des différents indicateurs de performance d'un réseau de transport collectif (Alterkawi, 2006; Chapleau, 1992, 1994; Demery, 1994; Hensher, 2007; Kittelson and Associates, 2003; Parkinson *et al.*, 1996; Voyer, 2006; Wardman *et al.*, 2004).

1.1. Les notions fondamentales d'un réseau de transport en commun

Afin de réaliser l'analyse des indicateurs de performance pouvant être appliqués aux données recueillies à partir de relevés de position d'occupation des véhicules d'un métro, cette section met en place les différents concepts de base du transport en commun. Une fois établis, ces concepts serviront à l'élaboration des principes complémentaires nécessaires à la détermination des indicateurs de performance pouvant être extraits à partir de tels relevés de position.

Selon Vuchic (2005), la circulation d'un véhicule de transport en commun suivant un itinéraire fixe d'après un horaire préétabli définit une ligne de transport. Le regroupement de plusieurs lignes de transport fonctionnant en concordance constitue la définition d'un réseau de transport en commun. Cette définition s'applique aux réseaux « classiques » puisque, comme l'énonce le rapport de Enoch et al. (2004), des sociétés de transport misent sur l'innovation en ne restreignant pas les véhicules à des lignes fixes, mais en offrant d'autres types de service de transport, tel que du transport à la demande. Toutefois, le métro de Montréal fait partie d'un réseau classique puisque ses véhicules sont contraints à des lignes fixes. En général, un système de transport en commun est composé de cinq éléments différents. Tout d'abord, il y a le *réseau* qui est composé de lignes de transport. Sur ce réseau circulent des *véhicules*, qui transportent des *usagers*. Ces usagers montent à l'intérieur des véhicules par des *points de correspondance* et des *terminus* (Manheim, 1979).

Les lignes de transport sont définies par leurs infrastructures et le niveau de service offert, ou « level of service » [LOS], sur un parcours fixe par l'opération de véhicules respectant un horaire. Un réseau de transport est un ensemble de lignes de transport interconnectées et organisées de façon à améliorer l'efficacité des opérations du service en les intégrant dans un secteur selon la demande des usagers. Chacune des lignes de transport est caractérisée par l'attribut de sa piste de roulement ou « right-of-way » [ROW]. Il existe différents types de pistes de roulement qui se classent selon trois

catégories : A, B ou C. La classification des types de ROW se fait par rapport à la mixité du transport en commun avec les autres types de transport. La catégorie C inclut les modes de transport en commun qui partagent les mêmes voies que le trafic mixte, c'est-à-dire, les voies où circulent les voitures, les piétons, les bicyclettes, etc. Dans cette catégorie sont regroupés les bus, les trolleybus et les tramways. La seconde catégorie (catégorie B) inclut les modes de transport qui sont physiquement séparés des autres modes par l'installation de barrières, bandes vertes, trottoirs, etc. Les véhicules de cette catégorie peuvent cependant croiser d'autres modes de transport à certaines intersections et ainsi être entravés dans leur voyage. Tous les modes semi-rapides se regroupent dans cette catégorie, dont les systèmes légers sur rails [SLR]. Puis, la catégorie A, à l'intérieur de laquelle se retrouvent les métros et tous les modes de transport rapides, est dite séparée, privée ou exclusive. Cette catégorie est facilement identifiable puisqu'elle offre un espace complètement contrôlé et qu'il n'existe aucune interférence externe avec ce mode, ce qui permet d'augmenter les performances en efficacité, sécurité et fiabilité.

Les modes de transport qui utilisent la ROW de la catégorie C, c'est-à-dire en trafic mixte, sont des véhicules uniques possédant une certaine flexibilité et liberté de déplacement. Par contre, pour les modes de transport des catégories B et A, les véhicules sont couplés en trains, de façon à augmenter la capacité et ainsi tenter d'apporter des économies sur les coûts d'exploitation. En terme opérationnel, il est question d'unité de transport [UT] ou « transit unit » [TU]. Une unité de transport est composée d'un ou de plusieurs véhicules. La flotte est l'ensemble des véhicules acquis par l'agence de transport afin d'assurer le service sur son réseau. Ceci inclut les véhicules de réserve et les véhicules en réparation ou en entretien. La notion de UT est importante dans cette recherche puisque les véhicules du métro de Montréal sont toujours couplés en train.

Une autre notion fondamentale du transport en commun est la demande. La demande est souvent définie comme étant l'utilisation faite, par les usagers, du transport. Cette définition représente toutes les personnes qui utilisent et acceptent déjà les contraintes

d'offre de service et de tarifs imposées par le réseau. Sachant que la demande pour un service de transport est élastique, c'est-à-dire qu'elle varie selon le niveau de service et les tarifs, il faut donc distinguer la demande potentielle, qui définit le volume de transport qui serait possible si le service était d'une grande qualité et si les tarifs étaient faibles. La différence entre la demande en transport et la demande potentielle englobe tous les usagers qui préfèrent utiliser un mode de transport compétitif au transport en commun. La demande varie selon les saisons, selon les journées de la semaine et même selon l'heure de la journée. Ces variations obligent les planificateurs à les étudier et à ajuster l'offre en fonction de celles-ci. Il faut donc tenir compte de ces variations lors de l'étude faite dans cette recherche. Les références pour cette section ont été : (Khisty *et al.*, 1998; Morlok, 1978; Vuchic, 1981, 2005, 2007)

Comme pour tout type de transport, la notion de sécurité est essentielle. Ceci est d'autant plus vrai pour le monde du transport en commun puisque les biens transportés sont vivants et que l'attractivité du mode est liée de très près aux sentiments de sécurité des usagers à l'intérieur de celui-ci (voir la section : « L'attractivité des stations de métro » à l'annexe G). Comme les expérimentations de cette recherche s'attardent sur le métro de Montréal, qui est classifié dans la catégorie A des modes de transport en commun, les principes de sécurité ferroviaire sont présentés à la section suivante.

1.2. Principes de sécurité ferroviaire

Les principes de sécurité ferroviaires ont emmené les sociétés de transport, fournissant des modes de la catégorie A, à se munir de dispositifs qui procurent les données d'occupation utilisées à l'intérieur de cette recherche. Cette section fait la synthèse des différentes infrastructures de sécurité, qu'elles soient physiques ou logicielles, qui composent un système de transport en commun ferroviaire. Ceci, dans le but de situer l'origine des données utilisées dans les expérimentations de cette recherche.

Comme le mentionne Teague et al. (1976) et le site Internet MétroPole (2006), la sécurité dans le domaine ferroviaire est primordiale. Ainsi, tout système ferroviaire se doit d'éviter les problèmes suivants :

- **les rattrapages** : deux trains circulant dans le même sens, sur la même voie ;
- **les faces-à-faces** : deux trains venant à l'encontre l'un vers l'autre ;
- **les prises en écharpe** : deux trains circulant sur des itinéraires convergents ;
- **les déraillements** par excès de vitesse.

Afin de contrer ces situations catastrophiques, un vieux principe de sécurité est toujours valide aujourd'hui, c'est celui des cantons ou « blocks ». Un canton est une section de voie dont la longueur varie, mais qui n'est jamais inférieure à la distance de freinage du véhicule. Deux types de cantons existent : les cantons fixes et les cantons mobiles. Le principe de base est qu'un canton ne peut être occupé par deux trains à la fois. Donc, les cantons sont utilisés afin de donner une consigne de vitesse pour s'assurer que les trains soient à une distance suffisante afin d'empêcher deux trains de se rattraper. Dans le cas des cantons fixes, ce signal est transmis à l'opérateur du train, ou directement au train, par différents moyens. Il peut être de type visuel, grâce à des affiches et des feux ou communiqué par radio à l'opérateur par des postes de cantonnement, ou bien, dans les trains modernes, directement au train de façon tout à fait automatique comme c'est le cas dans le métro de Montréal. Un exemple de cantons fixes avec affichage des différentes consignes de vitesse associées est présenté à la figure 1-1.

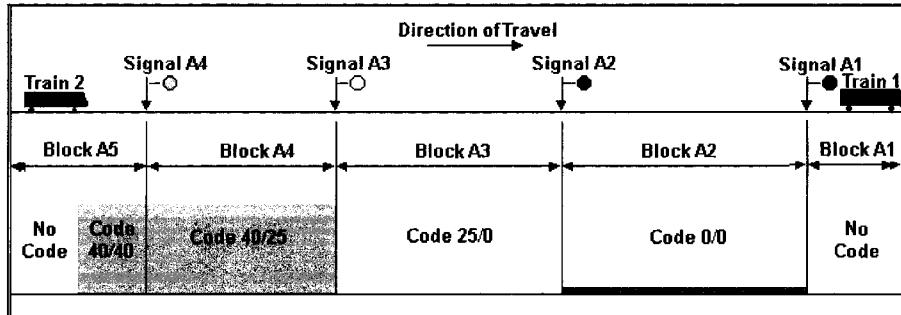


Figure 1-1 : Principe de signalisation des cantons fixes par consignes de vitesse.

Source : Site web de Railway Technical Web Pages,
<http://www.railway-technical.com/sigtxt2.html#Automatic-Train-Protection>

La signalisation par cantons fixes est conçue en fonction des consignes de vitesse. Lorsqu'il n'y a aucun train sur la voie, tous les signaux des cantons sont au vert, indiquant ainsi que la vitesse maximale peut être atteinte sans risque. Cependant, lorsqu'un train entre dans un canton, le signal de ce canton tombe au rouge, indiquant au train suivant que le canton est occupé et qu'il ne doit pas y pénétrer, il doit donc stopper. Pour accroître la sécurité, un canton tampon est ajouté. Le principe du canton tampon est de placer au rouge le signal du canton précédent celui sur lequel se retrouve le train. Ainsi, un train est toujours distancé, par son suivant, d'au moins un canton. Lorsque le train entre dans un nouveau canton, l'ancien canton tampon émet un signal de vitesse intermédiaire, indiquant ainsi au train suivant de réduire sa vitesse puisque le prochain est occupé. Ainsi de suite, en suivant l'avancement du train.

Le principe de signalisation de cantons fixes par consigne de vitesse est fiable en matière de sécurité, mais peut demander un grand espacement entre chacun des trains. Dans le but d'augmenter le nombre de trains sur les voies jusqu'à 20 % (Connor, 1998), il existe un principe de signalisation de cantons fixes par distance à faire ou « distance-to-go ». Ce principe de signalisation des cantons est fonction de la courbe de freinage du train. La vitesse d'un train entrant dans un canton est fonction de sa distance avec le train précédent. Plus le nombre de cantons séparant les deux trains est élevé, plus la vitesse du train qui suit est élevée. Si le train qui suit se rapproche de son précédent, sa vitesse réduira par palier proportionnellement à la réduction du nombre de cantons les séparant jusqu'à l'immobilisation complète si le train atteint le canton

suivant son précédent. Une visualisation des consignes de vitesses de ce principe est présentée à la figure 1-2.

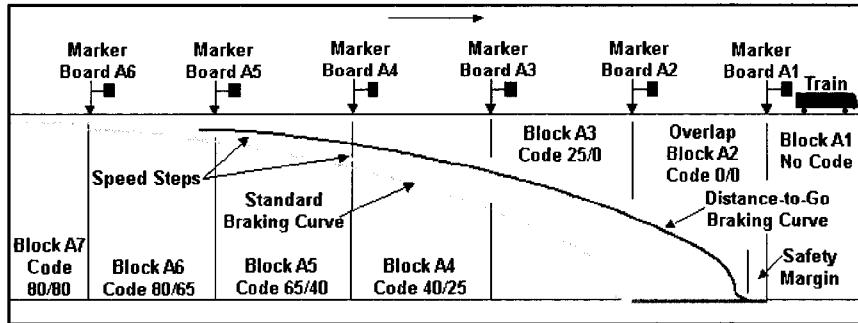


Figure 1-2 : Principe de signalisation des cantons fixes par distance à faire.

Source : Site web de Railway Technical Web Pages,

<http://www.railway-technical.com/sigtxt2.html#Automatic-Train-Protection>

Les métros d'aujourd'hui qui possèdent une grande densité opérationnelle se butent à leur limite de capacité due aux cantons fixes. Ainsi, dans le but d'augmenter cette capacité la signalisation par cantons mobiles a été développée (Pearson, 1973). Le principe de signalisation par cantons mobiles diminue le nombre d'équipements nécessaires sur les voies. En effet, plutôt que ce soit l'entrée de chacun des cantons qui possède l'équipement de consigne de vitesse, ce sont les trains et quelques antennes radios le long de la ligne. Tant et aussi longtemps que tous les trains circulent à la même vitesse et qu'ils possèdent une capacité de freinage identique, la distance de séparation des trains peut, en théorie, atteindre seulement quelques mètres, sachant qu'il est impossible pour le premier train de s'arrêter plus rapidement que celui qui le suit. Il n'est donc pas nécessaire de maintenir une grande distance de sécurité entre chacun. Cependant, un tel système requiert une surveillance accrue des mouvements des trains par des algorithmes logiciels (K. Li *et al.*, 2007; Takeuchi *et al.*, 2003). La figure suivante (figure 1-3) présente un exemple de l'attribution des consignes de vitesse à chacun des trains.

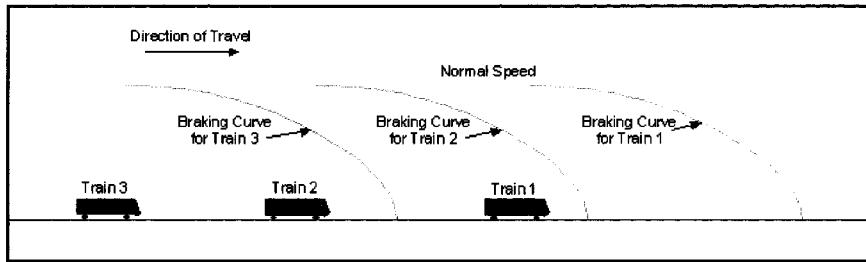


Figure 1-3 : Principe de signalisation des cantons mobiles.

Source : Site web de Railway Technical Web Pages,
<http://www.railway-technical.com/sigtxt3.html#Operation-With-Beacons>

Cependant, pour les cas où les métros possèdent des stations rapprochées cette méthode n'apporte pas de gains, puisque de toute façon, les arrêts en stations obligent les trains à s'immobiliser pour plusieurs secondes, retirant tous les bénéfices des cantons mobiles. De plus, un système à cantons fixes est souvent requis afin de servir d'appoint aux cantons mobiles et pour détecter des anomalies dans les voies, comme des ruptures.

Les bases de la sécurité ferroviaire demandent un découpage de la voie en cantons afin de signaler les consignes de vitesses à chacun des trains. Dans le but d'augmenter la sécurité et de limiter les erreurs associées aux mauvaises interprétations de consignes de vitesse, une infrastructure logicielle automatisée des consignes de vitesse peut y être couplée. En effet, dans les réseaux modernes de grande taille, la sécurité à l'intérieur des transports ferroviaires passe par un ensemble d'infrastructures physiques, mais aussi par l'application d'algorithmes et de logiciels. Les trains modernes possèdent donc un système embarqué d'interprétation des consignes de vitesse. Ces consignes sont passées directement du centre de contrôle vers les trains par différentes méthodes. Le signal peut être induit dans la voie ou transmis dans des balises réparties sur celle-ci. Ce signal est capté par l'application de patins frotteurs qui font contact avec la voie ou grâce à des antennes montées sur le train. La figure suivante (figure 1-4) illustre un train équipé d'antennes faisant la lecture d'une consigne transmise au travers d'une balise.

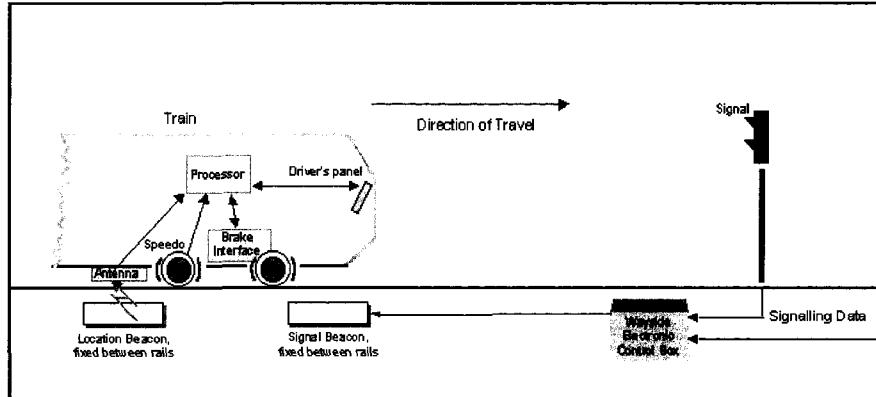


Figure 1-4 : Communication des consignes de vitesse par balises et antennes.

Sources : Site web de Railway Technical Web Pages,
<http://www.railway-technical.com/sigtxt3.html#Operation-With-Beacons>

Les consignes de vitesse sont transmises par des pilotes automatiques [PA]. Chacun des pilotes automatiques est responsable d'un certain nombre de cantons et relève directement du centre de contrôle qui le supervise. Les PA possèdent une liaison entre eux afin de permettre la gestion des consignes de vitesse sur toute une ligne. Le poste de commande centralisé [PCC] est lié à tous les PA afin d'assurer un suivi. Effectivement, l'information circule dans les deux directions, soit du PCC aux PA et vice versa, comme l'illustre la figure 1-5.

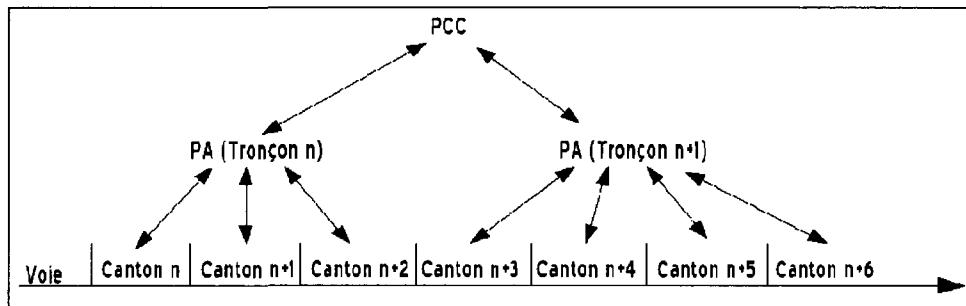


Figure 1-5 : Contrôle automatique des consignes de vitesse.

Source : <http://clem.robertlan.eu.org/trains/index.php?page=pages/metro/lille/index.html>

Ce suivi agit comme un système de localisation de véhicule automatique [AVL]. En effet, le canton exact sur lequel se retrouve chacun des véhicules est connu. La précision de localisation des véhicules est fonction de la résolution du découpage de la voie par les cantons. Pour Montréal, cette information est surtout utilisée dans le but d'afficher la position en temps réel des trains sur le tableau de commande optique

[TCO] du centre de contrôle. C'est donc le couplage des cantons avec les PA et le PCC qui permet d'obtenir un niveau de sécurité acceptable dans la circulation des trains sur le réseau.

Comme mentionné subséquemment, les soucis de sécurité exigent que lorsqu'un train atteint un canton, les PA placent la consigne de vitesse du canton précédent automatiquement à 0 km/h. De cette façon, aucun train ne peut se faire rattraper. Si jamais un train atteint un canton dont la consigne de vitesse est à 0 km/h, les freins d'urgence sont immédiatement appliqués. De plus, grâce aux circuits de voie [CDV] et aux relais électriques installés dans ceux-ci, le système détecte les défaillances comme un mauvais contact du frotteur ou la rupture des rails, dans ces cas, la consigne de vitesse du canton est automatiquement placée à 0 km/h. La figure 1-6 présente une schématisation des CDV.

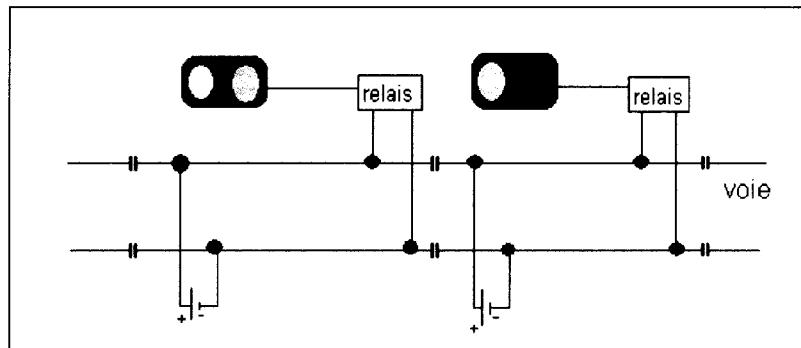


Figure 1-6 : Détail du circuit de voie.

Source : <http://www.comelec.enst.fr/~provost/metrotomat/final.pdf>

L'ensemble de ces technologies permet d'obtenir un grand niveau de sécurité, tellement que, pour certain système comme, par exemple, la « ligne 14 – Météor » du métro de Paris, les trains ne possèdent pas d'opérateur, ce qui peut changer radicalement l'approche de la société de transport envers ses usagers (Beauquier, 2004).

Dans les cas de signalisation de cantons fixes par consigne de vitesse, le positionnement des trains est connu. Cette connaissance du positionnement des trains apporte de l'information sur le mouvement des véhicules d'un réseau de transport en commun. Les études de mouvements des véhicules ne peuvent être effectuées que

grâce à des techniques de capture, d'archivage et de visualisation de ces mouvements. Pour ce faire, différentes techniques, autres que par cantons fixes, existent dans le monde du transport en commun, apportant chacune leur utilité.

1.3. Techniques et technologies associées aux mesures des mouvements

La faculté de mesurer avec précision des événements qui se produisent à l'intérieur d'un système de transport permet de modéliser finement le réseau afin d'apporter une planification plus juste. En effet, la planification du transport en commun est liée aux activités des usagers qui doivent se déplacer d'un espace à l'autre dans un certain temps. Ainsi, le choix des outils de mesure influence directement la capacité d'analyse du planificateur en lui permettant de déterminer si l'offre de transport rencontre les contraintes dans le temps et l'espace des usagers (Miller, 2004). Bien que, dans cette recherche, un seul outil de localisation de véhicule soit utilisé et imposé par le système, l'exploration de différents outils disponibles, au travers une brève revue, permet de souligner l'importance de ces systèmes dans le domaine des transports et de saisir que leur mise en place seule ne suffit pas à développer leur plein potentiel.

Des outils de précision ne furent pas toujours disponibles, c'est pourquoi les enquêtes sur un réseau de transport ce sont longtemps effectuées de façon manuelle. Ainsi, la précision des données pouvait être remise en cause par un certain manque d'uniformité et de constance lors de grandes enquêtes regroupant plusieurs employés, sur une longue échelle de temps. Ces techniques permettent néanmoins de mesurer des paramètres fondamentaux du transport, comme les temps de parcours entre deux points (FHWA, 1998). L'avènement des systèmes de localisation de véhicule automatique [AVL] dans les agences de transport, en 1969, a permis de récolter le même type d'information, mais de façon uniforme et constante (Okunieff, 1997). Aujourd'hui, les technologies de localisation de véhicule automatique sont des outils précis dans leurs mesures et apportent une quantité et une variété importante de données sur les paramètres

d'opérations autant au niveau spatial que temporel (Horbury, 1999). Tel que l'exprime la citation suivante, les planificateurs ont vite apprécié l'utilisation de ces systèmes.

« Since 1969, with the advent of the first demonstration projects, transit professionals, consultants, and operators have lauded the benefits of AVL [...] »

(Okunieff, 1997)

L'objectif d'un système AVL, dans le contexte du transport en commun, est d'améliorer le service aux usagers et de rendre ce service plus efficace pour ainsi réussir à augmenter l'achalandage. Le traitement des données d'espace, de temps et de vitesse recueillies par un système AVL permet de vérifier le respect du service avec l'horaire (Cathey *et al.*, 2003) et, dans certains cas, d'informer les usagers des différentes heures de passage (Furth, 2006). Les systèmes AVL permettent aussi d'améliorer la sécurité puisque la position des véhicules est connue en tout temps, ainsi, le temps de réaction des services d'urgence peut être amélioré. De plus, avec les archives des systèmes AVL, il est possible d'examiner les performances du réseau selon différents indicateurs. Aussi, les systèmes AVL peuvent être utilisés dans le but d'informer les usagers de la position exacte des véhicules en temps réel. Ils permettent la gestion de la flotte en ajustant l'offre des véhicules lors d'évènements ponctuels créés par des circonstances particulières. Finalement, ces systèmes obligent les agences de transport à améliorer leur gestion des données, autant au niveau de la collecte, de l'archivage et de la qualité de diffusion (Greenfeld, 2000).

Cependant, pour certaines agences de transport, les systèmes AVL ne sont pas exploités à leur plein potentiel puisqu'ils sont surtout utilisés à l'intérieur d'applications en temps réel, soit pour surveiller, ou soit pour informer les usagers des heures de passages (Furth, 2006). En effet, bien souvent, ces systèmes ne réussissent pas à archiver et à capturer des données qui pourraient être utiles dans l'analyse du réseau. Pourtant, ce type de technologie apporte aux planificateurs la possibilité de connaître avec précision les paramètres d'opération. L'utilisation de ces données réelles permet de pousser plus loin la performance du réseau de transport puisque le planificateur peut maintenant se

fier à des données uniformes et constantes (Horbury, 1999). La citation suivante permet de constater l'apport des technologies dans les systèmes de transport public.

« In response to the need to enhance public transportation, transit agencies are turning to advanced technologies to improve the safety, efficiency, and quality of their services. »

(Okunieff, 1997)

Un nombre important de techniques et de technologies automatisées sont utilisées dans le but de caractériser finement les réseaux de transport en commun dans le temps et dans l'espace. Des techniques de détection des véhicules par ondes radio ou par capteurs placés sur les panneaux de circulation ont été les premiers à faire leur apparition. Aujourd'hui, c'est l'avènement des systèmes de positionnement global [GPS] qui contribue à la « révolution » de l'analyse des transports (Mintsis *et al.*, 2004; Zito *et al.*, 1995). En effet, leur flexibilité, leur précision et leur coût, somme toute relativement faible, amènent de plus en plus de sociétés de transport à les utiliser sur leurs trains, trams ou autobus. Cependant, puisque les systèmes GPS requièrent un lien direct du satellite émetteur à l'antenne réceptrice, ils ne sont d'aucune utilité pour les systèmes de métro. Toutefois, les stratégies employées afin de mesurer avec précision l'emplacement des véhicules et les techniques utilisées pour la cueillette de l'information de localisation peuvent s'appliquer pour cette recherche.

Tout comme pour l'analyse des données disponibles pour cette recherche, les GPS combinent différentes stratégies afin de localiser finement les véhicules. En effet, les expériences avec les antennes GPS démontrent que le signal est sensible et peut engendrer de mauvaises lectures. Ces systèmes AVL ne dépendent donc pas uniquement des GPS. Plusieurs types de techniques existent afin d'estimer avec précision l'emplacement des véhicules, là où les signaux GPS ne peuvent être captés, que ce soit par l'ajout d'instruments à bord des véhicules pour le « Dead-Reckoning » (Kubrak, 2007) ou par le développement d'algorithmes logiciels afin d'effectuer des « map matching » (Quddus *et al.*, 2003). Aussi, la combinaison des signaux GPS avec les signaux cellulaires permet d'obtenir une géolocalisation plus précise. Tout ceci

démontre que l'application de plusieurs techniques est souvent nécessaire afin de concevoir un système AVL efficace.

Comme expliqué dans la section précédente, la position des trains, dans le métro de Montréal, est connue grâce à un découpage des voies en cantons de longueur variable. Chacun des cantons renvoie un signal d'occupation au centre de contrôle, afin de permettre un suivi des véhicules en temps réel. Cependant, la localisation ou la vitesse exacte d'un train à l'intérieur d'un canton demeure inconnue. Étant donné la richesse des informations rendues disponibles par les AVL, les principales difficultés deviennent la capacité d'archivage et d'interprétation de ces archives.

1.4. L'utilisation de grandes quantités de données pour caractériser une offre de transport en commun

Comme décrit dans la section précédente, les systèmes de localisation de véhicule automatique peuvent fournir une quantité extraordinaire de données. Puisque le sujet de recherche de ce mémoire se concentre sur les données recueillies à partir d'un système de localisation automatique de véhicule, provenant des cantons fixes de longueurs variables du métro de Montréal, une synthèse sur l'exploitation de ces données apporte un éclairage sur les potentialités révélatrices d'une telle source de données. Si ces données sont acquises, archivées et analysées correctement, une grande quantité d'informations opérationnelles, spatiales et temporelles deviennent accessibles afin de permettre des améliorations de service. Cette grande quantité d'informations qui peut maintenant devenir disponible déstabilise les agences de transport qui, par le passé, devaient composer avec une faible quantité de données sur l'opération du service. Cette abondance de données est perçue comme une révolution, tel que l'exprime la citation suivante.

« The transit industry is in the midst of a revolution from being data poor to data rich. »

(Furth, 2006)

Auparavant, la faible quantité de données disponibles a conduit les planificateurs à utiliser des valeurs moyennes puisque ces valeurs sont facilement calculables avec un faible niveau d'échantillonnage. Le nombre important d'informations disponible grâce aux AVL permet de mesurer avec plus de précision, par exemple, le temps de retournement des véhicules et de resserrer de plus près la plage allouée à ces manœuvres, plutôt que d'ajouter théoriquement 15 ou 20 % du temps actif (Furth, 2006).

Avec une plus grande quantité d'informations, les moyennes peuvent toujours être calculées, cependant, afin d'obtenir les moyennes à partir d'échantillons, certains tests statistiques doivent être effectués. En effet, la distribution de la population échantillonnée doit être vérifiée. La forme de distribution des données est affectée par la méthode de collecte. Les grands échantillonnages des données recueillies de façon uniforme et constante se distribuent de façon normale (Anonyme, 2001). Ainsi, avec une telle distribution, le calcul de la moyenne inclut des valeurs qui se situent aux extrêmes. Ces valeurs influencent la moyenne et peuvent la fausser. Dans le but d'obtenir une moyenne avec un certain niveau de confiance, il est nécessaire de retirer ces valeurs extrêmes et de recalculer la moyenne. Le nombre d'écart-types séparant la moyenne et les valeurs extrêmes rejetées déterminent le niveau de confiance de celle-ci. Ainsi, selon la quantité de données disponibles, un niveau de confiance de 95 % (2 écart-types) rejette cinquante pour cent des valeurs et permettrait d'obtenir une moyenne qui ne serait pas influencée par des phénomènes hors du commun.

Bien que les valeurs extrêmes du réseau soient écartées dans les mesures de moyennes, leur analyse directe permet de détecter, avec précision, les points d'amélioration du service. Des courbes de tendances générales peuvent être extraites de ces données afin de détecter si les valeurs extrêmes se retrouvent plus fréquemment à certaines périodes de la journée, de la semaine ou de l'année (Furth, 2006).

La présentation de chiffres ou de tableaux chiffrés demande une grande capacité d'analyse afin de comprendre les phénomènes et les tendances. C'est pourquoi l'utilisation de graphiques et d'images améliore de façon importante la clarté et augmente les capacités d'analyse des événements. Ainsi, savoir capter, archiver et traiter les données ne suffit pas, il est primordial de posséder la capacité de les diffuser et de les présenter de façon à ce que les décideurs, qui ne sont pas nécessairement issus des milieux du transport, puissent interpréter rapidement les faits saillants. Différents types de diagrammes sont utilisés dans le but de simplifier la caractérisation d'un réseau de transport en commun. Ces diagrammes permettent d'interpréter le déplacement et la vitesse des véhicules dans le but d'offrir une visualisation directe et précise des événements dans le temps et dans l'espace. La citation suivante rappelle que les événements en transport sont spatiotemporels.

« A transportation system's components are spread over space and interact over time. »

(Manheim, 1979)

Afin de représenter des événements spatiotemporels, différents graphiques sont communément utilisés. Le diagramme espace-temps offre la visualisation des UT le long des lignes de transport et permet d'observer les parcours de chacun de ceux-ci dans le temps. Le diagramme vitesse-temps permet de discerner les performances des véhicules, en ce qui concerne la consommation énergétique et le temps de parcours de station à station. Puis, le diagramme espace-vitesse permet de bien comprendre le réseau et les structures de chacune des lignes en observant les accélérations, les freinages et les vitesses atteintes sur chacun des tronçons de ligne.

L'augmentation en puissance des ordinateurs permet de préciser les informations qui peuvent être présentées en un seul graphique. En effet, plusieurs dimensions peuvent être données à un graphique, par les axes, les couleurs, les formes ou la transparence. L'important, dans le cas où les graphiques contiennent plusieurs dimensions d'informations, est de rendre l'interprétation simple et précise pour le lecteur. L'ajout

d'informations peut alourdir visuellement un graphique, c'est pourquoi l'emploi d'une documentation claire et détaillée est important.

Aussi, puisque l'avènement des AVL rend disponible une quantité impressionnante de données, des représentations spatialisées deviennent fort utiles. En effet, la représentation spatialisée permet à tout décideur, spécialiste en la matière ou non, d'avoir une vue d'ensemble sur le sujet et de constater géographiquement sur le réseau les différents attributs de celui-ci. La représentation visuelle d'ensemble de données et d'attributs est un concept à la base même de la compréhension humaine, comme le mentionne la citation suivante.

« Même en absence de connaissances de haut niveau ou de connaissances sémantiques, le système visuel humain organise spontanément les éléments dans son champ de vision. »

(Ressources naturelles Canada, 2006)

Dans le but de faire de la représentation spatialisée, les systèmes d'information géographique [SIG] ont fait leur apparition il y a plus de trente ans. Les SIG offrent un espace de travail à l'intérieur duquel des couches d'informations de différentes natures sont représentées sous le format de cartes. La prochaine citation situe l'utilisation faite des SIG.

« GIS [Geographic information system] serves as a spatial database management system (SDBMS) for managing georeferenced data and a spatial decision support system (SDSS) for mapping and communicating geographic information to colleagues, decision makers and stakeholders. This is a perfectly acceptable use of GIS, particularly in transportation analysis where the stakeholders can be a large and diverse group »

(Miller, 1999)

Lorsque les données sont accessibles, l'établissement de celles-ci en couches sur le réseau modélisé permet de visualiser géographiquement différents types d'indicateurs de performance (Thevenin, 2001). La figure 1-7 illustre, dans la partie gauche, les éléments de la modélisation géographique d'un secteur de transport qui sont constitués

des couches du réseau et du territoire. Puis, dans la partie de droite, l'ensemble de la modélisation géographique auquel une information opérationnelle a été ajoutée.

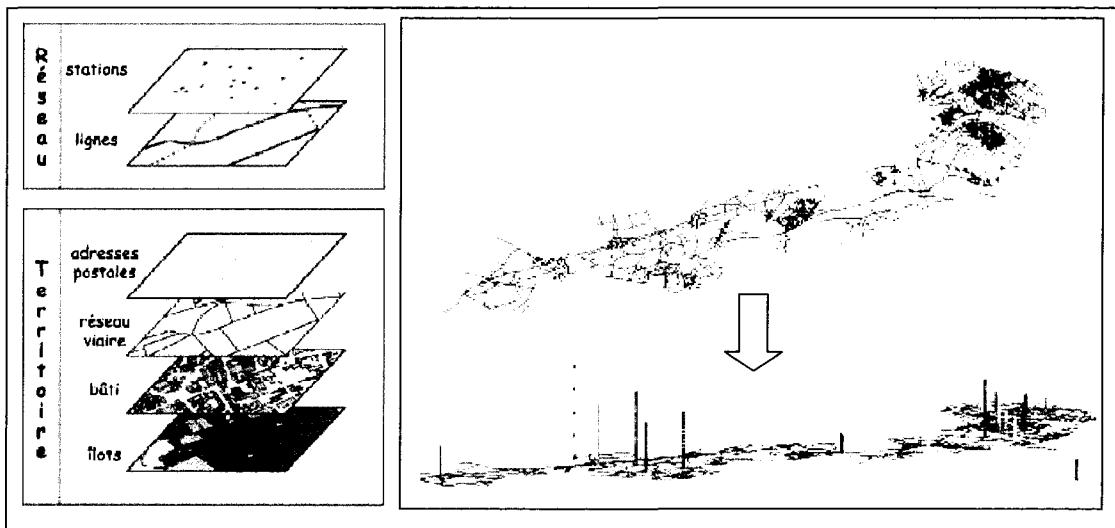


Figure 1-7 : Représentation spatialisée des informations par couche de données.

Source : Inspiré de (Thevenin, 2001).

La représentation spatialisée passe par une modélisation du réseau. Comme décrit dans une section précédente, un réseau est caractérisé par ses lignes et ses arrêts. Les arrêts sont les points d'embarquements dans les véhicules du réseau par un usager. À l'intérieur de la modélisation géographique, plusieurs méthodes peuvent être utilisées. En effet, une première méthode consiste à codifier les axes routiers et les intersections. Dans ce cas, des nœuds représentent une intersection où il peut y avoir plus d'un arrêt. Puis, ces nœuds sont reliés par des liens, représentant les chemins d'accès réels par le réseau de voirie. Sur ces liens, différentes échelles de poids peuvent y être associées afin de calculer différents indicateurs, dont le temps de parcours pour l'usager ou le nombre de kilomètres pour les véhicules. Cependant, ces liens ne sont pas associés à chacune des lignes puisque plusieurs lignes peuvent passer par le même tronçon. Une seconde méthode de représentation spatialisée prévoit l'établissement d'un nœud pour chacun des arrêts et d'un lien pour chacune des lignes (Chapleau, 2001). La figure suivante (figure 1-8) illustre ces deux méthodes.

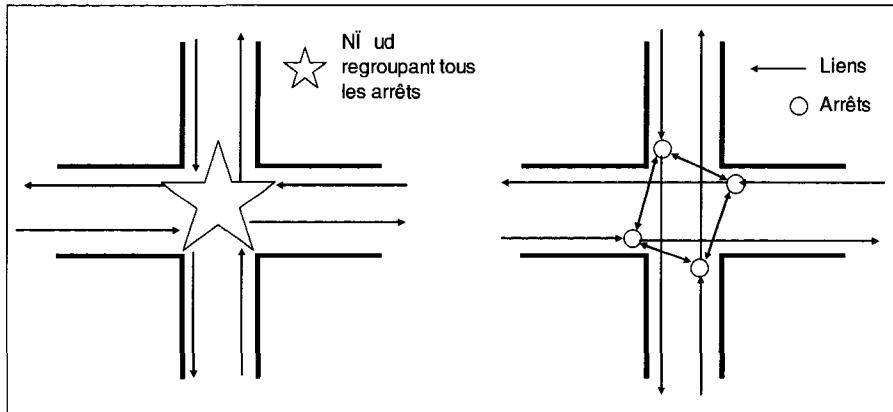


Figure 1-8 : Représentation spatialisée des nœuds d'arrêts d'une intersection.
Source : Inspiré de (Chapleau, 2001).

En plus de décrire chacune des lignes, les liens modélisent tous les déplacements des usagers à l'intérieur du réseau. Ce type de modélisation apporte l'avantage de tenir compte de tous les déplacements de chacun des usagers à l'intérieur du réseau et d'en appliquer les poids correspondants. Même si l'usager n'est plus à l'intérieur d'un véhicule de transport, il peut demeurer captif du réseau, par exemple, lors d'une correspondance. En effet, l'usager n'a pas atteint sa destination finale et doit demeurer dans le réseau afin de la rejoindre.

Bien que surtout utilisés dans des applications de représentation territoriale, les logiciels SIG possèdent un gestionnaire de base de données permettant de créer différents graphiques qui deviennent navigables et dont les informations sur chacun des points demeurent intactes. De plus, plusieurs attributs peuvent être octroyés à chacune des données. En effet, elles peuvent être représentées en tant que points, lignes ou de polylignes. Aussi, plusieurs dimensions peuvent être affectées à chacun des attributs, par la couleur, la forme, la grosseur et la couleur des traits.

Maintenant que les techniques de capture, d'archivage, de traitement et de visualisation des données associées aux phénomènes de transport liés aux mouvements de véhicules dans l'espace et le temps ont été établies, la section suivante s'attaque à la détermination des indicateurs de performance les plus pertinents dans la caractérisation d'un système de transport en commun.

1.5.Les indicateurs de performance

La modélisation espace-temps du métro de Montréal à partir de données provenant de la localisation des véhicules fournies par des cantons fixes de longueur variable, doit nécessairement passer par la détermination des indicateurs de performance pertinents. Tout d'abord, il faut mentionner que la valeur d'un indicateur de performance d'un réseau de transport dépend de la perspective de chacun des intervenants. La figure 1-9 permet de résumer les catégories de mesure de performance selon chacun des intervenants. Ainsi, les usagers sont attentifs aux indicateurs qui permettent de mesurer le niveau de service [LOS], l'accessibilité, la fiabilité, la sécurité et la qualité offerte. La communauté se soucie des coûts engendrés par un tel service et des bénéfices que ce service rapporte, en réduisant, par exemple, le trafic et la pollution de l'air. L'agence de transport se préoccupe beaucoup plus des indicateurs de performance d'opération qui permettent de détecter comment se comporte le service. Du point de vue des véhicules ou des chauffeurs, les indicateurs de performance importants sont les temps de parcours et la configuration du réseau (Kittelson and Associates, 2003). Cette section ne fait qu'identifier les indicateurs de performance pouvant être utiles à cette recherche en indiquant leurs utilités. Leurs explications mathématiques par des formules sont placées au chapitre trois.

		PERFORMANCE MEASURE EXAMPLES				
		TRAVEL TIME		AVAILABILITY		
COMMUNITY	VEHICLE/DRIVER	CUSTOMER ("QUALITY OF SERVICE")		SAFETY & SECURITY		MAINTENANCE & CONSTRUCTION
		• Transit-Auto Travel Time		• Transfer Time		
		• Service Coverage		• Frequency		
	AGENCY	• Service Denials		• Hours of Service		
		• Reliability		• Passenger Environment		
		• Comfort		• Customer Satisfaction		
TRANSPORTATION	TRANSIT	• Vehicle Accident Rate		• Crime Rate		ECONOMIC
		• Passenger Accident Rate		• % Vehicles with Safety Devices		
		• Road Calls		• Spare Ratio		
	CAPACITY	• Fleet Cleaning		• Construction Impact		
		• Ridership		• Cost Efficiency		
		• Fleet Maintenance Performance		• Cost Effectiveness		
ENVIRONMENT	TRANSPORTATION	• Community Economic Impact		• Environmental Impact		SOCIAL
		• Employment Impact		• Mobility		
		• Vehicle Capacity		• Roadway Capacity		
	TIME	• Volume-to-Capacity Ratio				
		• Delay		• System Speed		

Figure 1-9 : Indicateurs de performance selon les intervenants, les catégories et exemples.
Source : (Kittelson and Associates, 2003)

1.5.1. L'accessibilité au réseau

Un premier indicateur de performance apportant des indices sur l'accessibilité au réseau de transport est la longueur des lignes, en kilomètres. Cette mesure permet de

connaître l'étendue totale du réseau. Pour finalement la comparer à la région totale qui est desservie afin de mesurer la couverture du service. Le papier de Hensher (2007) utilise cette donnée d'accessibilité afin de donner des pistes de solutions dans le but d'accroître l'attrait envers les modes de transports publics durables. La couverture du service permet aussi d'apprécier l'accessibilité au service par les citoyens se trouvant à distance de marche des stations. Des études ont porté sur les effets de l'implantation du métro sur le développement de la ville et sur les types de citoyens qui s'y établissent. Le métro de Montréal, établi depuis 40 ans, a un effet structurant sur le territoire et sur la localisation des personnes. En effet, les personnes s'établissant dans les rayons d'influence du métro ont des caractéristiques démographiques distinctes comparativement à l'ensemble des gens habitant la grande région métropolitaine (Chapleau, 1992). Les zones d'influence d'un métro sont évaluées à partir des stations (nœuds) par deux méthodes différentes. Une méthode consiste à utiliser les distances euclidiennes (rayon de cercles) ayant les stations comme centre. La seconde méthode consiste à prendre le cheminement sur les autres réseaux, tel que le réseau autoroutier et les trottoirs. La distance d'influence maximale est de 1000 mètres (ou 3000 pieds), ce qui correspond à une zone de bonne attractivité (Chapleau, 1994). La combinaison des deux méthodes permet d'inclure dans la zone d'influence 306 centroïdes de Secteurs de Dénombrement [SÉD] utilisés lors du recensement de 2001 par Statistiques Canada (Voyer, 2006). Tel que présenté par Voyer (2006), les caractéristiques démographiques du voisinage du métro se divisent en six catégories distinctes :

« [...] l'analyse des variables socio-économiques et démographiques (SÉD) des 65 stations du réseau de métro fait ressortir six catégories distinctes. En effet, l'ensemble des stations se distribue selon les caractéristiques reliées à la distribution des populations, la langue parlée, le niveau de scolarité, les revenus, la constitution des ménages, la mobilité des résidents et le type d'habitation. »

Basée sur ces catégories, une distinction des profils sociodémographiques peut être observée pour chacune des stations.

Puis, la longueur moyenne entre chacune des stations renseigne sur la facilité d'accès au réseau et sur l'utilisation qui est faite du territoire (Alterkawi, 2006). La distance entre les arrêts a été choisie dans le but de satisfaire deux objectifs opposés. D'un côté, les arrêts sont suffisamment distancés afin de minimiser le temps de parcours, et de l'autre, les arrêts sont suffisamment près l'un de l'autre afin de maximiser l'accès au réseau (Vuchic, 2005).

Aussi, la superficie du métro par rapport à la superficie d'un secteur de ville peut être utilisée dans l'élaboration d'explications comportementales des individus voyageant à l'intérieur de celui-ci. En effet, l'étude de Tremblay et al. (2001) utilise cet indicateur afin comparer le taux de criminalisation du métro avec l'ensemble de l'île de Montréal.

1.5.2. L'intervalle et la fréquence

L'intervalle est le temps entre le moment où deux véhicules passent par le même point fixe, sur une ligne et dans la même direction. L'intervalle est une variable qui oppose les usagers et les planificateurs. En effet, d'un côté, les usagers désirent un temps d'intervalle court afin de réduire leur temps d'attente, tandis que du côté de l'opérateur, il est plus économique de faire circuler des véhicules qui possèdent une grande capacité, mais à des intervalles plus espacés. Dans ces cas, l'intervalle de temps des véhicules est généralement choisi par un compromis entre le temps d'attente de l'usager et les frais d'exploitation. L'intervalle le plus long sur une ligne est déterminé selon la politique de l'agence de transport, d'après le service minimal autorisé sur la ligne. À l'opposé, l'intervalle le plus court est déterminé par les caractéristiques des installations disponibles sur la ligne. Ce temps d'intervalle est influencé par les technologies utilisées et le degré de sécurité exigé. Cet intervalle est aussi influencé par les temps d'arrêt aux stations. En fait, le temps d'intervalle le plus court est déterminé par le temps le plus grand entre le facteur de sécurité sur la ligne et les temps d'arrêt aux stations. Mais, selon Vuchic (2005), dans la grande majorité des systèmes de transport, le temps d'intervalle est pratiquement toujours donné par les temps d'arrêt

aux stations. Les temps d'intervalle sont utilisés afin de permettre l'évaluation des temps totaux d'accès au réseau de transport en commun (Wardman *et al.*, 2004).

Son opposé, la fréquence, renseigne sur le nombre de fois où le service est offert dans une période déterminée, soit par minute, par heure, par jour, etc. La fréquence pour une ligne est déterminée selon la demande des usagers. Une mesure directe sur les véhicules en service permet de constater les variations qui peuvent s'avérer être hors du contrôle des agences de transport (Kittelson and Associates, 2003).

1.5.3. Capacité réalisable

La capacité d'un système de transport détermine la quantité d'usagers qui peut être transportée. Cette capacité permet de déterminer la nécessité de mettre en service de nouveaux équipements ou d'améliorer le service pour offrir un déplacement sécuritaire et confortable aux usagers.

Bien entendu, les plans permettent de déterminer mathématiquement combien d'usagers peuvent être assis et combien peuvent tenir debout. Cependant, ce seul concept de capacité ne tient pas compte de plusieurs facteurs, dont le fait que les usagers n'arrivent pas aux trains en flot constant, que certains usagers ne désirent pas s'entasser dans un train bondé ou que la régularité des trains peut être perturbée. Tout d'abord, selon des aspects socio-économiques, les trains, surtout aux heures de pointe, circulent avec un taux d'occupation variable, comme le décrit la citation suivante.

« [...] long before crowding levels [...] [...] reached New York levels, prospective passengers would choose to travel by a different route, by a different mode, at a different time, or not at all [...] [...] outside the largest, most congested urban areas, the level of crowding that transit passengers appear willing to tolerate falls well short of theoretical “design” or “maximum” vehicle capacity [...] »

(Demery, 1994)

Afin de définir correctement la capacité ferroviaire, il est important de retenir que le nombre d'usagers transportés est en deçà de la capacité théorique ou conceptuelle des véhicules qui composent le train, que la capacité de la ligne varie selon les limites de

temps de la planification et que des facteurs de diversité d'embarquement venant de la réalité doivent être ajoutés. Cela nécessite une définition de la capacité pratique, qui est appelée la capacité réalisable. La capacité réalisable tient compte le fait que la demande varie au cours de l'heure de pointe et que tous les trains ne sont pas remplis uniformément. La définition de la capacité réalisable est *le nombre maximal de passagers qui peuvent être transportés en une heure dans une direction sur une seule voie tenant compte de la diversité de la demande* (Parkinson et al., 1996). La capacité des véhicules influence directement la fréquence de service, qui elle influence la capacité de la ligne.

1.5.4. Temps de parcours et vitesse

Le temps de parcours est défini comme étant le temps nécessaire pour traverser un itinéraire entre deux points d'intérêts (FHWA, 1998). La mesure du temps de parcours apporte un indicateur utile dans la comparaison avec les autres modes de transport. Ainsi, la performance de ce mode de transport peut être évaluée par rapport aux autres choix qui se présentent aux usagers. Le calcul des temps de parcours comprend les temps d'arrêt en station et les temps actifs (Robertson et al., 1994). Le temps de parcours est un indicateur important pour les usagers qui veulent se déplacer à l'intérieur d'un réseau de transport en commun. Les usagers ont le souci de réduire le plus possible leur temps de déplacement. Dans cette perspective, divers outils de recherche opérationnelle ont été développés dans le but de les renseigner sur les lignes optimales à emprunter afin d'obtenir le temps de parcours le plus court (Sarakinis, 2006; Trepanier et al., 2003). Cependant, d'autres recherches tendent à définir les temps de parcours comme étant une période inévitable qui n'est pas seulement définie par le temps passé à l'intérieur du réseau, mais qui est relié au confort et au bien-être ressentie et qui peut être mis à profit par l'usager (Jain et al., 2007; Kaufmann, 2002). Ainsi, la vitesse de parcours est liée de très près au temps de parcours puisque les deux sont interdépendants. Tout comme le temps de parcours, la vitesse renseigne sur la capacité des véhicules à circuler au travers du réseau. La moyenne de la vitesse de

parcours d'une ligne de transport permet d'identifier s'il y a eu de la congestion ou s'il y a eu des problèmes d'embarquement et de débarquement dans les véhicules.

1.6. Conclusion

L'ensemble des éléments parcourus dans ce chapitre permet maintenant d'établir une méthodologie assurant une caractérisation détaillée du métro de Montréal par le traitement des données disponibles. Tout comme l'étude de Dixon et al. (2006), l'utilisation d'un outil de visualisation permettrait de rapidement constater les indicateurs de performance du métro. Cependant, pour cette étude, les données disponibles doivent être vérifiées et épurées au préalable afin de retirer les erreurs qui ont pu s'y glisser. Le but de cette recherche n'est pas de créer un outil d'interrogation des données, mais plutôt de confirmer que les données disponibles peuvent être interprétées selon les indicateurs de performance décrits dans cette section. Encore une fois, afin de souligner l'importance du propos, l'arrivée massive de nouvelles données provenant des éléments du réseau ainsi que les nouvelles technologies informationnelles demande aux planificateurs de transport d'évoluer dans leur approche en matière de manipulation de données afin de se sortir du tourbillon de toute l'information disponible. En effet, l'ajout de données bonifie, mais du même souffle, complexifie l'information disponible qui évolue dans le temps et dans l'espace. Cette nouvelle problématique force les planificateurs à élaborer des techniques de stockage, de traitement et de visualisation de données efficaces. L'aspect visualisation ne doit pas être laissé pour compte puisque, malgré la complexité des résultats, le message transmis doit être limpide et compréhensible par l'ensemble des décideurs qui ne sont pas nécessairement des spécialistes du transport en commun. Plusieurs outils informatiques, tels que les SIG, les modélisations tridimensionnelles et les graphiques à plusieurs dimensions aident dans l'exercice de cette tâche. Aussi, étant donné que les valeurs réelles et complètes sont maintenant disponibles pour l'ensemble des composantes du réseau, les analyses classiques posées sur des moyennes peuvent faire place à l'analyse directe des données extrêmes. Cela permet de dévoiler les

problématiques récurrentes du réseau et de concentrer les efforts directement sur celles-ci.

CHAPITRE 2 - MÉTHODOLOGIE

Ce chapitre présente la méthodologie qui sera utilisée afin de structurer correctement les données provenant du système de localisation des véhicules du métro de Montréal. Au départ, la mise en place des systèmes de pilote automatique à l'intérieur des métros avait pour seul but d'améliorer la sécurité et le service offert. Ainsi, les données archivées doivent subir un certain nombre de manipulations avant leur analyse. En effet, plusieurs problématiques doivent être discutées, dont les problèmes d'exactitude des analyses à partir des données, les erreurs de lecture et certaines anomalies. Les données de localisation de train recueillies sont ici présentées pour l'ensemble des lignes du réseau du métro de Montréal, à l'exception de la « ligne 4 – jaune », pour laquelle il n'y a pas de système de localisation de véhicule automatique. Mais d'abord, le contexte du métro de Montréal est présenté dans le but d'introduire le système à l'étude et de comprendre à partir de quelles infrastructures proviennent les données. Ceci permettra d'identifier et de corriger les erreurs potentielles cachées à l'intérieur des données.

2.1. Contexte montréalais

Le métro de Montréal a ouvert ses 26 premières stations au public en 1966 en préparation de l'exposition universelle de Montréal de 1967. Depuis, le métro s'est étendu pour atteindre aujourd'hui 68 stations, réparties en quatre lignes. Il est administré par la société de transport de Montréal [STM]. La STM est responsable de l'organisation des systèmes de transport en commun de l'île de Montréal. Elle a comme mission de favoriser et d'organiser les déplacements par transport collectif des personnes voyageant sur le territoire qu'elle dessert. Son territoire est l'île de Montréal qui est divisée en seize villes, auxquelles appartient la ville de Montréal, composée de ses dix-neuf arrondissements. De plus, la STM couvre un territoire qui s'étend au-delà de l'île de Montréal. En effet, le métro de Montréal rejoint la ville de Longueuil sur sa

rive-sud et, depuis avril 2007, la ville de Laval au nord, grâce à un prolongement de la « ligne 2 – orange ». La figure 2-1 présente les quatre lignes et l'étendue du métro de Montréal.



Figure 2-1 : Plan du réseau du métro de Montréal.
Source : Site Web de la STM, www.stm.info.

2.1.1. Les infrastructures du métro de Montréal

Cette section présente les différentes infrastructures du métro de Montréal dans le but d'assurer une interprétation et une utilisation juste des données d'occupation de voie recueillies pour les expérimentations de cette recherche. Cette section n'est qu'un résumé historique et technique des infrastructures du métro de Montréal. Afin d'obtenir plus de détails, la lecture de l'annexe F est recommandée.

Tout d'abord, deux types de matériel roulant sont utilisés à l'intérieur du métro de Montréal, soit : les voitures MR-63 de la compagnie Canadian Vickers qui sont en

service depuis 1966, utilisées aujourd’hui uniquement sur la « ligne 1 – verte », et les MR-73 de l’entreprise Bombardier Transport en service depuis 1976 et utilisées sur les autres lignes (Anonyme, 2002). Les différences importantes entre ces deux types de voitures, intéressantes pour la recherche, résident dans les systèmes de traction et de freinage. Les voitures MR-63 possèdent un combinateur de démarrage résistif pour la traction et un système de freinage rhéostatique commandé par cran, alors que les voitures MR-73 sont équipées d’un hacheur de courant à commande continue. Ces voitures sont aussi équipées d’un système de freinage par récupération (Allaire *et al.*, 1994). L’accélération initiale pour le modèle MR-63 est de $1,33 \text{ m/s}^2$ et de $1,43 \text{ m/s}^2$ pour le modèle MR-73 (Anonyme, 2002). Typiquement, l’accélération des voitures MR-73 est constante jusqu’à 75% de sa charge à bord maximale. La STM possède 759 voitures de métro. Ces véhicules sont munis de roues sur pneumatiques. À l’époque de la conception du métro, la technologie sur pneumatiques possédait l’avantage d’avoir une meilleure adhérence sur la voie que la technologie des roues d’acier. Ainsi, l’augmentation de l’adhérence offre une meilleure accélération au démarrage, un meilleur freinage et le franchissement de dénivellations plus importantes. La figure suivante (figure 2-2) illustre une partie du profil d’une voiture munie de ses roues sur pneumatiques.

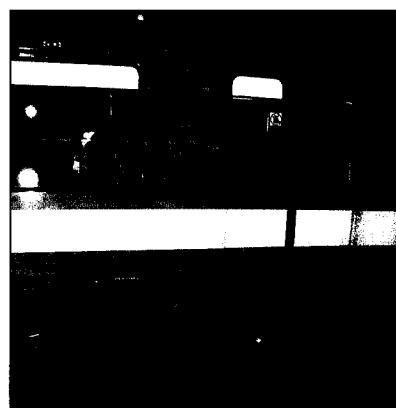


Figure 2-2 : Vue des pneumatiques du matériel roulant du métro de Montréal.
Source : <http://fr.wikipedia.org/>

Chacune des voitures est équipée de deux bogies. Les bogies possèdent quatre roues d’acier classiques et quatre pneumatiques (se référer à la figure 2-3). Les

pneumatiques, de diamètre supérieur aux roues d'acier, assurent la traction, le freinage et le guidage, tandis que les roues d'acier sont utilisées dans les cas d'urgence de crevaison ou lors de manœuvre dans les aiguillages. Quatre roues pneumatiques horizontales sont ajoutées au bogie afin de guider le train dans sa voie, elles sont appelées roues de guidage. Il existe deux types de voitures dans le métro de Montréal, les voitures tractions et les voitures remorques. Une voiture remorque est toujours ceinturée de deux voitures tractions. Ainsi, le train du métro est à la fois poussé et tiré. Sur les voitures tractions, les bogies sont équipés d'une prise en charge de l'alimentation électrique du système traction. Sur ces bogies, deux frotteurs et deux patins sont présents. Les frotteurs s'appuient sur la barre de guidage électrifiée et les patins s'appuient sur le rail de fer pour le retour du courant et pour faire la lecture des consignes de vitesse.

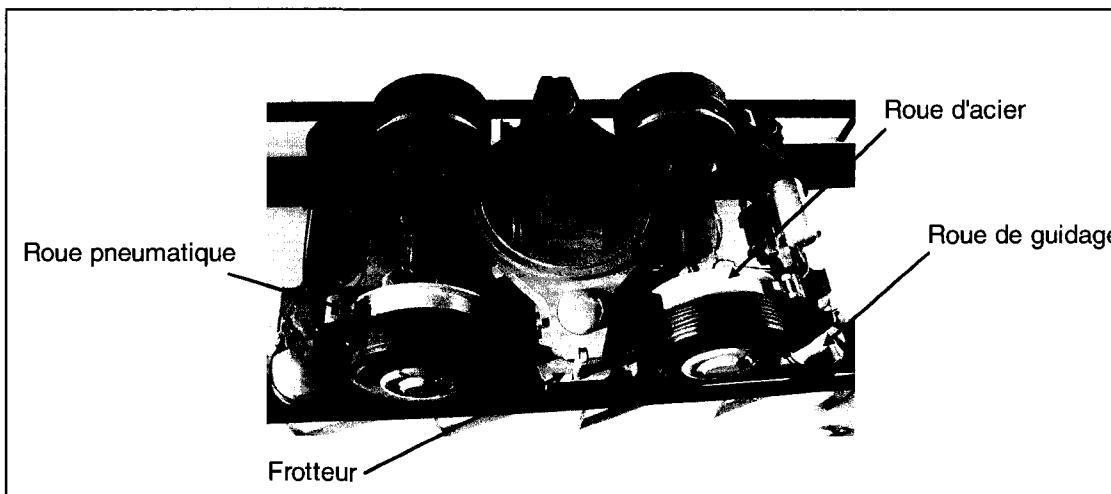


Figure 2-3 : Bogie d'un système de métro sur pneumatiques.

Source : inspiré de <http://fr.wikipedia.org/>

Afin de répondre à la demande, le métro peut être composé d'un, deux ou trois éléments de trois voitures, ce qui en fait des trains de 50.8, 101.6 ou 152.4 mètres de long. Le tableau 2-1 résume les caractéristiques de masse et de capacité théoriques des voitures et des véhicules.

Tableau 2-1 :Caractéristiques des voitures

Caractéristiques des trains						
Type de voiture	Nombre de voyageurs			Estimation de la masse (kg)		
	Assis	Debout	Total	Usagers	En vide	En charge
Traction	40	120	160	10 890	26 990	37 880
Remorque	40	120	160	10 890	20 180	31 070
1 élément	120	360	480	32 670	74 160	106 830
2 éléments	240	720	960	65 340	148 320	213 660
3 éléments	360	1080	1440	98 010	222 480	320 490

Source : (Communauté urbaine de Montréal *et al.*, 1983)

La figure 2-4 démontre les dimensions physiques des voitures tractions et permet de situer les bogies sous ces véhicules.



Figure 2-4 : Plan et élévation d'une voiture motrice.

Source : (Communauté urbaine de Montréal *et al.*, 1983)

Les trains du métro de Montréal circulent sur des voies équipées de rails en acier, de pistes de roulement et de barres de guidage. Les rails en acier permettent la circulation de véhicules ferroviaires classiques, tels que les véhicules d'entretien. Elles permettent aussi le retour du courant traction des véhicules de métro et la lecture des consignes de vitesse grâce aux patins installés sur les bogies des véhicules. La barre de guidage, en plus de guider le métro, permet à celui-ci de capter le courant traction grâce aux frotteurs installés sur les bogies. La figure suivante (figure 2-5) illustre, en plan de coupe, les composantes des bogies et de la piste de roulement.

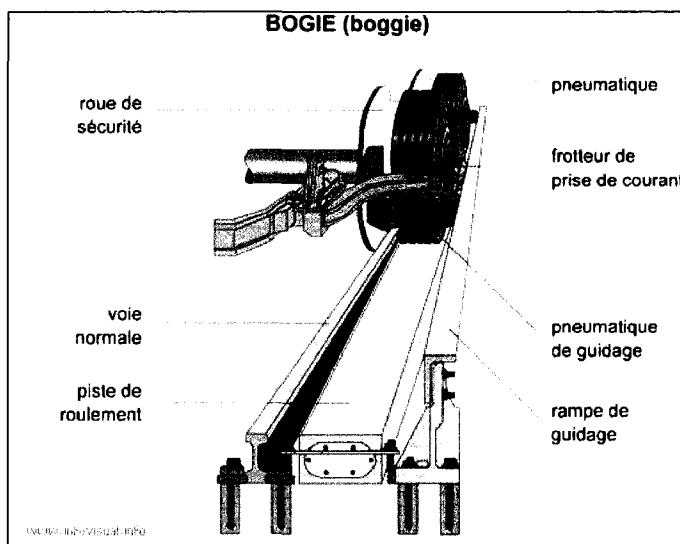


Figure 2-5 : Dessin explicatif de la bande de roulement et du bogie.

Source: Site web Visual dictionary. <http://www.infovisual.info/>

Pour le métro de Montréal, c'est depuis 1976, à l'exception de la « ligne 4 – jaune », que la vitesse de déplacement des voitures est commandée par des PA. Les consignes de vitesse sont directement interprétées par le système de contrôle de vitesse à l'intérieur des trains.

Les trains du métro circulent sur des voies profilées en cuvette permettant l'économie d'énergie en exploitant l'énergie cinétique développée par le train. Parce que les trains ont une grande masse, beaucoup d'énergie est nécessaire pour briser l'inertie du train à l'arrêt et à l'accélération. Afin d'aider les moteurs électriques dans cette tâche, le profil en cuvette des tunnels donne aux trains une poussée lors du démarrage et les ralentit

lors des arrêts. La figure 2-6 présente le profil en cuvette par la coupe du tunnel entre deux stations, à remarquer que les dénivélos atteignent jusqu'à 6,5%.

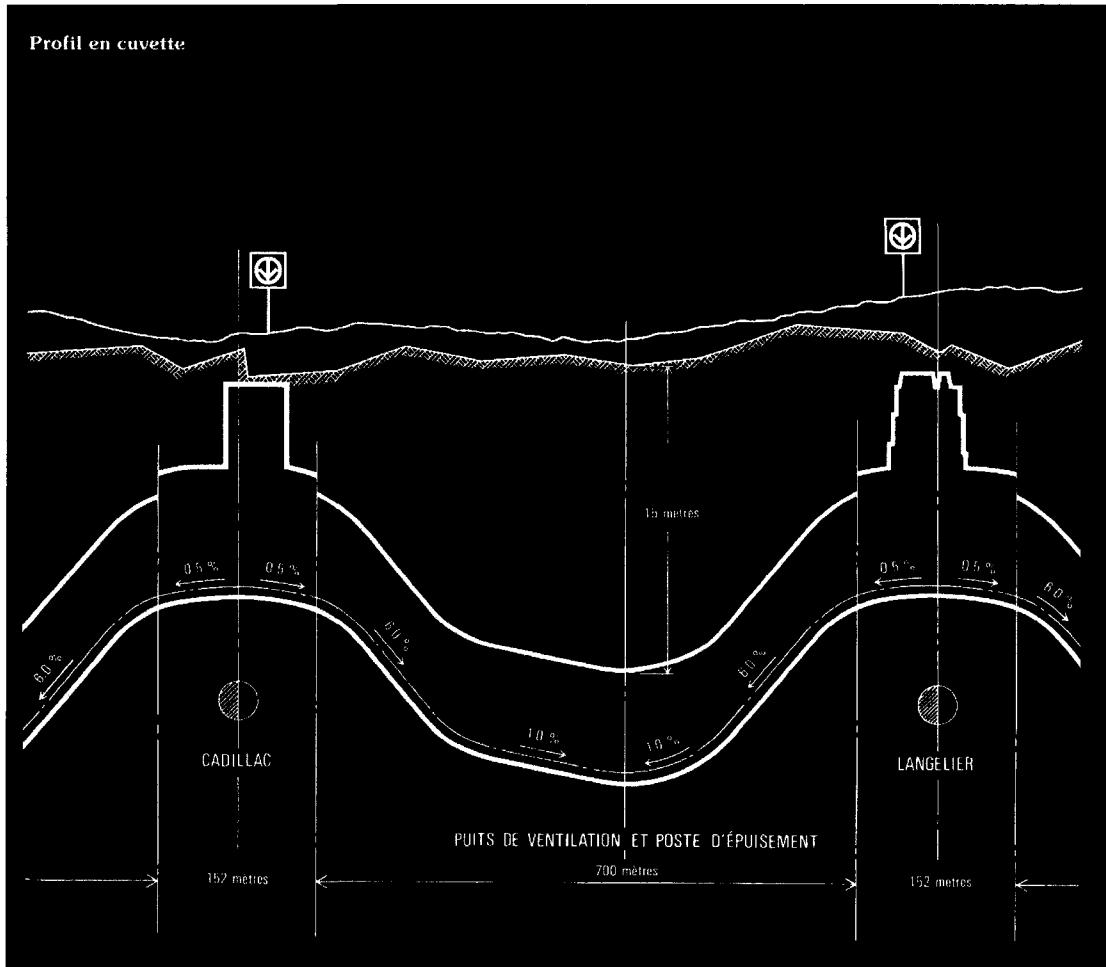


Figure 2-6 : Coupe du tunnel montrant le profil en cuvette.
Source : (Communauté urbaine de Montréal *et al.*, 1983)

Comme mentionné au chapitre précédent, ce sont les pilotes automatiques qui donnent aux trains leurs consignes de vitesse. Ces consignes sont transmises par induction électrique par le biais des circuits de voie [CDV] et des rails métalliques. La division de chacun des cantons se fait donc au travers des rails métalliques par l'application de joints isolants dans ceux-ci. La signalisation et l'espacement des cantons sont en fonction du tracé et du profil du tunnel afin de maintenir un intervalle minimum théorique de 90 secondes (Allaire *et al.*, 1994). Huit consignes de vitesse différentes

peuvent être transmises aux trains (0, 16, 24, 24S, 32, 40, 56, 72 km/h). Les consignes de 16 km/h et de 24S sont seulement transmises lors des manœuvres en garage et en terminus (Communauté urbaine de Montréal *et al.*, 1983). La figure 2-7 permet de visualiser la séparation des cantons par les joints isolants dans les rails métalliques et d'apercevoir les CDV, qui fournissent les consignes de vitesse.

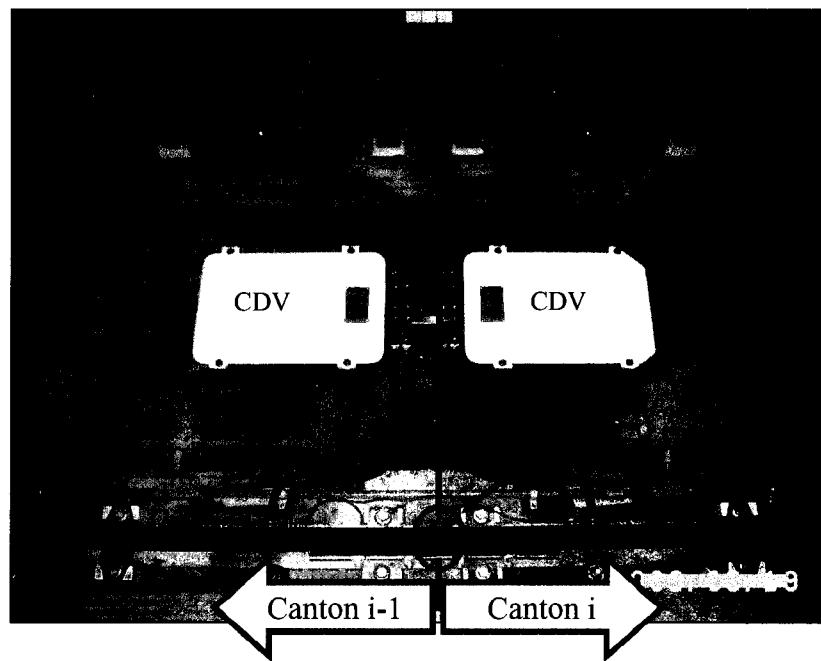


Figure 2-7 : Circuit de voie et joints isolants dans le métro de Montréal.

Puis, la prochaine figure (figure 2-8) démontre les consignes de vitesse permises de chacun des cantons selon la position des trains.

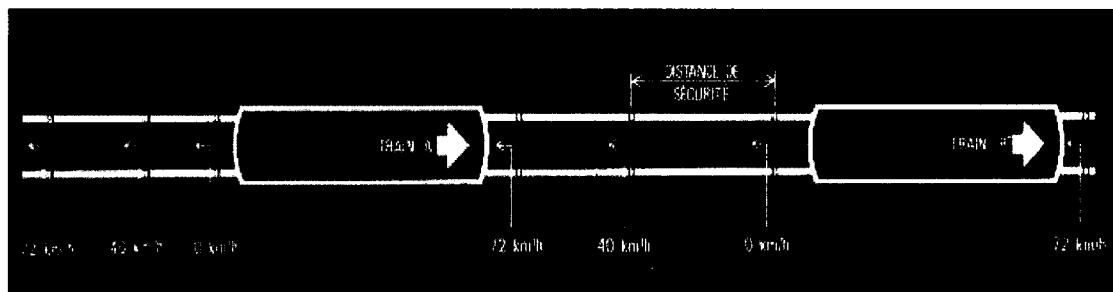


Figure 2-8 : Consignes de vitesse des cantons selon la position des trains.

Source : (Communauté urbaine de Montréal *et al.*, 1983)

2.1.2. Les statistiques d'exploitation du métro de Montréal

Cette partie fait l'analyse des chiffres de l'exploitation du métro de Montréal afin de situer l'utilisation qui en est faite et de cerner le profil de ses usagers.

Le métro assure en moyenne 700 000 déplacements journaliers en semaine dont une grande proportion s'effectue en périodes de pointe. Selon le profil de clientèle du métro, 61 % de la clientèle totale, majoritairement des individus de 25 à 64 ans, utilise ce moyen de transport en périodes de pointe. Durant ces mêmes heures, les déplacements se font principalement pour des motifs de travail et d'études alors qu'en périodes hors-pointe, ce sont plutôt des motifs de magasinage et loisirs qui prédominent. Ces données proviennent de l'enquête origine-destination de 1998 telle que présentée par l'AMT (2003) qui tire leur référence d'un tableau synthèse de la STM (2002a).

La présentation du tableau 2-2, tiré de l'AMT (2003) et cité de la STM (2001) permet de réaliser l'importance d'utilisation des stations les plus achalandées de l'année.

Tableau 2-2 : Les cinq stations les plus achalandées en 2001 (Usagers par année).

Stations	Achalandage annuel
Berri-UQAM :	10 887 250
McGill :	10 874 264
Henri-Bourassa :	8 172 803
Longueuil :	7 027 422
Guy-Concordia :	6 920 298

De plus, deux millions de personnes ont utilisé le métro le 11 septembre 1984 pour voir le pape au parc Jarry. Le métro a offert, en 2001, un total de 58 millions de km-voitures de service. La figure 2-9 illustre l'évolution de l'offre de service du métro de 1996 à 2002. Il est possible de constater l'augmentation de l'achalandage sans pour autant y voir la même progression dans l'offre de service.

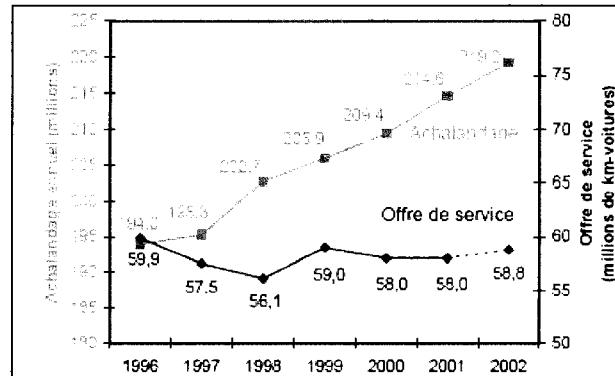


Figure 2-9 : Évolution de l'achalandage et de l'offre de service du métro de Montréal
Source : (AMT, 2003), tiré de (STM, 2002a)

Le tableau subséquent (tableau 2-3), tiré de la STM (2002b) est particulièrement intéressant puisqu'il contient plusieurs données opérationnelles qui pourront être comparées aux expérimentations faites à l'intérieur de ce mémoire.

Tableau 2-3 : Tableau comparatif des lignes sur les différentes statistiques opérationnelles de la STM pour l'année 2002.

Ligne 1 - verte	Ligne 2 - orange		Ligne 5 - bleue	Réseau
Longueur totale en exploitation				
22,1 km	24,8 km		9,7 km	60,85
Nombre de stations				
27	28		12	65
Nombre de stations de correspondance				
2	4		2	4
Distance moyenne entre les stations				
850 m	919 m		882 m	922 m
Durée moyenne du trajet				
38 min	40 min		15 min	NA
Vitesse commerciale aux heures de pointe				
34 km/h	36 km/h		37 km/h	NA
Intervalle minimal				
2 min 50 s	2 min 50 s		3 min 45 s	NA
Nombre de trains en service aux heures de pointe				
28	28		11	71
Nombre de voitures en service aux heures de pointe				
252	252		66	606
Achalandage en 2001 (millions d'entrées)				
98,1	89,1		19,1	214,6
Kilomètres-voitures parcourus en 2001 (millions)				
24,0	26,6		4,0	58,0

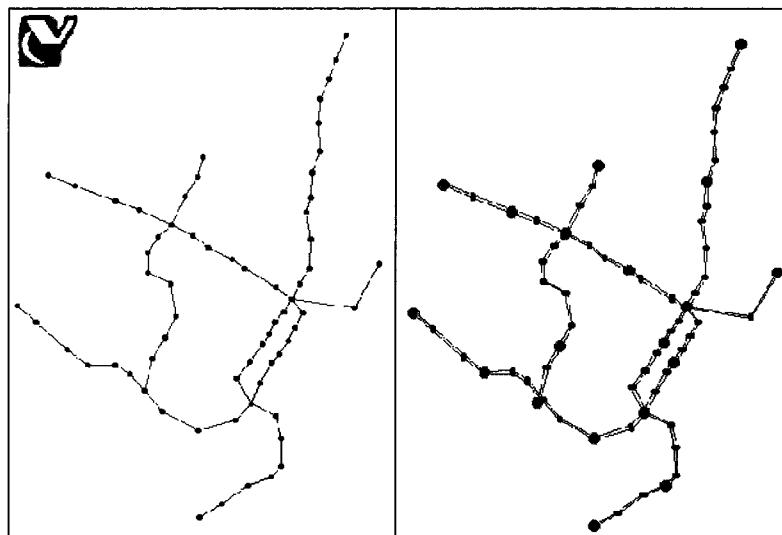
Aussi, la superficie du métro, à vol d'oiseau, est de 1200 m² par station. Ce qui lui confère une superficie totale de 78 000 m². Comparativement, la superficie du territoire du centre-ville de Montréal est de 3,67 km² (Tremblay et al., 2001).

2.2. Représentation spatialisée des éléments du réseau

Comme mentionné au chapitre précédent, la représentation spatialisée permet d'offrir une visualisation rapide et claire d'une grande quantité d'information. Dans ce but, et afin de présenter les résultats des expérimentations de cette recherche, le métro de Montréal a été modélisé par nœuds aux arrêts, c'est-à-dire aux quais. Ainsi, cette section présente en détail un outil de représentation géographique qui a permis de réaliser cette représentation spatiale.

Le logiciel Viper de la compagnie Citilabs (<http://www.citilabs.com/viper/>) est un éditeur de réseau qui permet de faire de la représentation urbaine grâce à un système d'information géographique. Bien que ce logiciel soit principalement utilisé dans le but de créer une visualisation de réseaux de voirie, il peut très bien s'appliquer dans des cas de transport en commun. Ce logiciel possède une interface graphique comprenant six couches d'informations permettant de construire et de modifier des réseaux de voirie. De plus, il possède un système d'information géographique, un éditeur de matrice et de base de données, un éditeur de script de langage de programmation TP+ et un calculateur de chemin le plus court. La puissance de ce logiciel réside, en partie, dans sa fonctionnalité d'accepter les scripts qui permettent de faire la lecture de base de données de façon tout à fait automatisée. La première étape dans la modélisation du réseau du métro de Montréal à l'aide du logiciel Viper est la création d'une base de données contenant toutes les coordonnées de chacun des nœuds (quais) et de tous les liens possibles entre ceux-ci. En plus de ces champs clefs, de l'information alphanumérique peut être ajoutée pour chacun d'entre eux, mais plus important encore,

des champs numériques de coûts, comme les temps de parcours sur chacun des liens, peuvent être ajoutés. Ceci permet, par exemple, des calculs de chemins les plus courts. L'ajout de nœuds centroïdes possédant des liens de coûts nuls vers les autres nœuds permet de modéliser adéquatement l'entrée et la sortie des usagers sur le réseau. Puisque, normalement, les usagers peuvent sortir à toutes les stations du métro, un centroïde doit exister pour chacune d'elles. Cependant, comme la version de Viper utilisée dans ce projet limite le nombre de centroïdes à 25, ceux-ci furent établis aux stations stratégiques, c'est-à-dire, aux stations dont une étude de déplacement est envisageable. Dans ce projet, un centroïde a été assigné aux stations de correspondances, les terminus et les stations milieux de tronçons. Les illustrations de la figure 2-10 présentent le métro de Montréal codifié par nœuds et par arrêts.



**Figure 2-10 : Représentation spatialisée du métro de Montréal par nœuds et par arrêts.
Produit avec l'aide du logiciel Viper de CitiLabs.**

Maintenant que les informations sur les nœuds et les liens du métro sont établies, celles-ci peuvent être réutilisées par différents logiciels, dont les SIG, dans le but d'obtenir une visualisation optimale selon les indicateurs de performance désirés.

2.3. Description des données

Le système de pilote automatique [PA] présent dans le métro de Montréal agit en tant que système de localisation de véhicule automatique [AVL] et renseigne le centre de contrôle sur les occupations des cantons sur tout le réseau. Ainsi, chaque fois qu'un événement se produit, un signal est envoyé au centre de contrôle afin d'afficher la position des véhicules sur le tableau optique. De plus, elles sont saisies pour l'archivage. Il existe deux événements détectés par les PA :

- L'entrée d'un train dans un canton ;
- La sortie d'un train d'un canton.

La position d'un train sur sa voie est donc connue. Cependant, sa position exacte sur ce canton ne l'est pas, le train est quelque part à l'intérieur du canton. Les données transmises au centre de contrôle pour chacun de ces événements sont le nom du canton affecté par un changement (activation ou désactivation), l'heure de cet événement et le type de changement. Il est donc possible de connaître, avec une précision à la seconde, le temps d'occupation de chacun des cantons du réseau du métro de Montréal.

Les données originales font état de relevés sur 878 cantons sur lesquels au moins un événement a eu lieu. Ceci représente, pour une seule journée durant l'heure de pointe du matin, 40 528 événements (pour une durée de deux heures, soit entre 7 h 30 et 9 h 30). Le tableau 2-4 décrit le contenu de chacun des champs de la base de données originale. La base de donnée fournie est présentée sous forme de textes composés de colonnes représentant chacune les trois champs informationnels.

Tableau 2-4 : BDD originale

Chrono			
ID	Exemple 1	Exemple 2	Description
Heure	07:30:06	09:12:18	Heure de l'événement sur le canton
CDV	181A	N73	Nom du CDV (associé à un canton)
Occ	1	0	Type d'événement (1:activ., 0:désact.)

2.4. Prétraitement des données

La première étape à réaliser dans le traitement des données est le classement de celles-ci par ligne pour, par la suite, réussir à les classer par voies, puis par ordre successif selon la direction. Le champ clef de ces données est le nom du CDV puisque celui-ci est unique pour chacun des cantons, ce qui n'est pas le cas des champs « Heure » ou « Occ ». Alors, à partir de ce champ, une distinction des particularités uniques doit être effectuée. En effet, certains noms débutent avec une lettre, tandis que d'autres n'en ont pas, certains sont composés de trois caractères, alors que d'autres en possèdent quatre et, finalement, quelques-uns se terminent par une lettre. Afin de placer en ordre toutes ces données et de s'assurer de leur validité, une technique de visualisation des cantons a été utilisée. La visualisation permet de suivre chronologiquement l'activation et la désactivation des cantons, donc le tracé des trains. Ce genre de technique permet de s'assurer de la continuité physique et chronologique des cantons. L'image suivante (figure 2-11) présente un exemple de visualisation dynamique des événements sur les cantons par la coloration lorsque ceux-ci s'activent.

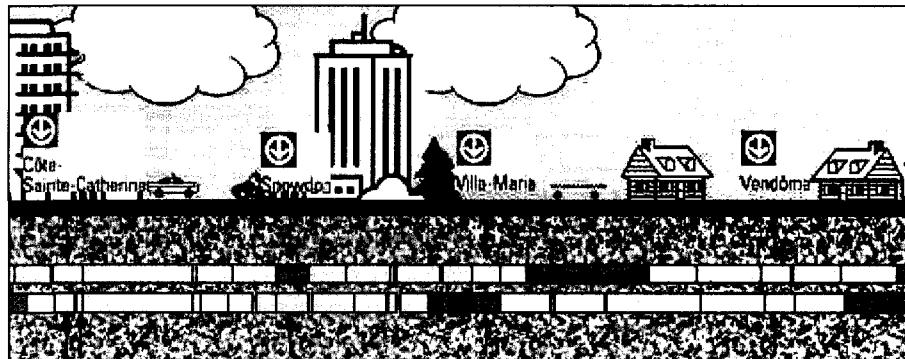


Figure 2-11 : Exemple de visualisation des événements chronologiques des cantons
Visualisation dynamique créée à partir de Visual Basic et Microsoft Excel 2003

Sachant que le métro de Montréal est composé de quatre lignes et qu'une seule, la ligne 4, ne possède pas de pilote automatique, il donc nécessaire de séparer les données en six, soit en trois lignes possédant chacune deux directions. Une analyse détaillée des données permet de les classer selon une certaine logique. La parité dans la dénomination des cantons reflète la direction de la voie. Les préfixes lettrés désignent

les sections de lignes auxquelles ces cantons se rattachent. Donc le préfixe « E » désignent les lignes 1 et 5 du côté Est de la rue Berri sous laquelle les stations Jean-Talon et Berri-UQÀM sont placées et le suffixe « W » est pour les parties de ligne à l'Ouest de la rue Berri. Les préfixes « N » et « S » sont utilisés pour segmenter la ligne 2, ici encore, la rue Berri et la station Berri-UQÀM départagent la partie Nord de la partie Sud. Puisque les préfixes des lignes 1 et 5 sont les mêmes, la différenciation de ces deux lignes réside dans le nombre de caractères que contient le nom. En effet, les noms des cantons de la ligne 1 contiennent quatre caractères et ceux de la ligne 5 en contiennent trois. La figure 2-12 présente les préfixes et les directions, selon la parité, des noms de cantons. Les noms des cantons se suivent en ordre croissant à partir de ces stations de démarcation entre les préfixes utilisés.

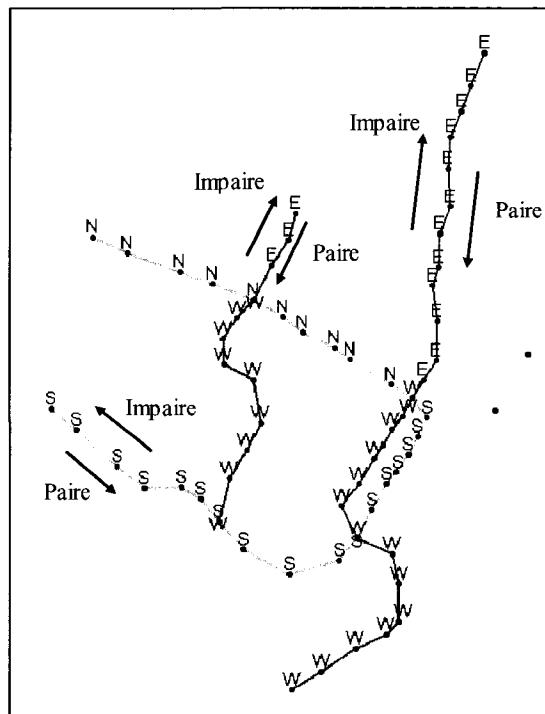
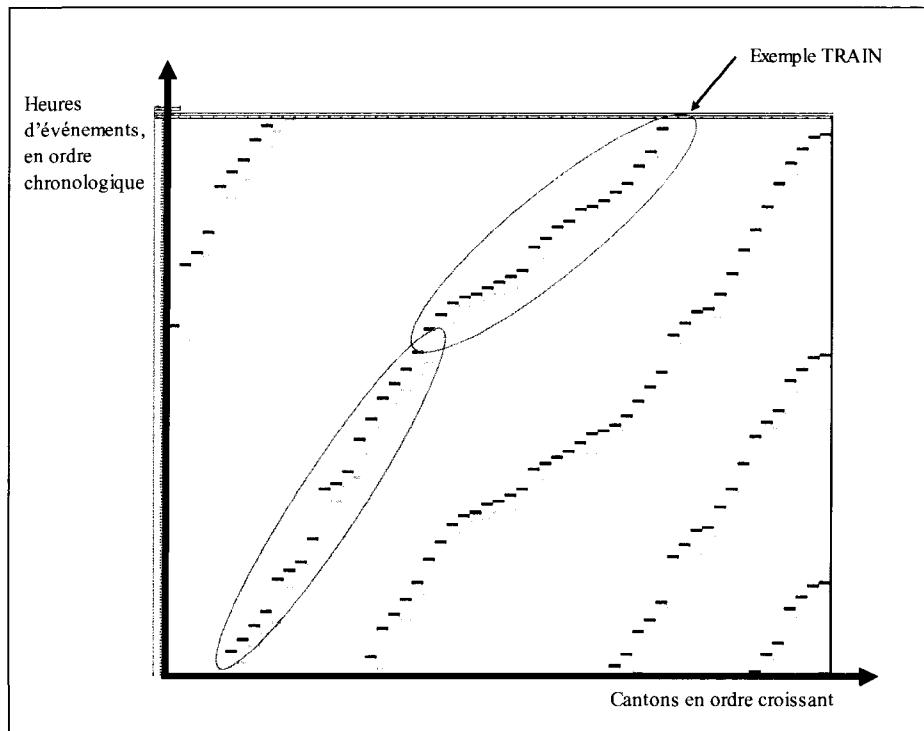


Figure 2-12 : Représentation des suffices des cantons et parité des noms selon le tronçon de lignes et la direction de la voie du métro de Montréal.
Représentation créée à l'aide du logiciel DIVA-GIS

Maintenant que chacune des lignes est identifiée, il convient de repérer et de désagréger les trains ; chaque événement sur un canton est l'annonce du passage d'un nouveau train. Afin de bien suivre le passage de chacun des trains sur le réseau, une aide

visuelle est utilisée. L'utilisation de tableau croisé dynamique est tout indiquée pour permettre ce genre de visualisation : un exemple des résultats obtenus est présenté à la figure 2-13. Chacun des carreaux de couleur foncée représente l'activation d'un canton (donc l'arrivée d'un train dans celui-ci, état 1) et ceux de couleur pâle représentent les désactivations (état 0). Une fois les évènements placés en ordre chronologique des évènements et en ordre physique des cantons, les trains peuvent être regroupés rapidement, à l'aide d'un simple coup d'œil.

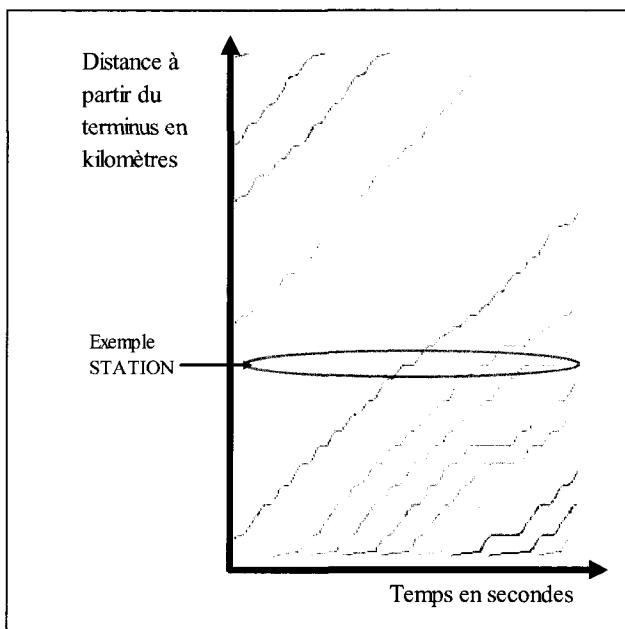


**Figure 2-13 : Diagramme espace-temps selon les évènements sur les cantons.
Exemple de la ligne 5, direction Snowdon. Diagramme conçu à l'aide d'un tableau croisé dynamique dans le logiciel Microsoft Excel 2003.**

Afin de s'assurer de la validité d'un train, il suffit de vérifier le parcours de celui-ci. En effet, l'enregistrement d'une heure d'activation sur un canton s'effectue toujours avant l'enregistrement de l'heure de désactivation du canton qui précède.

Suite à la classification de chacune des directions, des lignes et des trains, l'identification des cantons associés aux stations peut s'effectuer. Pour ce faire, un diagramme espace-temps est construit sur les évènements d'activation et de

désactivation des cantons, selon chacun des trains identifiés. Dans ce cas-ci, les évènements d'activation sont placés à l'entrée du canton, tandis que les évènements de désactivation sont situés 152,4 mètres après l'entrée du canton (la longueur d'un train). Ce diagramme (présenté à la figure 2-14) permet de situer les temps d'occupation les plus longs qui peuvent par la suite être associés aux stations. En effet, lorsque tous les trains ont approximativement le même temps d'occupation de canton, à la même distance kilométrique à partir du terminus, il est possible de poser l'hypothèse que ce palier correspond à une station.



**Figure 2-14 : Diagramme espace-temps selon les évènements sur les cantons par chacun des trains.
Exemple de la ligne 2, direction Côte-Vertu. Diagramme conçu à l'aide de Diva-GIS.**

L'analyse de ce diagramme permet de constater que la plupart des stations sont constituées de leur propre canton (voir annexe B). Cependant, certaines stations possèdent plus d'un canton. En effet, toutes les stations terminus sont composées de deux ou trois cantons, ce qui peut être attendu puisque les manœuvres de retournement y sont effectuées. Chacun des cantons composant une station possède une longueur supérieure à la longueur totale d'un train de trois éléments (neuf voitures) de 152,4 mètres. La seule exception est la station Berri, sur la ligne 1, direction Angrignon. La moyenne totale des longueurs des cantons en stations est de 160 mètres, soit six mètres

de plus que la longueur totale d'un train. Le nombre de cantons et la longueur détaillée de chacune des stations sont disponibles à l'annexe B. La connaissance de l'ordre des cantons et de ceux qui sont en stations permet d'agrémenter la base de données de ces nouvelles informations en y ajoutant ces nouveaux champs, tel que présenté dans le tableau 2-5.

Tableau 2-5 :BDD originale agrémentée des champs d'identifications complémentaires.

Classement Trains		
ID	Exemple	Description
SEQ	22103	Séquentielle des cantons
LIGNE	2	Numéro de la ligne du canton
CDV	S71	Code du CDV relatif au canton
DIR	C-V	Direction de la voie du canton
TYPECV	St-Henri	Nom de la station, du canton en station
PK_canton_km	42.350	Chaque position du début du canton
L_cantons	0.160	Longueur du canton
, tat	1	tat du premier événement
1	07:31:45	Heure d'activation du canton
0	07:32:36	Heure de désactivation du canton

De plus, ce prétraitement permet d'éliminer toutes les données de cantons qui se situent à l'extérieur de la voie normale de circulation, c'est-à-dire tous les cantons situés plus loin que les terminus utilisés pour les retournements et les cantons placés en garage. Dans le fichier de données original, 184 cantons sont placés de l'autre côté des terminus et dans les garages, ce qui permet de retirer 3178 données qui ne touchent pas les voies de circulation effective.

Un ensemble de fichiers Excel, unique pour chacune des lignes et des directions, a été créé. Les noms de ces nouveaux fichiers sont présentés dans le tableau 2-6 suivant. L'avantage de segmenter les données en différents fichiers réside dans la réduction du nombre de données par fichier et la facilité de créer des routines de programmation automatisée permettant leur manipulation.

Tableau 2-6 :Nom des fichiers Excel de données originales reclassées par direction.

Nom des fichiers de données Excel
Ligne1_Ang.xls
Ligne1_H-Beau.xls
Ligne2_CV.xls
Ligne2_HB.xls
Ligne5_Snow.xls
Ligne5_St-M.xls

2.5. Traitement des anomalies

Malgré toutes ces règles de nomenclature permettant d'établir l'ordre physique des cantons, certaines exceptions persistent. En effet, quelques cantons sont divisés en plusieurs parties, dans ces cas, un suffixe alphanumérique est ajouté au nom. Ainsi, l'ordre successif des cantons est inversé, c'est-à-dire que l'ordre des suffixes alphanumériques est établi dans l'ordre décroissant.

Aussi, dans le classement des heures de passage de chacun des trains, certains phénomènes sont perceptibles. Effectivement, sur certains cantons, des temps d'occupation de seulement une seconde sont observés. Bien que ces cantons fassent la lecture normale des trains lorsque ceux-ci les occupent, il semble que le système de localisation de véhicule automatique perçoive une certaine impulsion d'une seconde de façon intermittente une fois que le train soit passé. Puisque ce phénomène semble se répéter toujours sur le même canton, il est possible de poser l'hypothèse qu'il existe une certaine défectuosité sur l'installation même du canton. En effet, si la défectuosité était sur le train, cette anomalie suivrait celui-ci et serait présente sur l'ensemble des cantons sur lesquels le train circule. Le tableau 2-7 présente un exemple de la ligne 2 en direction de Côte-Vertu où cette anomalie est observée au canton S173.

Tableau 2-7 : Aperçu du fichier Ligne2_CV.xls.

Trains Cantons\ tat	Train 1		Train 2		Train 3	
	1	0	1	0	1	0
S171	09:13:11	09:13:27	09:16:18	09:16:35	09:19:01	09:19:16
S173	09:13:16	09:13:28			09:16:24	09:16:36
S175	09:13:19	09:13:37	09:16:27	09:16:46	09:19:09	09:19:26
S177	09:13:29	09:14:02	09:16:38	09:17:14	09:19:19	09:19:44
181A	09:13:44	09:14:28	09:16:55	09:17:38	09:19:34	09:20:10
181B	09:14:07	09:14:34	09:17:18	09:17:44	09:19:48	09:20:17
S181C	09:14:12	09:14:42	09:17:22	09:17:52	09:19:53	09:20:24

À d'autres endroits, dans la base de données, l'entrée d'un nouveau train sur un canton situé en milieu de voie peut être observée. Lorsque ces trains font leur apparition en milieu de voie, ils ne le font qu'à partir d'une heure tardive, il n'est donc pas possible de visualiser leur parcours complet et de connaître leur utilisation. Cependant, ces événements donnent un indice sur la configuration des voies et permettent de découvrir les aiguilles où des trains peuvent être injectés en milieu de voie. Il est donc logique de penser que la voie, au canton S06A, possède une aiguille qui permet d'y injecter des trains, tel que démontré à l'intérieur du tableau 2-8 qui présente l'exemple de la ligne 2 en direction d'Henri-Bourassa.

Tableau 2-8 : Aperçu du fichier Ligne2_HB.xls.

Trains Cantons\ tat	Train 1		Train 2		Train 3		Train 4	
	1	0	1	0	1	0	1	0
S06B	09:16:12	09:16:36	09:20:16	09:20:39	09:26:26	09:26:49	09:29:50	
S06A	09:16:26	09:16:51	09:20:29	09:20:54			09:26:38	09:27:03
S04	09:16:41	09:17:08	09:20:43	09:21:12			09:26:53	09:27:21
S02	09:16:52	09:17:44	09:20:55	09:21:53			09:27:04	09:28:10
N02	09:17:29	09:17:48	09:21:37	09:21:57			09:27:55	09:28:14
N04	09:17:38	09:17:54	09:21:46	09:22:03			09:28:04	09:28:20
N06	09:17:45	09:18:08	09:21:54	09:22:18			09:28:11	09:28:35
N08	09:18:00	09:18:23	09:22:09	09:22:34			09:28:26	09:28:51
N10	09:18:08	09:19:01	09:22:18	09:23:20			09:28:34	09:29:33
N12	09:18:48	09:19:14	09:23:06	09:23:33			09:29:20	09:29:47
N14A	09:19:07	09:19:32	09:23:25	09:23:51			09:29:39	
N14B	09:19:24	09:19:43	09:23:43	09:24:04			09:29:56	
N16	09:19:35	09:19:58	09:23:54	09:24:22				
N18	09:19:44	09:20:29	09:24:04	09:25:52				
N20	09:20:15	09:20:38	09:25:38	09:26:01				
N22	09:20:30	09:20:48	09:25:53	09:26:11				
N24	09:20:39	09:21:03	09:26:03	09:26:27				
N26	09:20:48	09:21:36	09:26:12	09:27:39				
N28	09:21:23	09:21:45	09:27:26	09:27:48				

Maintenant que les données d'occupation de voie du métro de Montréal sont épurées de leurs erreurs de capture, il est possible de passer à la détermination des indicateurs de performance pouvant en être extraits.

CHAPITRE 3 - DÉTERMINATION DES INDICATEURS DE PERFORMANCE

Ce chapitre complète les définitions des différents indicateurs de performance utilisés dans cette recherche en les expliquant mathématiquement et en les appliquant aux données du métro de Montréal. Dans ce chapitre, l'étude de ces données est détaillée grâce à l'explication méthodologique des formules afin de les manipuler et d'en faire ressortir les caractéristiques types. Aussi, des techniques de représentation spatiale sont utilisées dans le but de permettre une meilleure compréhension des phénomènes à l'étude.

La mesure de performance d'un réseau de transport se calcule à partir des variables de mouvement des objets u , dans un temps t et une distance s (Vuchic, 2005). Les différents éléments de mesure de performance de base d'un système de transport sont résumés dans la figure 3-1.

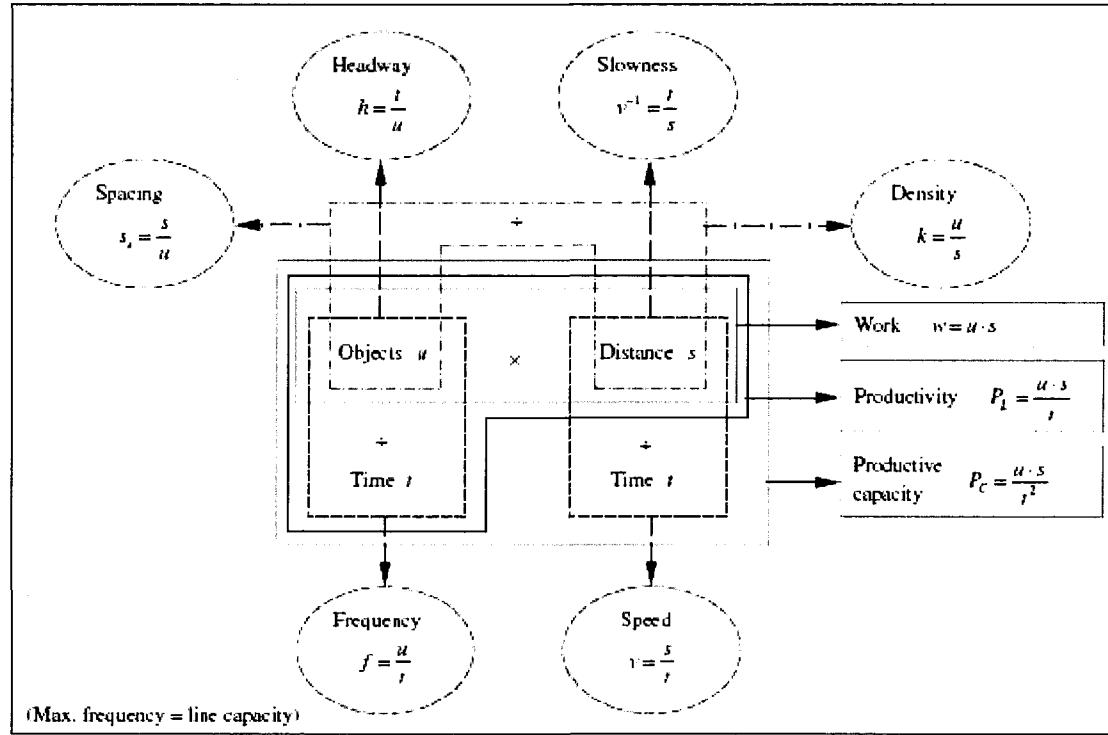


Figure 3-1 : Mesures de performance et éléments d'opération de base d'un système de transport.
Source : (Vuchic, 2005)

Les indices de performance détaillés mathématiquement dans ce chapitre sont : l'accessibilité au réseau, l'intervalle, la fréquence, la capacité, le travail (« work »), la productivité, le temps de parcours et la vitesse.

3.1. L'accessibilité au réseau

La caractérisation des lignes se fait au travers des valeurs quantifiables, dont la longueur, habituellement exprimée en kilomètres. Trois types d'éléments permettent de caractériser les lignes de transport. Tout d'abord, la longueur de la ligne, qui représente la distance entre deux terminus le long d'une ligne, dans une seule direction. Puis, la longueur du réseau de transport représente l'étendue totale desservie par toutes les lignes du réseau, qui diffère de la troisième caractéristique, qui est la longueur totale des lignes. Celle-ci représente la somme de la longueur de toutes les lignes, sans tenir compte du fait que certaines lignes utilisent le même tronçon de route. Dans le cas du

métro de Montréal, la somme de la longueur des lignes est équivalente à l'étendue totale du réseau puisqu'aucune ligne ne se chevauche.

3.2. L'intervalle et la fréquence

Le temps d'intervalle minimum est rencontré à la station qui possède le plus grand achalandage, c'est à partir de cette station que la ligne est entièrement caractérisée. L'intervalle se calcule facilement par le temps séparant le passage de deux véhicules successifs. Du point de vue de l'usager, ce calcul s'effectue aux arrêts puisque c'est à ces endroits que l'influence de l'intervalle se fait sentir. L'évaluation de l'intervalle permet de retrouver la fréquence qui représente le nombre de véhicules qui passent à un point fixe en une période de temps donnée. En effet, la fréquence est l'inverse de l'intervalle. La fréquence, exprimée en véhicules par période de temps, est un indicateur de performance plus significatif du point de vue de l'exploitant, tandis que l'intervalle, révélé en temps séparant deux trains, renseigne mieux l'usager.

3.3. Capacité réalisable

La capacité du train q est proportionnelle à la fréquence de service f , le nombre de véhicules n rattachés au train et le nombre théorique maximal de passagers p qui peuvent être placés dans les véhicules. Alors,

$$q = fnp \text{ passagers par heure ;} \quad 3-1$$

Où : $f = 3600 / h.$ 3-2

La variable h est le temps, en seconde, qui sépare deux véhicules suivant la même direction (intervalle). Généralement, l'intervalle se mesure en minute, dans ce cas,

$$f = 60 / h. \quad 3-3$$

(Meyer *et al.*, 1984)

La figure 3-2 illustre l'équation mathématique qui doit être utilisée dans le calcul de la capacité réalisable.

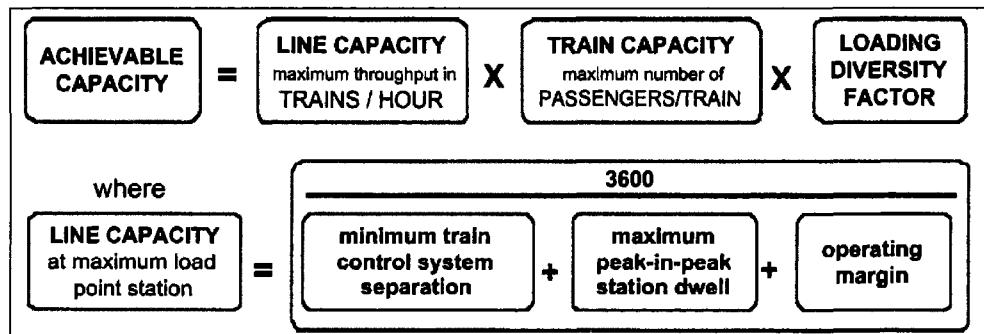


Figure 3-2 : Équation de la capacité réalisable.
Source : Rapport 13 du TCRP (Parkinson *et al.*, 1996)

La capacité réalisable d'une ligne est toujours calculée à partir de la station d'embarquement maximum lors de l'heure de pointe. Très souvent, cette station se retrouve au centre-ville. Souvent aussi, cette station est une correspondance avec d'autres lignes. Tout comme le calcul de la fréquence ou de l'intervalle, cette station est utilisée dans le calcul de la capacité réalisable puisqu'elle agit comme goulot d'étranglement à cause de son achalandage élevé. Afin de calculer la capacité réalisable, il est nécessaire de définir les variables qui en font partie.

Capacité du train (« Train capacity »)

Puisque la capacité du train est caractérisée par sa conception, cette valeur n'est pas influencée par des facteurs externes incertains, ce qui lui permet d'être très juste. En effet afin de l'obtenir, il suffit de multiplier le nombre de véhicules qui composent le train (n) au nombre de passagers que peut contenir chaque véhicule (p).

Temps de séparation sécuritaire minimale de contrôle train (« Minimum train control system separation »)

Le temps que prend un train pour en remplacer un autre à la station d'embarquement maximum est le temps qui limite le plus la capacité d'une ligne. Le temps de séparation sécuritaire minimale est un temps accordé, en seconde, par le système afin d'éviter une collision ou un arrêt en tunnel. Il s'agit du temps que prévoit le pilote automatique pour séparer deux trains. Plus tôt, lors de la discussion sur les cantons, il a été question de sécurité ferroviaire, le principe étant de toujours espacer deux trains par

au moins un canton. Cependant, les contrôleurs peuvent, lorsqu'ils le jugent nécessaire, ajuster cette distance en augmentant le temps de séparation sécuritaire minimal de contrôle des trains. Ce temps minimum est aussi influencé par le temps de retournement nécessaire aux véhicules en terminus. Pour le métro de Montréal, cet intervalle est théoriquement de 90 secondes (Communauté urbaine de Montréal *et al.*, 1983).

Temps maximal d'arrêt en station lors de la pointe de l'heure de pointe
(« Maximum peak-in-peak station dwell »)

Le temps d'arrêt peut être mesuré à partir du moment où le train s'immobilise en station jusqu'au moment où il reprend du mouvement. Entre ces deux actions, un flot d'usagers franchit les portes, plusieurs sortent du véhicule, tandis que d'autres y entrent. Enfin, le train reste immobile pendant un certain temps même après la fermeture des portes dans le but d'assurer la sécurité et le confort des usagers. À titre d'exemple, la figure 3-3 présente les différentes lectures des temps d'attente des trains du réseau de métro de Toronto à la station King, direction sud et expose les différentes étapes qui composent chacun des arrêts.

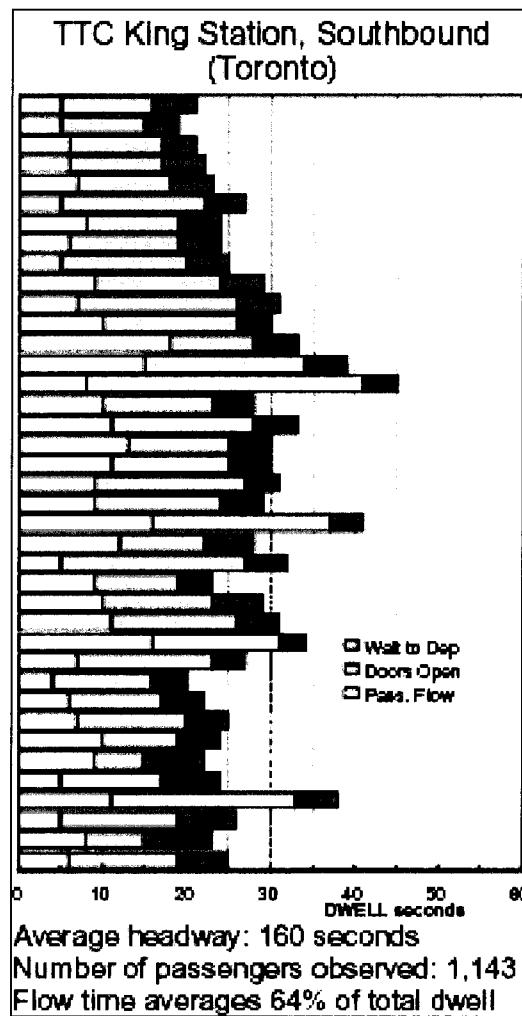


Figure 3-3 : Éléments qui composent le temps d'arrêt aux stations.
Source : (Kittelson and Associates, 1999)

Encore une fois, la station d'embarquement maximum doit être choisie afin d'effectuer les calculs du temps maximal d'arrêt en station, au moment d'achalandage le plus haut au cours de l'heure de pointe. Cependant, bien que pour les calculs de la capacité réalisable, les temps d'arrêt en station doivent être déterminés en période de pointe, l'étude de Wiggenraad (2001), pour des trains hollandais, précise que :

« There is no difference in alighting and boarding times per passenger in clusters between peak and off-peak hours. »

Ceci permettrait de calculer les temps d'arrêt en station, dans les cas où les données pour la plage de l'heure de pointe ne seraient pas disponibles.

La marge d'opération (« Operating margin »)

La marge d'opération correspond au temps entre le temps de passage de la queue du train de tête et le temps de la séparation sécuritaire. Le graphique de la figure 3-4 met en lumière les différentes variables de temps telles que la marge d'opération, le temps de séparation sécuritaire et le temps minimal d'intervalle afin de clarifier la compréhension de ces concepts.

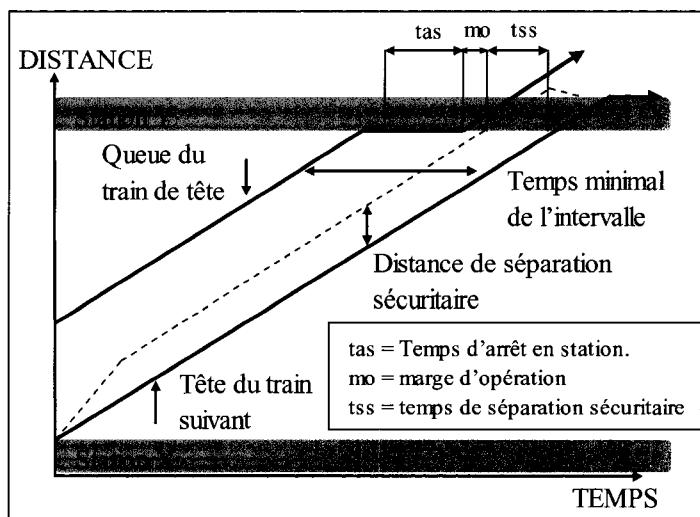


Figure 3-4 : Diagramme espace-temps de deux trains consécutifs décrivant les différentes variables incluses dans le calcul de la capacité.

Source : Inspiré de Parkinson *et al.* (1996).

Facteurs de diversités de chargement (« Loading diversity factor »)

Les irrégularités et les diversités de chargement d'une ligne de transport sont caractérisées par le facteur de diversité de chargement. Le facteur de diversité de chargement représente les inégalités d'embarquement des usagers à l'intérieur d'une voiture individuelle ou de l'ensemble des voitures du train. Aussi, le facteur de diversités tient compte des inégalités d'embarquement des passagers dans les trains à l'heure de pointe. Tous ces facteurs sont dépendants et influencés par la conception des voitures, des trains et des stations. De plus, la clarté des informations livrées aux usagers et la volonté de ceux-ci de s'entasser dans les trains influencent le facteur de diversité d'embarquement. Bien que les éléments d'influences soient connus, aucune norme n'existe pour caractériser officiellement le facteur de diversité de chargement.

C'est pourquoi une étude spécifique sur le chargement des voitures et les flots d'arrivée des usagers doit être faite pour chacun des systèmes de transport à l'étude. Cette étude a été réalisé par Parkinson *et al.* (1996) et le facteur de diversité obtenu pour le métro de Montréal est de 0,71.

3.4. Le travail et la productivité

La spécification de la capacité permet de déterminer le travail. L'indicateur du travail ne tient pas compte de la vitesse de déplacement des véhicules, ainsi donc, les véhicules qui effectuent le même travail peuvent posséder une productivité différente. La productivité s'exprime avec les mêmes termes que le travail, mais par rapport à l'heure, par exemple, en passager-km/h. Le travail effectué se désigne en terme de passager-km, il est le produit du volume moyen de passagers transportés par une longueur de section de voie. Alors que le travail offert peut être exprimé selon les termes de train-km, véhicule-km ou espace-km. Il s'agit donc de faire le calcul selon les plans de conception des véhicules et de déterminer le volume de passagers qui pourrait y être transporté, assis ou debout, et de le multiplier par la section de voie correspondante. Bien que le travail ne tienne pas compte de la variable de temps, il est calculé selon une certaine période, en fonction des variations de volume des passagers. En effet, le travail peut être calculé selon le volume moyen de passagers transportés sur une section de voie pendant une heure, une journée ou une année. Puis, le calcul du ratio du travail utilisé par rapport au travail offert permet de déterminer l'utilisation moyenne de la capacité offerte. L'indicateur du travail ne tient pas compte de la vitesse de déplacement des véhicules, ainsi, les véhicules qui effectuent le même travail peuvent posséder une productivité différente. La productivité s'exprime avec les mêmes termes que le travail, mais par rapport à l'heure, par exemple, en passager-km/h.

3.5. Temps de parcours

Le temps de parcours est défini comme étant le temps nécessaire pour traverser un itinéraire entre deux points d'intérêts. Le temps de parcours peut être directement déterminé en simulant l'itinéraire de parcours et en calculant le temps requis afin d'atteindre les différents points d'intérêts. Le temps de parcours est composé d'un temps actif et d'un temps de délai. Le temps actif est la période où le véhicule est en mouvement alors que le temps de délai est la période où le véhicule est à l'arrêt (FHWA, 1998). La figure 3-5 permet de situer les temps actifs (« *running time* ») et les temps de délai (« *stopped delay time* »).

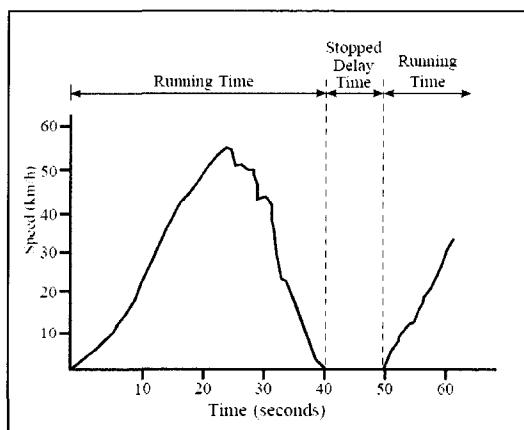


Figure 3-5 : Graphique de temps de parcours.

Source : Document sur l'acquisition de données de temps de parcours de la FHWA,
<http://www.fhwa.dot.gov/ohim/handbook/chap1.pdf>

Le temps d'opération ou de parcours est le temps que prend un véhicule pour se rendre à un terminus de fin de ligne à partir du terminus de départ. Le temps d'opération est donc la somme de tous les temps actifs et de délai de toutes les stations de la ligne.

$$\text{Temps d'opération ; } T_O = \sum_i T_{si} = \sum (t_{ri} + t_{si}) \quad 3-4$$

Où : t_{ri} = temps actif de l'interstation i

t_{si} = temps de délai de la station i

Le temps en terminus t_t est le temps que prend un véhicule pour se repositionner afin de revenir en sens inverse sur la ligne. Ce temps n'inclut pas le temps de délai à la

station terminus, mais seulement le temps où le véhicule n'est plus disponible pour l'embarquement des usagers.

Puis, vient le temps de cycle T , qui est le temps total d'une boucle complète d'une UT. C'est-à-dire que c'est le temps complet que prend un véhicule pour revenir au point de départ, dans la même direction. Ce temps est donc la somme de tous les autres temps.

La figure 3-6 permet de bien visualiser chacun des temps au travers un diagramme espace-temps d'une UT qui fait le trajet entre le terminus A et le terminus B, au travers duquel il existe plusieurs stations.

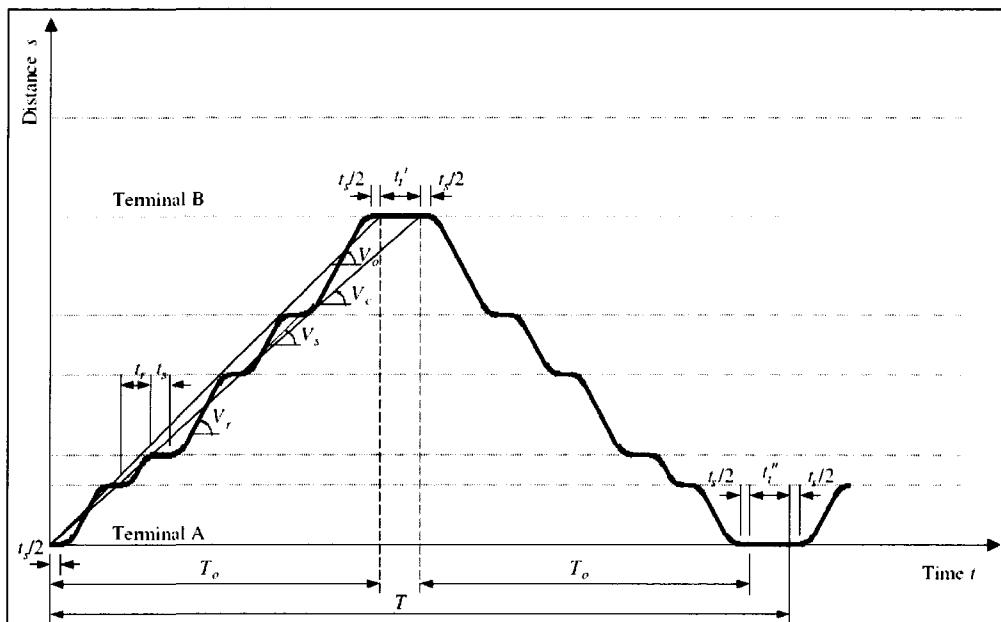


Figure 3-6 : Diagramme espace-temps représentant les composantes du temps de cycle.
Source : Vuchic (2005)

Les temps de parcours des différents trains entre chacune des stations peuvent être calculés par la connaissance de l'heure de l'activation du canton suivant une station jusqu'à la désactivation du canton précédent la station subséquente. La figure 3-7 permet de saisir le concept de calcul du temps de parcours.

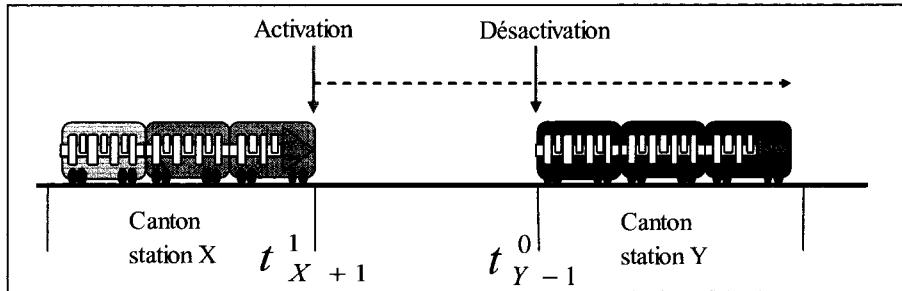


Figure 3-7 : Schéma représentant le calcul du temps de parcours.

$$\text{Temps parcours} = t_{Y-1}^0 - t_{X+1}^1 \quad 3-5$$

Où :

t^0 = temps de la désactivation

t^1 = temps de l'activation

t_i = temps de l'évènement sur le canton i

Le même procédé s'applique pour connaître le temps de parcours total en utilisant plutôt les deux stations terminus d'une ligne.

3.5.1. Temps en station

Sachant que le temps d'arrêt aux stations est un critère déterminant dans les performances d'un système de transport, il est donc primordial de déterminer une façon de calculer ce temps passé en station. Puisque la longueur du canton en station est plus grande que la longueur du train, le temps exact où le train est immobile ne peut être déterminé avec l'utilisation des données directement extraites du système de localisation des véhicules. En effet, le temps en station comporte aussi une période d'accélération et/ou de décélération. La figure 3-8 permet de visualiser le calcul du temps passé en station.

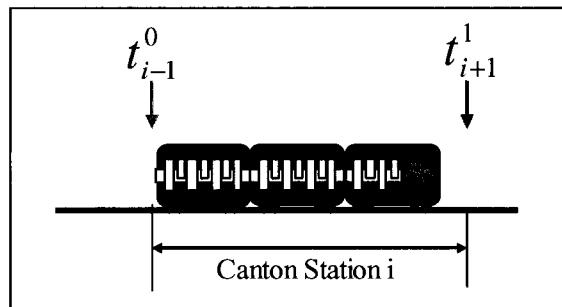


Figure 3-8 : Schéma représentant le temps en station.

$$\text{Temps en station} = t_{i+1}^1 - t_{i-1}^0 \quad 3-6$$

Comme mentionné plus haut, cette équation ne tient compte que du temps passé en station par le train et ne détermine pas le temps où le train est à l'arrêt. Pour ce faire, une hypothèse de départ doit être posée. Cette hypothèse présume que le train est complètement immobile lors de la désactivation du canton précédent la station. Ainsi, le temps en station n'inclut qu'une courte accélération. L'accélération moyenne (\bar{a}) est connue pour chacun des types de trains, soit $1,43 \text{ m/s}^2$ pour les MR-73 et $1,33 \text{ m/s}^2$ pour les MR-63. Afin de déterminer avec justesse le temps d'arrêt en station, il est nécessaire de discerner du temps en station la portion de temps qui est alloué à l'accélération du véhicule. L'équation suivante présente le résultat du temps d'arrêt en station.

$$\text{Temps arrêt en station} = \text{Temps en station} - \text{Temps d'accélération} \quad 3-7$$

Connaissant la longueur du train et celle du canton, sachant que la vitesse initiale du train avant son départ est nul, il est possible de déterminer le temps de l'accélération avec précision grâce à la formule de la distance à partir de l'accélération.

$$d = v_0 \Delta t + \frac{a \Delta t^2}{2} \quad 3-8$$

Puisque v_0 est nul, l'équation est simplifiée. Dans ce cas, l'isolation de la variable du temps de l'accélération transforme cette équation et permet de remplacer les termes de variables généraux dans les termes de temps et de distance utilisés dans cet article.

$$\text{Temps d'accélération} = \sqrt{\frac{2 * (D_i - l)}{\bar{a}}} \quad 3-9$$

Où D_i est la longueur du canton de la station i, en mètres ;

l est la longueur du train, en mètres, et

\bar{a} est la moyenne d'accélération du train, en mètres par seconde carrée.

3.5.2. Temps de retournement

Le temps de retournement des véhicules est considéré comme étant le temps nécessaire à un véhicule, en terminus, afin de reprendre le service en sens inverse. Le temps de retournement est un facteur limitant le planificateur du réseau dans son choix du temps de séparation sécuritaire et de l'intervalle minimal. Le temps de retournement est calculé, ici, à partir du moment où le train n'est plus disponible en station terminus, jusqu'au moment où il redevient accessible aux usagers sur le quai dans la direction inverse, tel que démontré à la figure 3-9.

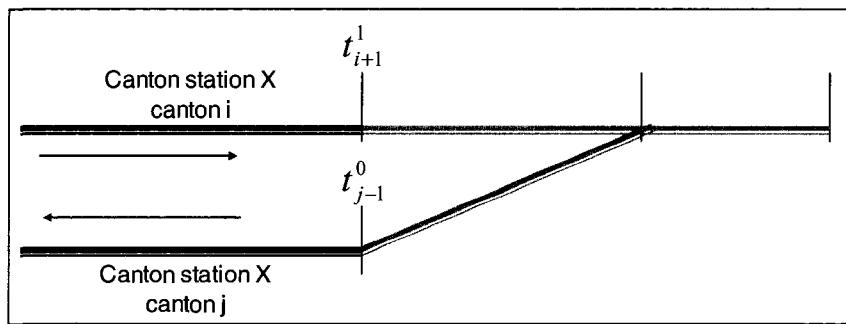


Figure 3-9 : Aiguille de retournement en terminus.

Ainsi, le calcul des temps de retournement s'effectue par l'utilisation des temps d'activation et de désactivation des cantons se situant au-delà de la station terminus. L'équation suivante présente le calcul à accomplir pour connaître le temps de retournement.

$$\text{Temps de retournement} = t_{j-1}^0 - t_{i+1}^1 \quad 3-10$$

Mais tout d'abord, il faut associer chacun des trains d'une direction aux trains de la direction opposée. Le diagramme espace-temps est un instrument indispensable afin de permettre cette association. Cependant, dans le but de limiter les erreurs de calcul, il faut porter une attention particulière aux trains qui sont éjectés du réseau et qui quittent le terminus pour se rendre directement au garage, de même pour les trains qui sont injectés dans le réseau.

3.6. Vitesses

Avant d'identifier les différents types de vitesse calculable avec les données recueillies, les notions de mouvements des véhicules d'un réseau de transport en commun doivent être établies. L'étude de l'offre d'un réseau de transport en commun est liée aux déplacements de ses véhicules dans l'espace et dans le temps. Les données d'occupation de voie disponibles pour cette recherche permettent justement de connaître la position des trains dans l'espace et de suivre leurs mouvements au travers le réseau. Ainsi, dans le but d'examiner le degré de précision atteignable par l'expérimentation de ces données, les phases du mouvement des véhicules sont présentées dans cette section.

Comme expliqué ultérieurement, c'est le pilote automatique qui transmet les informations d'accélération et de freinage nécessaires au système traction afin d'accomplir la « marche type ». Cette marche a été conçue afin de répondre aux priorités d'un système de transport collectif qui sont l'optimisation du temps de parcours et le confort lié à la sécurité des usagers. Cette « marche type » comprend cinq phases, tel qu'illustré dans la figure 3-10 : accélération, vitesse constante, marche sur l'erre, arrêt programmé et l'attente en station (non illustrée).

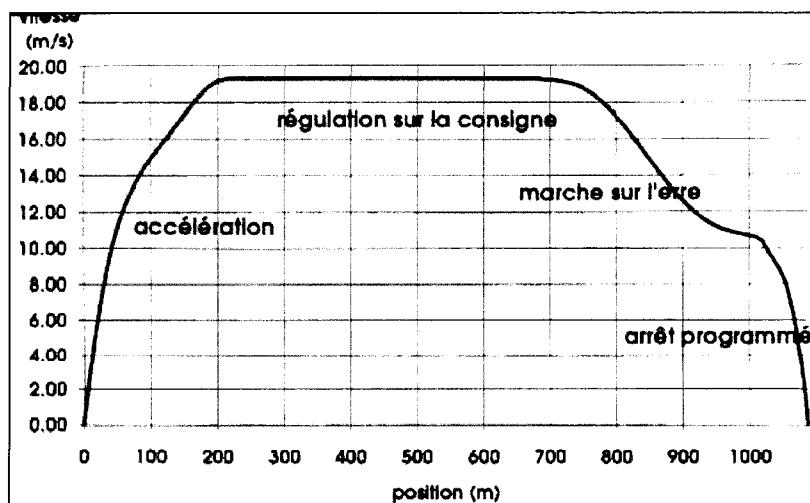


Figure 3-10 : Profil de vitesse de la « marche type »
Source : (Allaire *et al.*, 1994)

L'analyse de la « marche type » se fait au travers des variables de déplacement. Les variables sont la distance et ses trois dérivés, tel que présenté dans les équations suivantes.

$$\text{Distance : } s = f(t); \quad 3-11$$

$$\text{Vélocité : } v = \frac{ds}{dt}; \quad 3-12$$

$$\text{Accélération, décélération : } a = \frac{d^2s}{dt^2} = \frac{dv}{dt}; \quad 3-13$$

$$\text{Secousse ou « jerk » : } z = \frac{d^3s}{dt^3} = \frac{da}{dt}. \quad 3-14$$

Pour les transports en commun, le confort des usagers est un facteur important, l'analyse du comportement de ceux-ci lorsqu'ils sont soumis aux différentes variables est donc importante. Lors d'un déplacement à vitesse constante à l'intérieur d'un véhicule, l'usager ne perçoit aucune force contre lui, peu importe la grandeur de la vitesse. Cependant, l'usager discerne les accélérations et les décélérations. L'accélération d'un véhicule ne doit pas produire de force sur les usagers qui excéderait la capacité de ceux-ci à se maintenir debout. C'est pourquoi les valeurs de l'accélération d'un véhicule doivent se maintenir entre 1 et 1,8 m/s² (Vuchic, 1981). Les mêmes valeurs sont vraies pour la décélération. Une accélération constante permet à tous les usagers de compenser la force qui s'exerce contre eux. En fait, c'est le changement d'accélération qui produit le plus de force sur un usager. C'est ici qu'entre en jeu la variable de secousse ou « jerk ». Celle-ci représente le changement d'accélération en fonction du temps et la force qui fait perdre pied aux usagers. Il est donc le facteur le plus important dans l'analyse du confort des usagers le long d'un parcours. La valeur de ce facteur ne doit pas dépasser 0,5 à 0,6 m/s³ (Vuchic, 1981).

La toute première phase de la marche type d'un véhicule circulant entre deux stations est la *phase d'accélération* (« acceleration »). Le train, en sortie de stations, accélère à son régime maximal afin d'atteindre la vitesse de pointe le plus rapidement. Puis,

l'accélération diminue jusqu'à zéro lorsque la vitesse de pointe est atteinte. Afin de rendre le temps de parcours le plus bref, il est préférable de conserver l'accélération maximale le plus longtemps possible. Cependant, l'accélération varie à partir du départ du train jusqu'à l'atteinte de sa vitesse maximale, complexifiant ainsi les calculs. Toutefois, afin de permettre l'analyse générale du temps de parcours, il n'est pas nécessaire d'utiliser une grande résolution. C'est pourquoi l'utilisation de la valeur d'accélération constante dans les calculs suffit à la résolution. Si la distance entre les stations est suffisamment grande pour permettre aux trains d'atteindre leur vitesse maximale, la moyenne d'accélération \bar{a} , depuis l'arrêt jusqu'à sa vitesse maximale, doit être utilisée. La courbe de la variable de la moyenne de l'accélération est choisie pour que les aires sous cette courbe et la courbe de l'accélération réelle soient égales. Donc, la période d'accélération t_a devient plus courte, ce qui force l'utilisation d'une période de vitesse constante t_v plus longue. La figure 3-11 illustre cette explication, à noter que les aires des régions I et II entre la courbe d'accélération réelle et moyenne sont identiques.

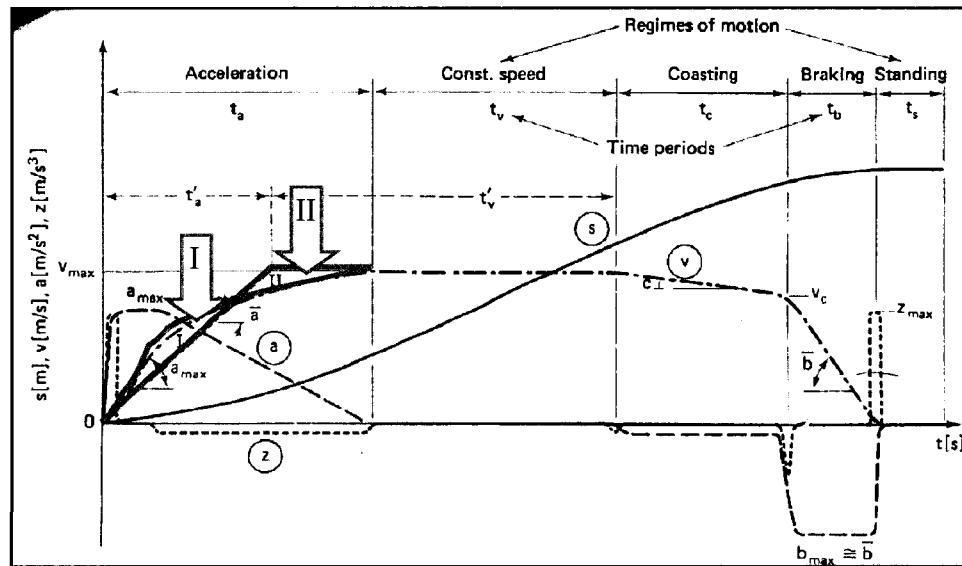


Figure 3-11 : Variation de la distance, de la vitesse et de l'accélération dans le temps.
Source : (Vuchic, 1981)

La seconde phase de la marche type est la *vitesse constante* (« *constant speed* »). Lors de cette phase, le système traction du véhicule est continuellement engagé afin de

maintenir une vitesse constante. Cette phase est souhaitable le plus longtemps possible lors d'un parcours pour ainsi diminuer le temps de parcours et augmenter l'efficacité du réseau.

Puis, vient la *marche sur l'erre* (« coasting »). Bien que cette phase augmente le temps de parcours total, elle permet de réduire la consommation énergétique. En effet, pour certains systèmes, lors de cette phase, le système traction peut retourner une partie de l'énergie électrique consommée.

Avant l'arrivée en station, la phase *d'arrêt programmé* (« breaking ») permet au train de s'immobiliser. Lors de cette phase, les freins sont appliqués et une décélération rapide s'exerce sur le véhicule jusqu'à son immobilisation complète. Pour les calculs, la décélération lors de la phase d'arrêt programmé peut être considérée comme étant constante sans engendrer d'erreurs considérables.

La dernière phase de la marche type est *l'attente en station* (« standing »). Le temps consacré à cette phase doit être le plus court possible afin de minimiser le temps de parcours. Cependant, le temps d'attente en station varie selon différents facteurs qui ne peuvent être régulés par le pilote automatique.

Pour les parcours d'interstation trop courts pour permettre au véhicule d'atteindre sa vitesse maximale, certaines phases de la marche type sont retranchées telles que la vitesse constante et la marche sur l'erre.

Les vitesses se calculent selon les temps de déplacement. En effet, la pente de la courbe du diagramme espace-temps d'une UT donne la vitesse tout au long de son parcours. Afin de connaître la vitesse moyenne du parcours complet d'une UT, il suffit de prendre la pente de la droite tracée entre son départ et son arrivée. Dans le cas d'utilisation de données discrètes où le calcul de la vitesse se fait au travers de moyennes, il est essentiel de distinguer la vitesse instantanée de la vitesse dans l'espace afin d'appliquer le type de calcul de vitesse approprié. La vitesse instantanée est la moyenne des vitesses de tous les véhicules pour une période précise de temps. Alors que la vitesse dans l'espace est calculée en utilisant un segment de route précis,

pendant une période précise. Ainsi, la vitesse dans l'espace moyenne est la moyenne des vitesses des véhicules ayant circulé à l'intérieur du segment de route à la période précisée. Tandis que les vitesses instantanées moyennes sont utilisées en référence à la moyenne des points le long d'une route sur une période de temps tandis que la vitesse dans l'espace est utilisée dans le calcul de vitesses moyennes associées à une longueur de segment connue. La figure 3-12 illustre comment est relevée la vitesse dans l'espace pour le cas du métro.

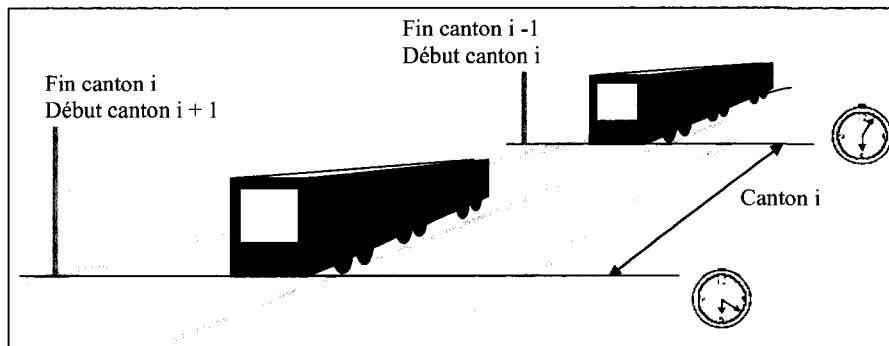


Figure 3-12 : Vitesse dans l'espace.
Source : inspiré de (FHWA, 1998)

Les équations suivantes présentent les formules nécessaires afin d'obtenir les différents éléments de temps de parcours et de vitesse.

$$\text{Temps de parcours estimé} = \frac{\text{Longeur_segment(km)}}{\text{Vitesse_instantanée}} \times 3.600 \text{ sec/ heure} \quad 3-15$$

Vitesse moyenne

instantanée :

$$\bar{v}_{TMS} = \text{Vitesse moyenne} = \frac{\sum v_i}{n} = \frac{\sum \frac{d}{t_i}}{n} \quad 3-16$$

Vitesse moyenne dans

l'espace :

$$\bar{v}_{SMS} = \frac{\text{Distance_parcourue}}{T_de_parcours_moyen} = \frac{d}{\sum t_i} = \frac{n \times d}{\sum t_i} \quad 3-17$$

Vitesse moyenne active :

$$\bar{v}_r = \frac{\text{Distance parcourue}}{\text{Temps actif moyen}} = \frac{d}{\sum \frac{t_{ri}}{n}} = \frac{n \times d}{\sum t_{ri}} \quad 3-18$$

Où : d = distance parcourue ou longueur du segment de route ;
 n = nombre d'observation ;
 v_i = vitesse du i ème véhicule ;
 t_i = temps de voyage du i ème véhicule et
 t_{ri} = temps actif du i ème véhicule.

La vitesse moyenne dans l'espace est, en termes mathématiques, un calcul des moyennes de vitesses harmoniques (McShane *et al.*, 1990). La relation entre la vitesse instantanée et la vitesse dans l'espace a été développée par Wardrop (1952). Il a alors démontré que la vitesse moyenne instantanée équivaut à la vitesse moyenne dans l'espace seulement lorsque la variance de la vitesse dans l'espace est zéro. Pour obtenir une variance de zéro, il faut que tous les véhicules relevés dans le segment de mesure aient la même vitesse. Dans tous les autres cas, lorsque la variance de la vitesse dans l'espace sera plus grande que zéro, la vitesse moyenne instantanée sera toujours plus grande que la vitesse moyenne dans l'espace. La vitesse dans l'espace est plus stable statistiquement que la vitesse instantanée, en particulier pour de petits segments ou de petits temps de parcours. L'écart entre les deux types de vitesses s'amoindrit à mesure que les vitesses deviennent grandes. L'équation suivante démontre la relation entre la vitesse instantanée et la vitesse dans l'espace.

$$\bar{v}_{TMS} = \bar{v}_{SMS} + \frac{S^2_{SMS}}{V_{SMS}} \quad 3-19$$

Où : \bar{v}_{TMS} = vitesse moyenne instantanée

\bar{v}_{SMS} = vitesse moyenne dans l'espace

$$S^2_{SMS} = \text{variance de la vitesse moyenne dans l'espace}$$

Maintenant que les équations des temps de parcours et des temps d'arrêt en station sont établies, le calcul des vitesses de parcours est l'étape suivante dans l'analyse d'un système de transport. Afin de faire ressortir les profils de vitesses, il est nécessaire de déterminer de quelle façon les vitesses de parcours des trains peuvent être prélevées. Le calcul de la vitesse dans l'espace s'applique particulièrement bien dans le cas des métros qui possèdent des cantons de longueurs fixes, connues et dont il existe un enregistrement sur les bornes. Tout d'abord, l'application directe du calcul de la vitesse dans l'espace peut se mesurer pour chacun des trains traversant les cantons. Effectivement, un relevé d'heure est fait à chaque fois que la tête du train atteint l'entrée d'un nouveau canton, tel que démontré à la figure 3-13.

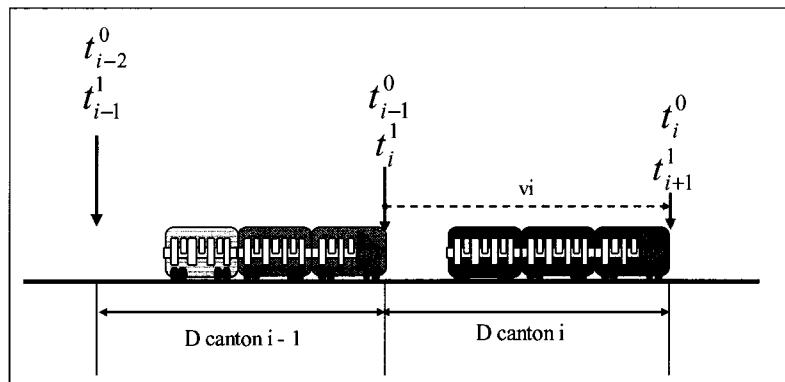


Figure 3-13 : Vitesse dans l'espace à l'activation des cantons.

$$\bar{v}_i = \frac{D_i}{t_{i+1}^1 - t_i^1} \quad 3-20$$

Puis, le même calcul peut être effectué sur la queue du train puisque qu'un relevé d'heure est effectué à chacune des sorties des trains pour chaque canton, voir la figure 3-14 afin de visualiser.

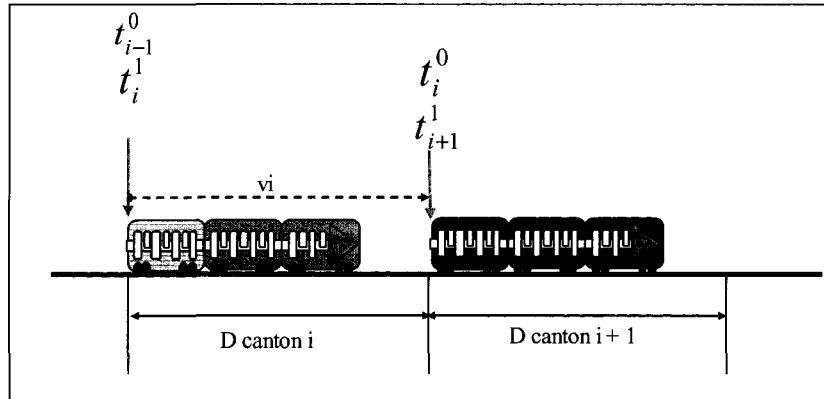


Figure 3-14 : Vitesse dans l'espace à la désactivation des cantons.

$$\bar{v}_i = \frac{D_i}{t_i^0 - t_{i-1}^0} \quad 3-21$$

La différence entre l'équation 3-20 et l'équation 3-21 fournit un indice sur l'accélération et la décélération. En effet, lorsque la valeur de l'équation 3-20 est plus grande que l'équation 3-21, le train est en décélération, de même, à l'inverse, le train est en accélération.

Les deux équations de vitesses précédentes sont les plus générales, cependant, elles demeurent des moyennes de vitesse à l'intérieur du canton entier. Dans les cas où le canton est plus long que le train et afin de mieux estimer les variations de vitesse à l'intérieur de celui-ci, il est possible de prendre en compte les activations et les désactivations du canton dans la même équation, connaissant la longueur des trains (figure 3-15). Cette équation reprend la formulation du temps d'arrêt en station.

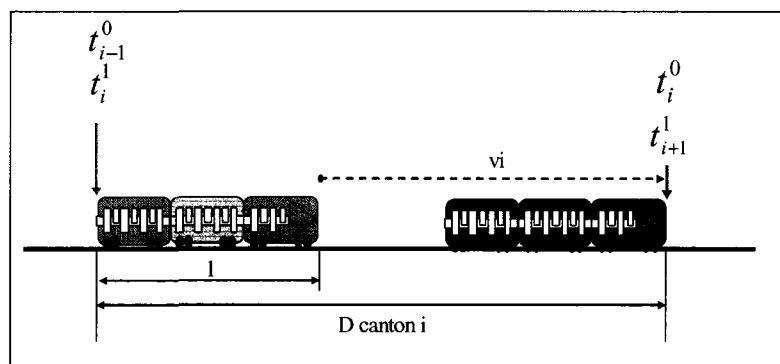


Figure 3-15 : Vitesse dans l'espace lorsque le canton est plus grand que le train.

$$\bar{v}_i = \frac{D_i - l}{t_{i+1}^1 - t_{i-1}^0} \quad 3-22$$

Puis, connaissant la longueur du train, la prochaine équation permet de calculer la vitesse du train sur une distance plus courte. Cette formule peut être décrite comme étant une vitesse ponctuelle. La vitesse ponctuelle permet d'obtenir une plus grande résolution lors de l'établissement du profil de vitesse (figure 3-16). En effet, elle permet de connaître la vitesse d'entrée et de sortie des cantons.

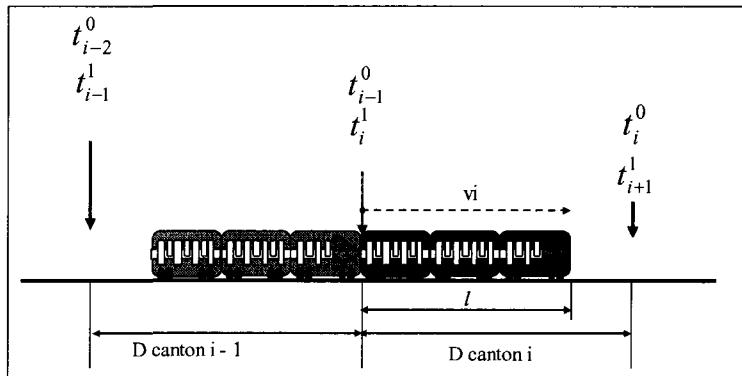


Figure 3-16 : Vitesse ponctuelle.

$$\bar{v}_i = \frac{l}{t_{i-1}^0 - t_i^1} \quad 3-23$$

Dans tous les cas, il faut garder en tête que la résolution des heures de capture de changements d'états des cantons est limitée à la seconde, ce qui peut engendrer des erreurs de temps de parcours jusqu'à deux secondes. Lorsque transposées à des vitesses, ces erreurs sont reflétées et amplifiées, ce qui peut résulter en des calculs de vitesses erronés compte tenu de l'équipement utilisé au métro de Montréal. Afin d'obtenir des résultats de vitesses possibles et réalistes, il est nécessaire de donner certaines conditions avant de faire le calcul. Pour les équations 3-20, 3-21 et 3-23, les calculs peuvent tous être effectués sans contraintes particulières, cependant lorsque la vitesse recensée dépasse de beaucoup la moyenne calculée sur ce canton, il est possible d'ajouter une ou deux secondes au temps de parcours afin d'obtenir la vitesse de parcours réelle. Par contre, pour l'équation 3-22, le calcul ne peut être effectué que

lorsque la longueur du canton est supérieure à la longueur du train. La figure 3-17 fait une représentation rapide de toutes les mesures de vitesses possibles qui peuvent être recueillies grâce à un système automatique de localisation de véhicule sur cantons fixes qui enregistre les événements d'occupation.

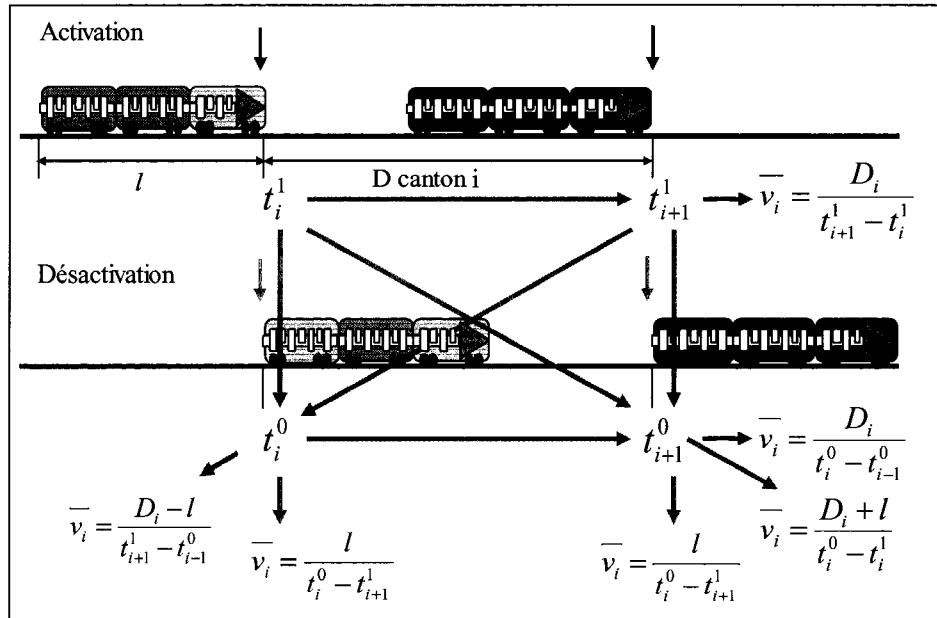
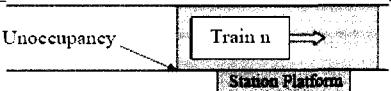
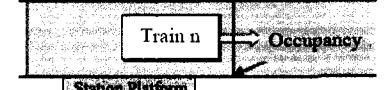
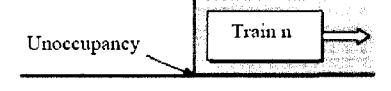
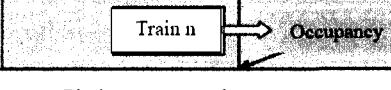


Figure 3-17 : Condensé de tous les calculs de vitesses possible.

3.7. Conclusion

L'établissement des différents indicateurs de performance liés aux mouvements, au temps et à la distance permet de déterminer ceux pouvant être extraits à partir de données provenant de relevées de position de véhicules de métro sur des voies qui sont découpées en cantons fixes de longueur variable. De plus, l'étude de Dixon et al. (2006) présente un tableau résumé des informations pouvant être extrait des données d'occupation de voie du métro de Boston et de leurs utilités pour les planificateurs. Ce tableau fait une distinction entre les cantons de stations et ceux des interstations.

Tableau 3-1 : Données d'occupation de voies et applications potentielles.

OCS data	Information	Evaluation of existing conditions and problem diagnosis	Role in service planning, schedule maintenance, service monitoring
 Station block occupancy and unoccupancy	Headway distribution at terminals and other stations	Reliability, Capacity bottlenecks	Schedule design, Supervision, Design of holding strategies
 Block occupancy and unoccupancy	Dwell times	Station performance, Operator performance	Schedule design, Station operations, Supervision
 Block occupancy and unoccupancy	Travel time distribution	Reliability	Schedule design, Run times, Layover times, Cycle times
 Block occupancy and unoccupancy	Schedule adherence	Reliability	Schedule design, Supervision
	Train trajectories	Terminal operations, Operator performance	Schedule design, Train sequencing
		Merging operations	Schedule coordination and offsets, Train sequencing

Source : (Dixon *et al.*, 2006).

L'ensemble des éléments parcourus dans ce chapitre permet maintenant d'établir une méthodologie assurant une caractérisation détaillée du métro de Montréal par le traitement des données disponibles. Tout comme l'étude de Dixon et al. (2006), l'utilisation d'un outil de visualisation permettrait de rapidement constater les indicateurs de performance du métro. Cependant, pour cette étude, les données disponibles doivent être vérifiées et épurées au préalable afin de retirer les erreurs qui ont pu s'y glisser. Le but de cette recherche n'est pas de créer un outil d'interrogation des données, mais plutôt de confirmer que les données disponibles peuvent être interprétées selon les indicateurs de performance décrits dans cette section. Encore une fois, afin de souligner l'importance du propos, l'arrivée massive de nouvelles données provenant des éléments du réseau ainsi que les nouvelles technologies informationnelles demande aux planificateurs de transport d'évoluer dans leur approche en matière de manipulation de données afin de se sortir du tourbillon de toute l'information disponible. En effet, l'ajout de données bonifie, mais, du même souffle, complexifie l'information disponible qui évolue dans le temps et dans l'espace. Cette

nouvelle problématique force les planificateurs à élaborer des techniques de stockage, de traitement et de visualisation de données efficaces. L'aspect visualisation ne doit pas être laissé pour compte puisque, malgré la complexité des résultats, le message transmis doit être limpide et compréhensible par l'ensemble des décideurs qui ne sont pas nécessairement des spécialistes du transport en commun. Plusieurs outils informatiques, tels que les SIG, les modélisations tridimensionnelles et les graphiques à plusieurs dimensions aident dans l'exercice de cette tâche. Aussi, étant donné que les valeurs réelles et complètes sont maintenant disponibles pour l'ensemble des composantes du réseau, les analyses classiques posées sur des moyennes peuvent faire place à l'analyse directe des données extrêmes. Cela permet de dévoiler les problématiques récurrentes du réseau et de concentrer les efforts directement sur celles-ci. La section suivante rassemble les expérimentations et les résultats obtenus par la manipulation de ces données.

CHAPITRE 4 - EXPÉRIMENTATIONS SUR LES INDICATEURS DE PERFORMANCE

Dans ce chapitre, sont regroupés les résultats des expérimentations faites sur les indicateurs de performance. Ces indicateurs sont présentés à l'intérieur de divers graphiques et tableaux. Mais avant de les présenter différents éléments de base doivent être spécifiés. Ainsi, les valeurs extrêmes ont été écartées afin d'obtenir un niveau de confiance à l'intérieur de 95.44% de la moyenne (± 2 écarts-types). Aussi, certains graphiques dans ce chapitre présentent une régression sur les moyennes et juste au coté de cette droite sont indiqués le coefficient de corrélation et la formule de régression. Le coefficient de corrélation renseigne sur le pourcentage de variance de la variable dépendante sur l'intensité de la liaison qui peut exister entre les variables à l'étude. Plus le coefficient de corrélation est près de 1, plus la liaison est forte. Le but de développer une formule de régression est de déterminer la valeur de la variable dépendante en connaissant seulement la valeur de la variable indépendante. Certains graphiques possèdent une grande valeur à l'interception de l'axe des Y. Ce type d'équation peut produire des estimations illogiques et doit donc être utilisé avec discernement. De plus, comme la plage de donnée s'étend sur une courte période, de 7h30 à 9h30, un intervalle de 15 minutes a été choisi dans le but de faire ressortir les différents attributs. Pour cette application, le choix du quart d'heure se justifie par la courte période de temps disponible et le faible niveau d'échantillons (passage de trains) qui permet de faire ressortir certaines caractéristiques sans verser dans l'excès de raffinement. Dans cette section, certains indicateurs obtenus peuvent être comparés avec les informations officielles émises par la STM. La caractérisation du métro passe par l'analyse des événements dans le temps et dans l'espace. L'utilisation des diagrammes espace-temps dans l'étude d'un réseau de transport permet de visualiser précisément ces événements et de les calculer. La figure suivante (Figure 4-1) présente, en exemple, le diagramme espace-temps de la ligne 2, dans les deux

directions. L'utilisation d'un logiciel SIG, permet de produire des polylignes à partir d'une base de données. L'avantage de l'utilisation de ce type de logiciel réside dans la facilité de navigation au travers la visualisation et le maintien de l'information complète relative à chacun des objets.

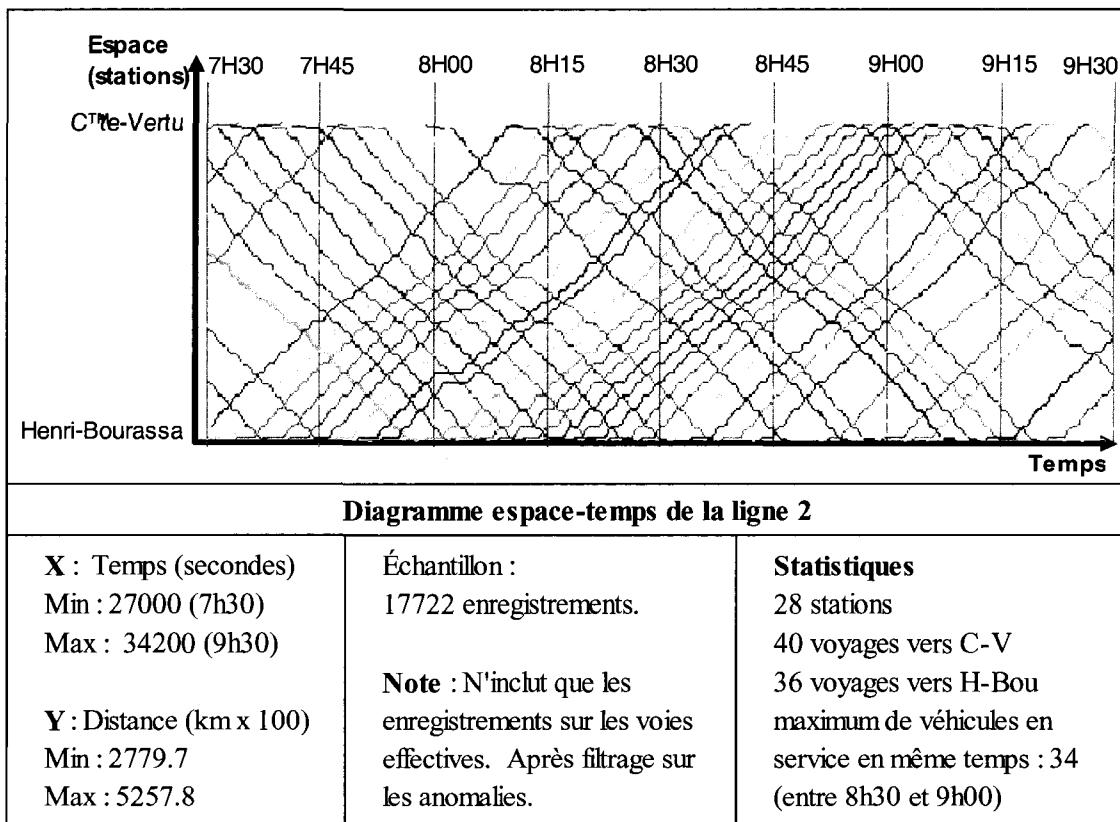


Figure 4-1 : Diagramme espace-temps de la ligne 2.
Reproduit à l'aide du logiciel Diva-GIS.

Puis, la prochaine figure (Figure 4-2) présente le voyage de deux trains consécutifs parcourant la même ligne, dont le départ est à partir du terminus Côte-Vertu. À partir de ces diagrammes, plusieurs éléments opérationnels peuvent en être déduits, tels que la distance de séparation, l'intervalle, le temps de parcours moyen, le temps de retournement, la vitesse moyenne, le temps de parcours pour chacune des interstations et le temps d'arrêt pour chacune des stations.

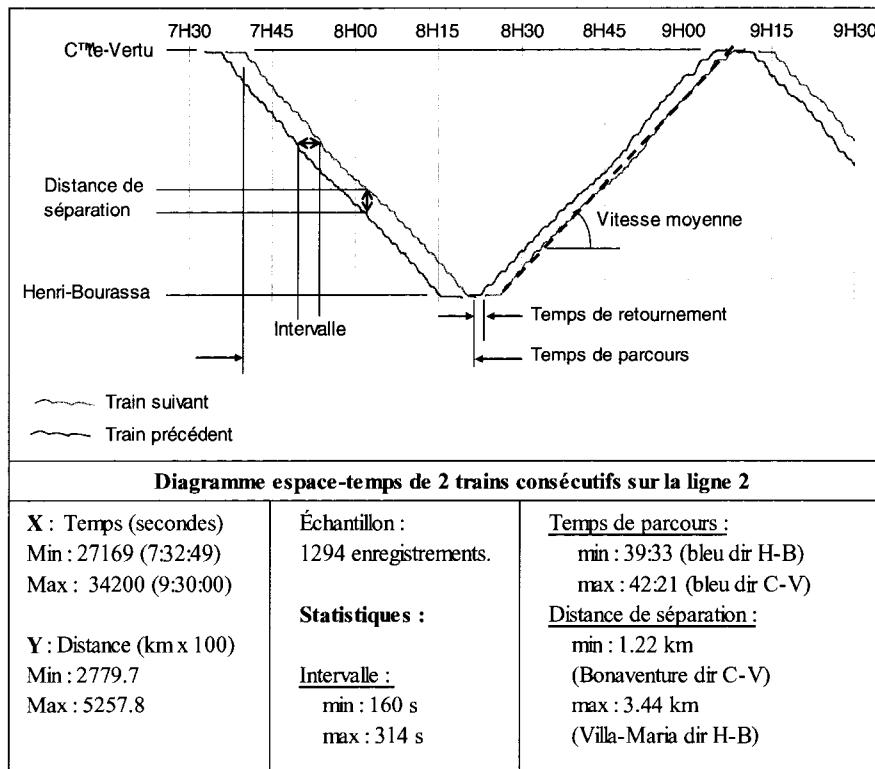


Figure 4-2 : Diagramme espace-temps de deux trains consécutifs sur la ligne 2.

De plus, le diagramme espace-temps permet de visualiser les injections et les éjections de véhicules, tout au long de la période désignée. La figure 4-3, extraite du diagramme espace-temps, présente un exemple de sortie d'un train du réseau au terminus Côte-Vertu.

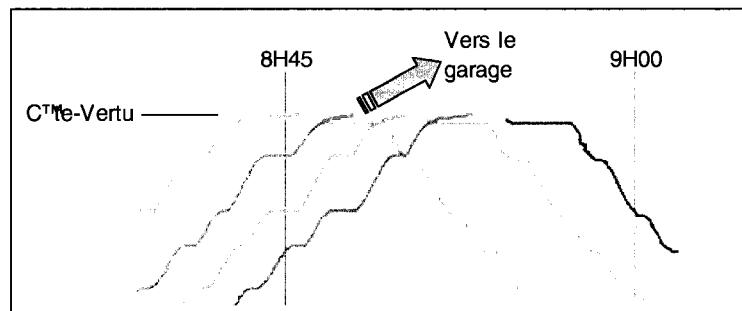


Figure 4-3 : Agrandie du diagramme espace-temps de la ligne 2.

Dans ce cas-ci, l'éjection du train est déduite par l'arrivée d'un second train avant même que celui-ci ait pu réintégrer la voie en direction inverse. Aussi, l'analyse détaillée des diagrammes espace-temps permet de constater qu'en aucun moment, un

train quitte une station alors que la station en aval est encore occupée. En effet, le train de tête doit quitter sa station afin de permettre au train suivant de quitter la sienne.

4.1.Étendue du réseau

À partir des données, la caractérisation des lignes en exploitation est présentée à l'intérieur du tableau suivant (Tableau 4-1). Les valeurs déclarées ont été rapportées de la STM (2002b). Il demeure important de garder à l'esprit que la ligne 4 n'est pas compilée dans l'étendue totale.

Tableau 4-1 : Longueur totale des lignes en exploitation

	PK Début	PK Fin	Longueur (km) Calculée	Longueur (km) Déclarée (2002)
Ligne 1	21.733	43.842	22.109	22.1
Ligne 2	27.797	52.578	24.781	24.8
Ligne 5	29.129	38.808	9.679	9.7
Total	Sans la ligne 4		56.569	56.6

À la lumière de ces résultats, une constatation est faite sur le degré de précision des données disponibles sur les mesures de début et de fin de ligne. En effet, celles-ci présentent un très faible niveau d'erreur. Ceci permet de confirmer que les données disponibles utilisées dans la détermination des longueurs d'interstations et des stations sont exactes.

Il faut cependant noter que les longueurs moyennes des interstations fournies par les données officielles de la STM se calculent à partir du début des quais, comme l'illustre la figure suivante (Figure 4-4).

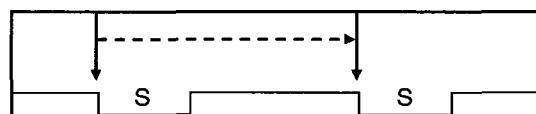


Figure 4-4 : Représentation des calculs de la longueur moyenne d'interstation.

La comparaison entre les moyennes des longueurs des interstations calculées à partir des données recueillies et les données fournies par la STM (2002b) sont présentées dans le tableau 4-2.

Tableau 4-2 : Distance moyenne entre les stations

Distances moyennes entre stations (km)		
	Calculée	Déclarée (2002)
Ligne 1	0.850	0.850
Ligne 2	0.918	0.919
Ligne 5	0.880	0.882

Dans le but de connaître la longueur moyenne réelle des interstations, un calcul à partir de la fin du quai jusqu'au début du quai suivant est nécessaire. Cependant, aucune donnée officielle n'est accessible pour fin de comparaison. En contrepartie, la démonstration de la grande précision des données recueillies comparativement aux données officielles en ce qui concerne les deux derniers calculs, permet de prétendre que les résultats sont du même ordre de précision. La figure 4-5 présente la méthode utilisée dans le calcul des longueurs des interstations réelles.

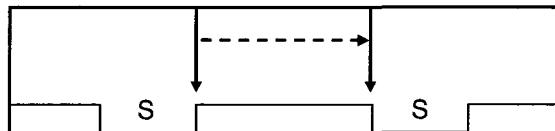


Figure 4-5 : Représentation des calculs de la longueur moyenne des interstations réelles.

Puis, le tableau 4-3 permet de constater les valeurs moyennes obtenues selon cette technique de calcul.

Tableau 4-3 : Longueur moyenne des interstations

Longueur moyenne des interstations (km)	
	Calculée
Ligne 1	0.689
Ligne 2	0.757
Ligne 5	0.720
Moyenne Totale	0.723

4.2.Trains en service, intervalle et fréquence

Tel que discuté à l'intérieur du chapitre précédent, la fréquence est le nombre de véhicules qui passent sur un même point fixe dans une unité de temps, tandis que l'intervalle est le temps séparant le passage entre deux véhicules à un point fixe. La fréquence peut être trouvée grâce à l'utilisation du graphique espace-temps. En effet, si un trait tracé perpendiculairement à l'axe des distances parcourt l'ensemble du diagramme, il croisera tous les passages de trains effectués à ce point fixe. Par la suite, l'établissement de bornes de temps sur le calcul du nombre de trains qui croisent ce même trait permet de calculer la fréquence. Afin de l'obtenir de façon mathématique, à partir des données disponibles, le calcul doit s'effectuer à partir de l'intervalle. Connaissant l'heure d'activation de tous les cantons du réseau à partir d'un train, il est possible de calculer le temps que prend la prochaine activation de ces mêmes cantons et ainsi calculer l'intervalle de temps séparant chacun des trains sur tout le parcours de la ligne. Ces calculs combinés à l'observation du diagramme espace-temps permettent de distinguer une variation dans le nombre de voyages à l'intérieur même de l'heure de pointe. Cela signifie que la fréquence et l'intervalle varient à travers l'heure de pointe. La figure 4-6 présente la densité des évènements détectés sur la ligne 2 en direction de la station Côte-Vertu à l'intérieur du diagramme espace-temps.

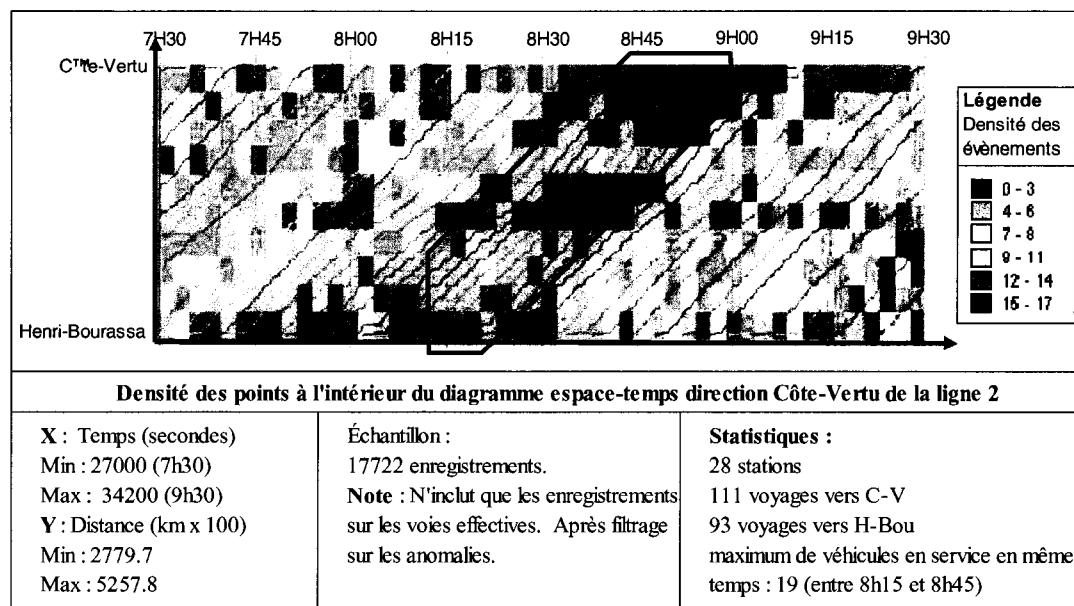


Figure 4-6 : Variation de l'intervalle à travers l'heure de pointe.

L'intervalle est calculé à partir des stations puisqu'il n'est perceptible qu'à partir de celles-ci du point de vue des usagers. De plus, les temps de parcours à l'intérieur des interstations possèdent une faible déviation. Afin de représenter la variation de l'intervalle au travers de l'heure de pointe, la moyenne des temps séparant les passages de chacun des trains, pour chacune des stations, est calculée pour tous les quarts d'heure. Cette moyenne est représentée par les histobarres de la figure 4-7. Chacun des traits représente la moyenne des intervalles pour une station tandis que la droite mesure le nombre de trains en service à l'intérieur des quarts d'heure.

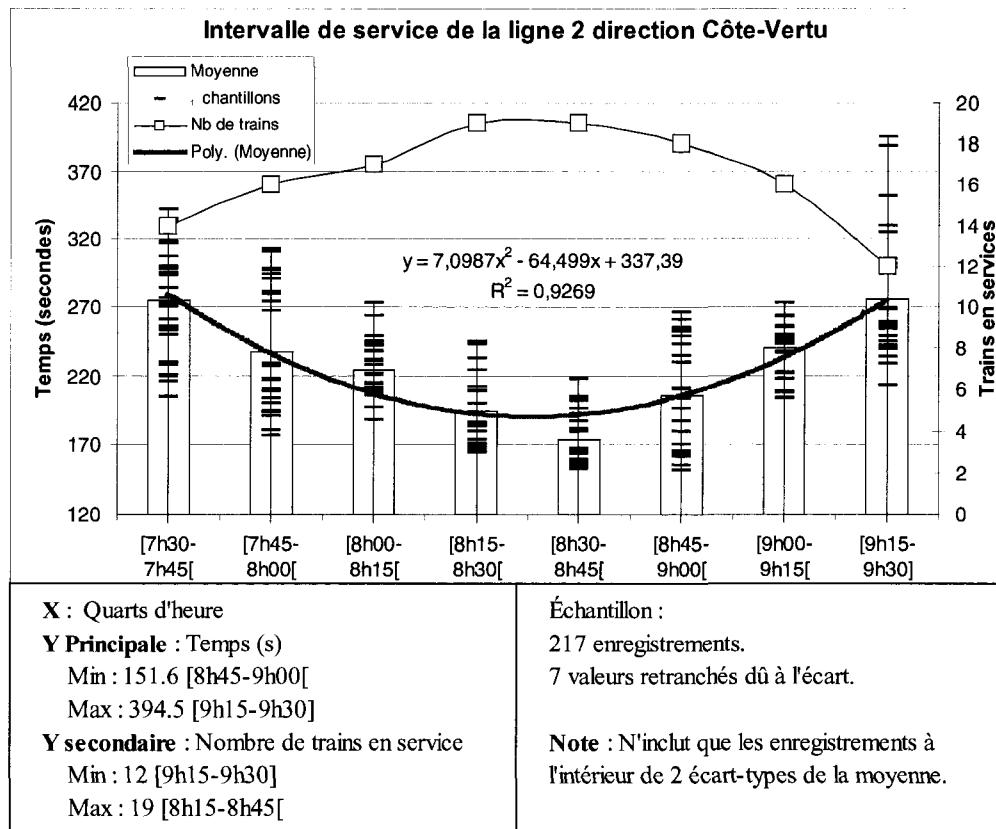


Figure 4-7 : Intervalle de service de la ligne 2, direction Côte-Vertu

La figure précédente apporte un éclaircissement sur les variations de l'intervalle de service au travers de l'heure de pointe. Une tendance claire vers la diminution, suivie d'un accroissement de l'intervalle autour du quart d'heure 8h30-8h45 est observable pour cette ligne dans la direction Côte-Vertu. De plus, le nombre de trains en service semble suivre la même courbe mais à l'inverse. La figure 4-8 permet de vérifier cette corrélation entre le nombre de trains en service et le temps de l'intervalle. Effectivement, la corrélation entre les deux est de l'ordre de 96,7 %.

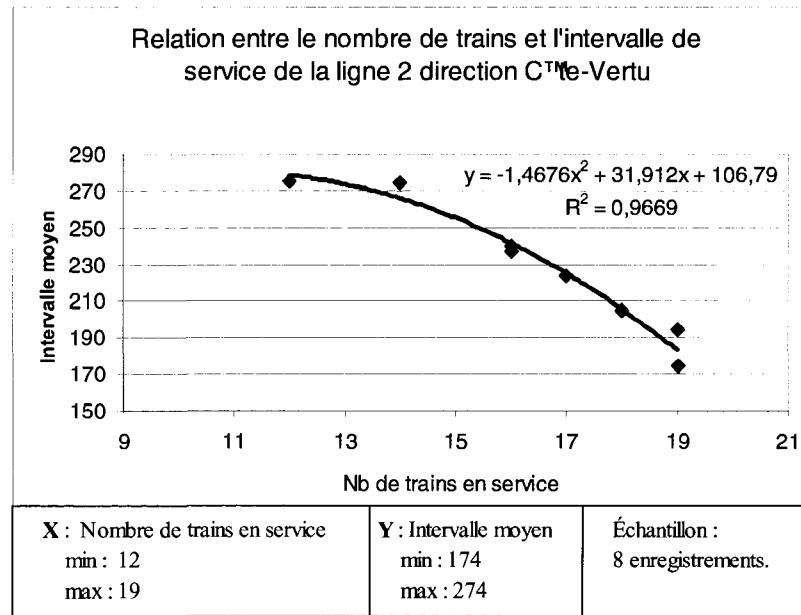


Figure 4-8 : Corrélation entre l'intervalle et le nombre de trains en service.

La figure 4-9 illustre les variations de l'intervalle au travers de la période de pointe pour l'ensemble des lignes et des directions. L'observation de ces variations permet de constater que la direction Angrignon, de la ligne 1, et la direction Côte-Vertu, de la ligne 2, possèdent un profil comparable.

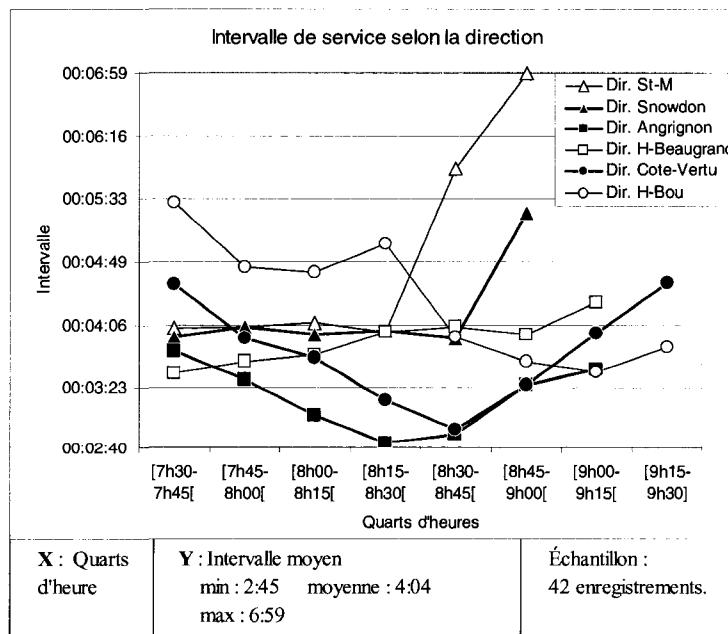


Figure 4-9 : Intervalle de service selon la direction.

Comme exprimé précédemment, la détermination précise de l'intervalle permet de calculer la fréquence. La figure 4-10 présente la fréquence observée des véhicules aux quinze minutes.

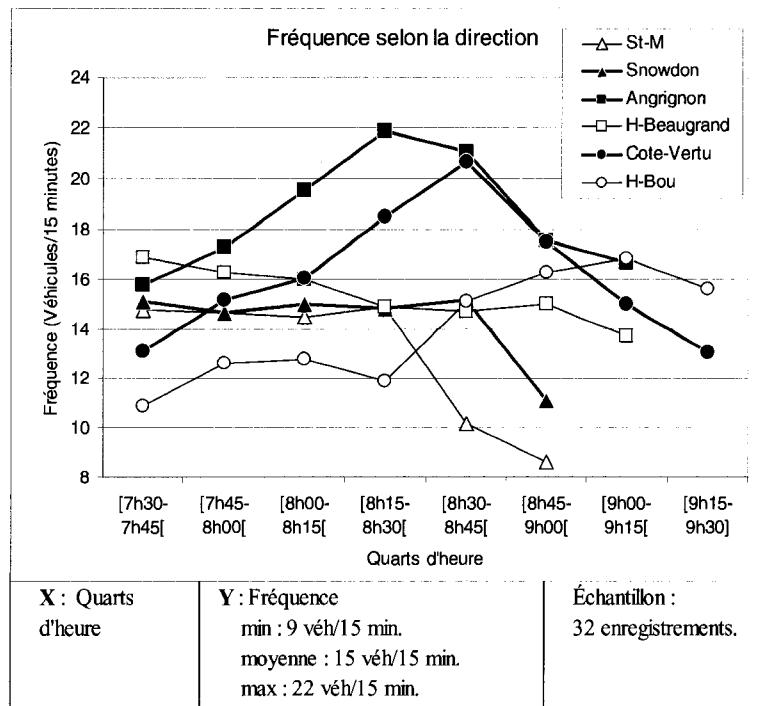


Figure 4-10 : Fréquence de service selon la direction.

Afin de mesurer le nombre de trains en service pour chacun des quarts d'heure, le diagramme espace-temps est encore une fois mis à profit. En effet, l'ajout dans le diagramme de la figure 4-1 de lignes verticales représentant les frontières des quarts d'heure permet de compter le nombre de trains en service à l'intérieur de cette plage horaire. Pour ce faire, il suffit de compter les voyages, complets ou partiels, qui entrent à l'intérieur des plages délimitées par ces lignes. Le tableau suivant 4-4 le nombre de trains en service sur les voies effectives, aux quarts d'heure, à partir de 7h30.

Tableau 4-4 : Nombre de véhicules en service sur le réseau par quart d'heure.

	Nombre de véhicules en service entre...						
	Ligne 1		Ligne 2		Ligne 5		Total
	Ang	H-Beau	C-V	H-Bou	Snowdon	St-M	
... 7h30 et 7h45	14	15	14	10	7	7	
	29		24		14		67
... 7h45 et 8h00	16	16	16	13	8	8	
	32		29		16		77
... 8h00 et 8h15	18	14	17	13	8	7	
	32		30		15		77
... 8h15 et 8h30	20	13	19	14	8	7	
	33		33		15		81
... 8h30 et 8h45	19	14	19	15	7	5	
	33		34		12		79
... 8h45 et 9h00	18	13	18	16	6	5	
	31		34		11		76
... 9h00 et 9h15	13	11	16	16	N/D	N/D	
	24		32		N/D		56
... 9h15 et 9h30	N/D	N/D	12	15			
	N/D		27		N/D		27
	Total						
	118	96	131	112	44	39	

4.3. Capacité

La capacité d'une ligne de métro est représentée par le nombre de passagers qui peuvent être théoriquement transportés. Cette valeur correspond à l'offre de service, elle se calcule pour chacune des directions, de chacune des lignes. Puisque la capacité est liée de près à la fréquence et à l'intervalle, elle subit, elle aussi, une variation dans le temps. La capacité de la ligne peut être déterminée par la connaissance du nombre théorique de passagers que peuvent contenir les véhicules et par leur fréquence de service. Bien que cette technique ne tienne pas compte de différents facteurs externes au réseau, elle n'en demeure pas moins un indicateur précieux pour les planificateurs en transport. Afin de mesurer la capacité il a été présumé qu'en période d'heure de pointe du matin, les trains de la ligne 1 et de la ligne 2 possèdent neuf véhicules et que la ligne 5 en possède six.

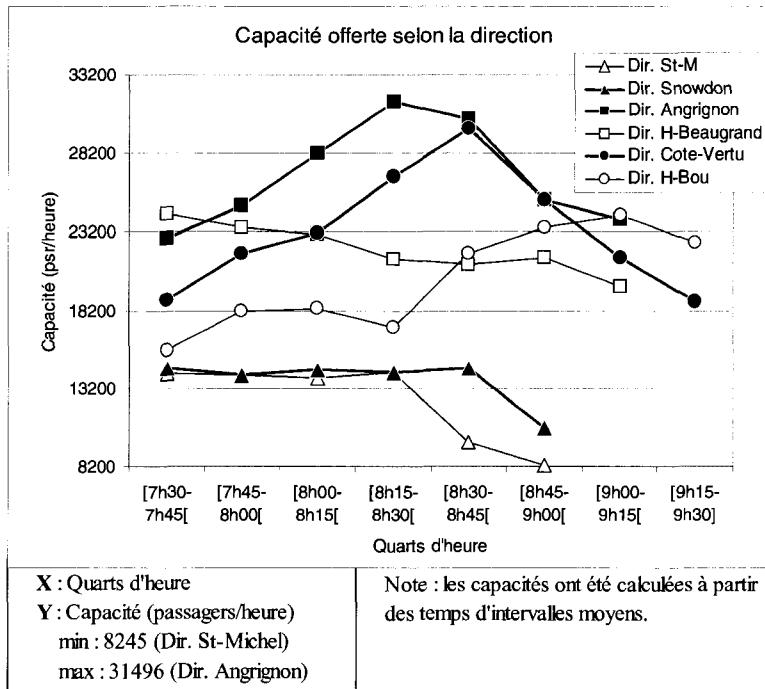


Figure 4-11 : Capacité de transport des directions, selon le quart d'heure.

La capacité ainsi calculée n'est qu'un indicateur théorique et ne sera jamais la capacité réelle atteinte par le réseau. Effectivement, les facteurs de diversité ne sont pas pris en compte. Afin de connaître la capacité réalisable d'une ligne, le calcul de la capacité doit s'effectuer selon les détails de la Figure 3-2 à partir de la station d'embarquement maximum. Pour les lignes 1 et 2, cette station est Berri-UQÀM et pour la ligne 5, cette station est Jean-Talon. Bien qu'elle paraisse plus complexe, cette équation possède les mêmes variables que celle de la capacité théorique, elle est simplement multipliée par le facteur de diversité qui est de 0,71. En effet, l'équation de la capacité de la ligne peut se traduire comme étant la fréquence minimale en heure. Le tableau 4-5 suivant permet, néanmoins, de connaître chacune des valeurs de l'équation. Ainsi, les valeurs requises sont directement disponibles, à l'exception de la marge d'opération. En effet, les valeurs concernant le nombre de véhicules et la capacité théorique de chacun, le facteur de diversité et les temps d'arrêt aux stations d'embarquement maximum sont connus. Alors que la marge d'opération ne peut être obtenue directement et doit être calculée à partir du temps d'arrêt des trains en station et du temps de séparation. Aussi,

puisque le moment de la pointe à l'intérieur de la période de pointe n'est pas connu, ce sont donc les valeurs moyennes de la période complète qui sont utilisées afin de déterminer le temps d'arrêt en station et la marge d'opération.

Tableau 4-5 : Aperçu des différents facteurs de la capacité réalisable.

	Ligne 1		Ligne 2		Ligne 5	
Station d'embarquement maximal	Berri-UQAM		Berri-UQAM		Jean-Talon	
Nombre de voitures par train	9		9		6	
Passagers par voiture	160		160		160	
Capacité du train (pass/train)	1440		1440		960	
Facteur de diversité	0,71		0,71		0,71	
Temps de séparation sécuritaire (sec)	90		90		90	
Direction	Ang.	H-Beau	C-Vertu	H-Bou	Snow.	St-M.
Temps moyen d'arrêt en station (sec)	57	26	44	31	44	31
Marge d'opération moyenne (sec)	42	115	76	136	118	153
Capacité de la ligne (véhicules/heure)	19	16	17	14	14	13
Capacité réalisable (passagers/heure)	19474	15934	17527	14322	9737	8955

4.4. Temps de parcours

Peu de manipulations sont nécessaires dans la détermination de ces temps de parcours puisque chacun des trains a été préalablement isolé des données. Ainsi, une moyenne du temps de parcours total peut être calculée selon chacune des lignes et chacune des directions, et ce, à partir des temps d'activation du canton suivant le terminus de départ et les temps de désactivation du canton précédent les terminus d'arrivée, tel que présenté à la figure 3-7. Le diagramme suivant compare les temps de parcours totaux des différentes lignes de métro, selon leur direction. Pour la ligne 2, la direction Ouest correspond à la direction Côte-Vertu, tandis que la direction Est coïncide avec la direction Henri-Bourassa.

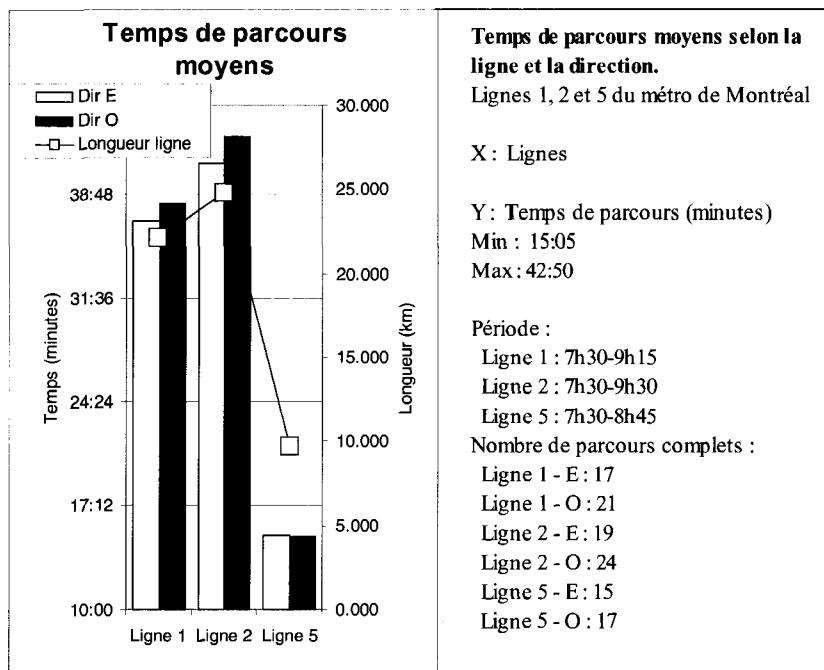


Figure 4-12 : Diagramme des temps de parcours moyens selon la ligne et la direction.

Ces valeurs peuvent, encore une fois, être comparées aux valeurs officielles déclarées par la STM (2002b), tel que présenté dans le tableau suivant.

Tableau 4-6 : Temps de parcours moyens.

Temps de parcours moyens calculés				Déclarés
	Dir E	Dir O	moyenne	(2002)
Ligne 1	37:04	38:11	37:37	38:00
Ligne 2	40:56	42:50	41:53	40:00
Ligne 5	15:07	15:05	15:06	15:00

Les écarts observables entre les temps de parcours calculés et les temps de parcours déclarés peuvent être attribués au faible niveau d'échantillonnage disponible. Aussi, les valeurs calculées ne sont qu'une moyenne à partir de données en heure de pointe du matin, et donc, la grande affluence des usagers peut affecter le temps de parcours total.

La figure précédente permet de constater le temps de parcours moyen à l'intérieur de l'heure de pointe. Cependant, ces temps ne sont pas uniformes sur l'ensemble de la plage horaire. En effet, une variation du temps total de parcours peut être observée, selon le quart d'heure de départ des trains. La figure qui suit expose cette observation

selon les deux directions pour chacune des lignes. Une tendance vers la diminution du temps de parcours total est observée pour l'ensemble du réseau, avec une tendance marquée pour les deux directions de la ligne 2.

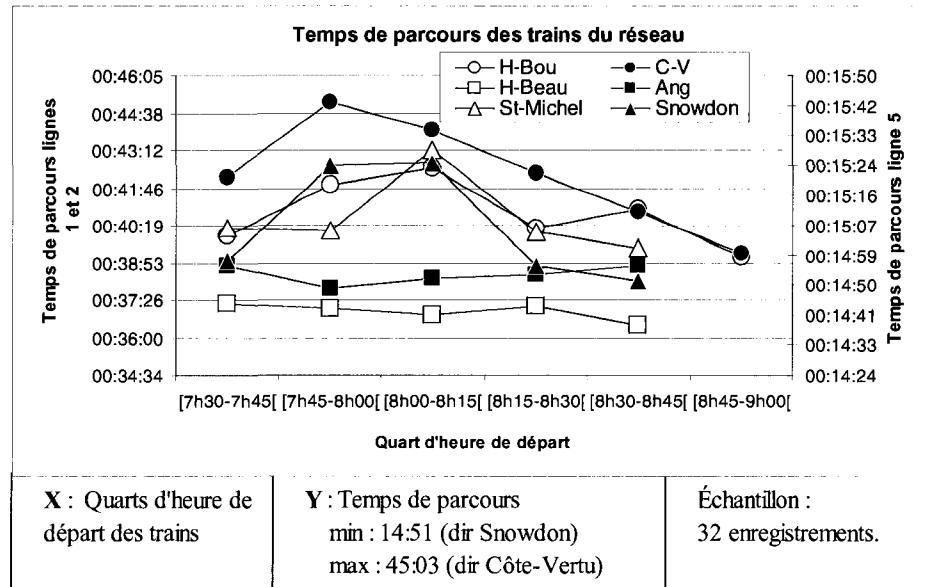


Figure 4-13 : Diagramme des temps de parcours du métro de Montréal.

Puis, dans le but de raffiner la caractérisation des calculs des temps de parcours totaux, le temps de parcours moyen pour chacune des interstations du réseau est mesuré. La direction Côte-Vertu, de la ligne 2, est prise en exemple dans la figure qui suit, les résultats des autres directions sont disponibles en annexe. Sur ce graphique, chacun des traits représente une lecture de temps de parcours, alors que les histobars représentent la moyenne obtenue à partir de ces lectures. Puis, ajoutées à cette information, les longueurs des interstations associées sont présentées. Afin d'obtenir de la précision dans le calcul de la moyenne, les valeurs au-delà de deux écart-types ont été retirées.

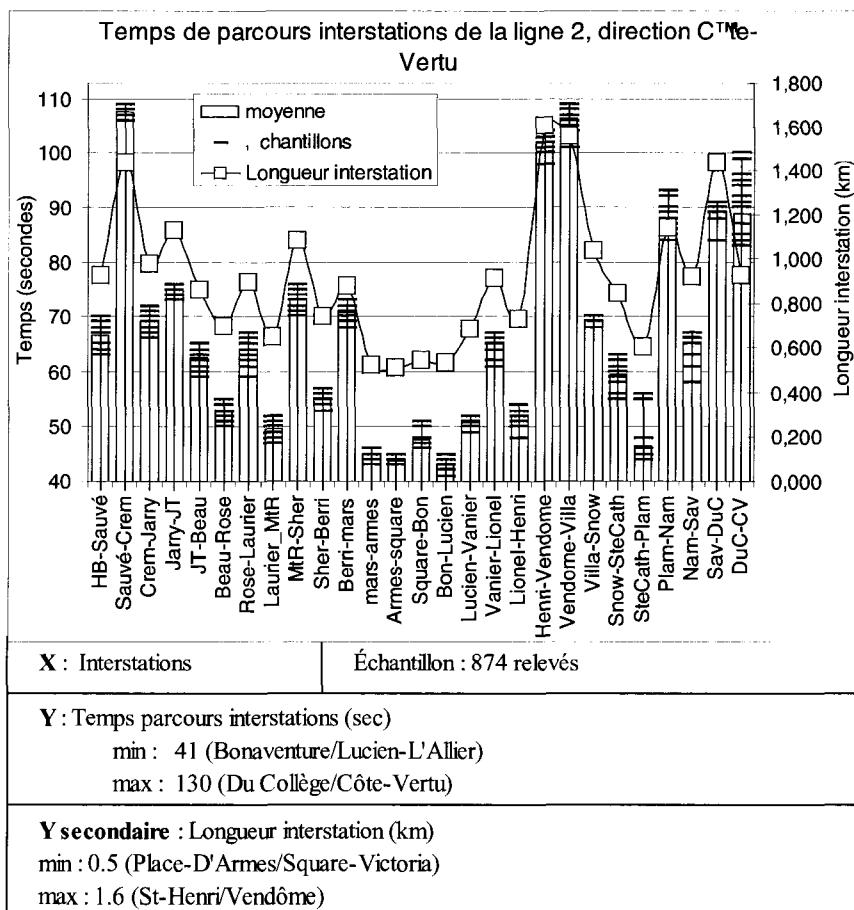


Figure 4-14 : Exemple des temps de parcours mesurés pour la ligne 2, direction Côte-Vertu

Cette figure (figure 4-14) permet de constater à quel point les mesures des moyennes ont une faible variance et que la valeur de la moyenne calculée est réaliste. La figure 4-15 est présentée dans le but de démontrer la régularité des temps de parcours de chacun des trains au travers des interstations. Malgré l'apparition de certaines irrégularités, les temps de parcours sont relativement uniformes. Ceci est compréhensible puisque, pour le confort des usagers, la régularisation des intervalles s'effectue à l'intérieur des stations plutôt qu'à l'intérieur des interstations.

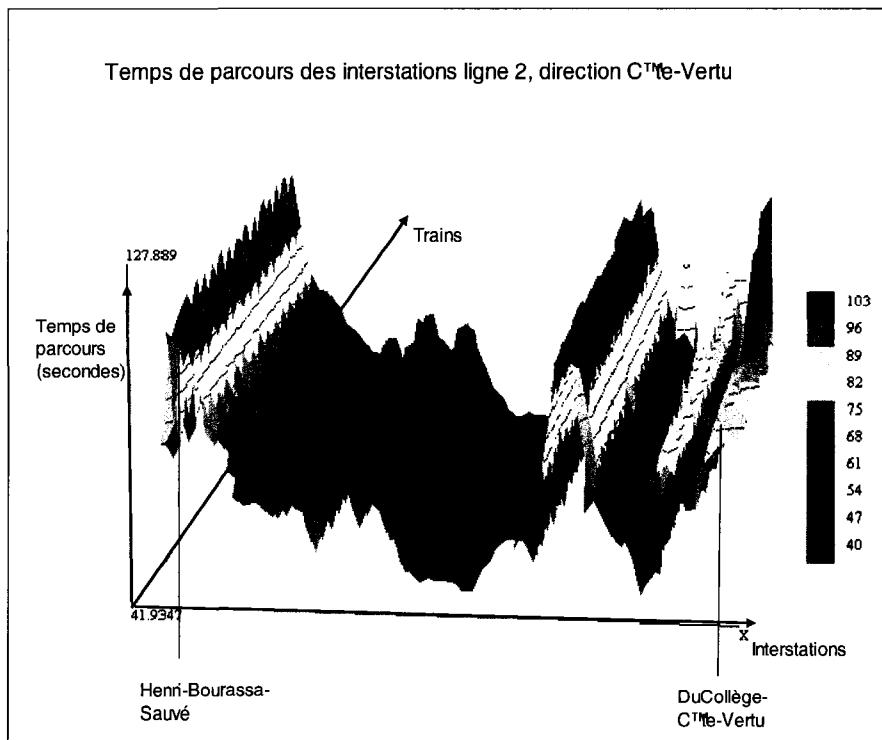


Figure 4-15 : Représentation du temps de parcours des interstations pour chacun des trains.

L'établissement des temps de parcours moyens pour chacune des interstations permet de vérifier l'établissement d'un lien avec les longueurs des interstations. Dans le but de déterminer cette corrélation, une hypothèse est posée. Celle-ci consiste à établir que les temps de parcours sont en lien avec les longueurs des interstations. De prime abord, cette relation semble être une régression linéaire, comme le démontre la figure 4-16 qui suit. Cependant, toutes les interstations de la ligne 5 se situent en dessous de la courbe de tendance, ce qui laisse présager que cette ligne fausse l'équation de la relation. Aussi, plusieurs interstations se retrouvent éloignées de cette courbe de tendance, ces interstations étant principalement situées en amont de la station terminus de la ligne. Les interstations en amont des terminus sont identifiées par la lettre « T » à l'intérieur du graphique.

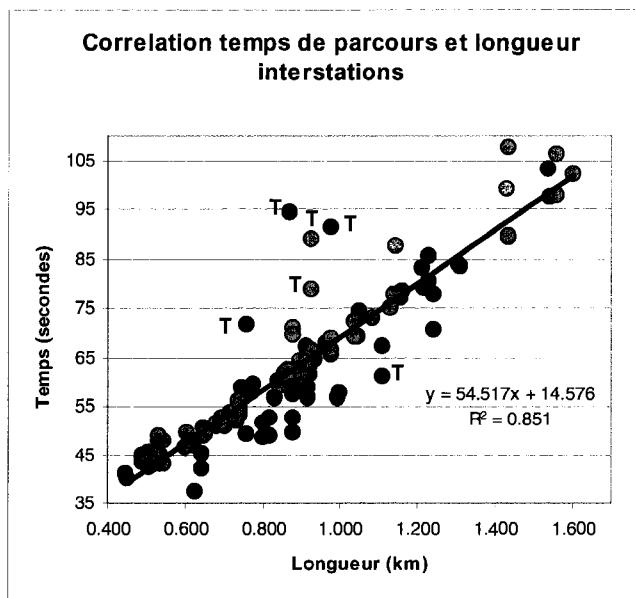


Figure 4-16 : Tendance entre le temps de parcours et la longueur des interstations.

À la lumière de ces observations, et afin d'améliorer le coefficient de corrélation, la ligne 5 a été mise à part des lignes 1 et 2. De plus, toutes les interstations devant les stations terminus ont été retirées. Deux formules de régression linéaire permettent alors de prédire, avec un coefficient de corrélation de 96,9 % et de 89,3 %, les temps de parcours selon les longueurs des interstations, tel que présenté à la figure 4-17.

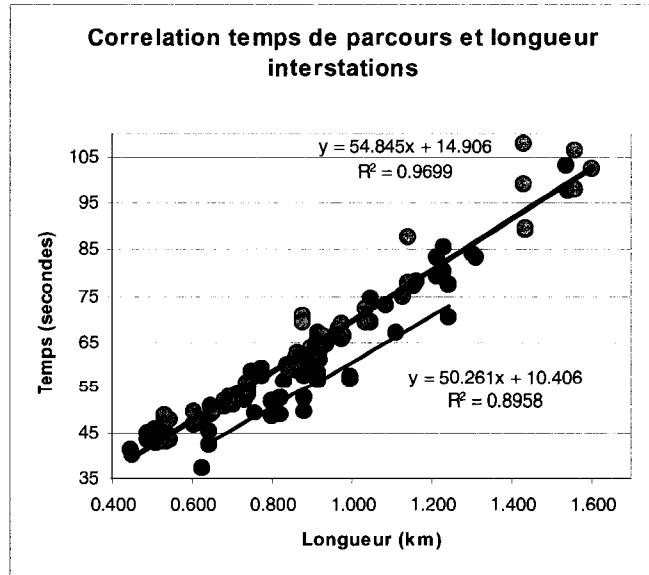


Figure 4-17 : Régression linéaire des temps de parcours selon les longueurs des interstations et des lignes, sans les terminus.

Ceci apporte deux équations de régression linéaire qui sont appliquées en fonction de la ligne à l'étude. Bien que l'équation est la même pour les ligne 1 et 2, l'application d'une autre est nécessaire pour la ligne 5.

Maintenant que les temps de parcours pour chacun des tronçons sont établis, l'utilisation du logiciel Viper permet d'identifier les chemins les plus courts entre différents centroïdes préétablis, tel qu'expliqué au chapitre 2. Le logiciel trouve par lui-même le chemin optimal à emprunter lorsque les centroïdes de début et de fin lui sont spécifiés. Bien entendu, la variable de coût désirée doit aussi être spécifiée. Par exemple, en appliquant les temps de parcours moyen à partir des données réelles, le chemin le plus court afin de se rendre à Polytechnique à partir de Longueuil en heure de pointe du matin se fait par la portion Est de la ligne 2, comme l'illustre le trait rouge sur la figure 4-18. En plus d'utiliser les données sur les occupations de voie afin d'effectuer cette opération, les temps de correspondance et de parcours sur la ligne 4 ont été acquis de Sarakinis (2006).

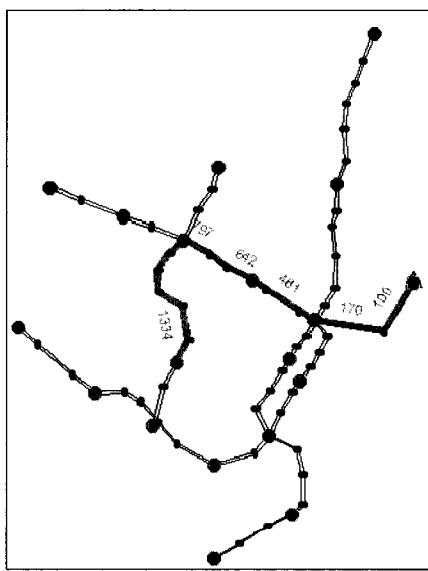


Figure 4-18 : Calcul du chemin le plus court à l'aide de Viper.

La connaissance des temps de parcours moyens permet de créer une carte des déplacements entre les stations terminus et de correspondances. Cette carte (figure 4-19) permet, en un coup d'œil, d'associer une échelle de temps à chacun des tronçons.

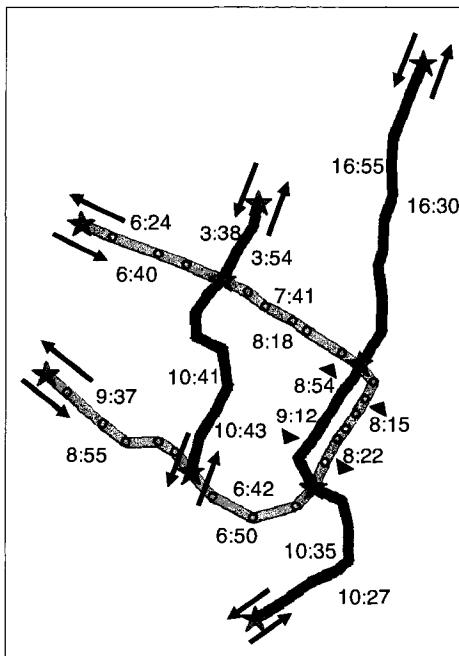


Figure 4-19 : Temps de parcours de correspondance en heure de pointe du matin.

La somme des temps de parcours de chacun des tronçons d'une ligne complète est différente des temps présentés auparavant puisque les temps d'arrêt aux stations de correspondance ne sont pas pris en compte.

4.5. Profil de vitesse

La caractérisation des temps de parcours, combinée aux attributs des infrastructures du réseau permet d'établir les vitesses commerciales. L'application directe de la longueur des lignes par rapport au temps de parcours totaux consiste en la première étape permettant de ressortir les vitesses moyennes de parcours. De plus, des données sur ces vitesses sont accessibles et mises à la disposition de tous par la STM (2002b)), ce qui permet de produire une comparaison avec les vitesses calculées dans le tableau 4-7.

Tableau 4-7 : Vitesses moyennes de parcours selon les directions

Vitesses moyennes de parcours calculées (km/h)				Déclarées
	Dir E	Dir O	moyenne	(2002)
Ligne 1	33.90	33.21	33.56	34
Ligne 2	35.61	34.74	35.18	36
Ligne 5	39.51	39.24	39.37	37

L'application directe des calculs de vitesse dans l'espace, pour l'ensemble des cantons, n'apporte pas la résolution nécessaire afin de permettre de tracer la courbe de la marche-type. Effectivement, comme les équations du calcul de vitesse sont des moyennes sur une certaine étendue de voie, l'application, dans l'espace, de ces valeurs fait l'objet d'une estimation. Les expériences démontrent que l'utilisation des équations 3-20 et 3-23 suffisent afin d'obtenir des profils de vitesse détaillés. Ces équations sont appliquées sur l'ensemble des cantons et sont placées à des endroits différents, soit, un à l'entrée du canton, exactement sur le chaînage, et, l'autre, exactement au centre du canton. L'illustration 4-20 permet de visualiser l'application spatiale des résultats de ces équations.

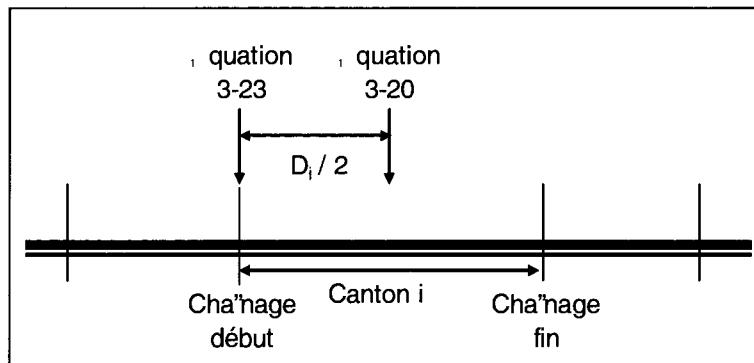


Figure 4-20 : Application dans l'espace des équations des moyennes de vitesse.

De plus, une manipulation sur les valeurs des calculs de l'équation 3-20 est nécessaire pour les cantons associés aux stations. Effectivement, la vitesse moyenne de parcours obtenue, pour les cantons stations est de 13 km/h. De toute évidence, les trains effectuent un arrêt aux stations, la vitesse doit donc être nulle. Une manipulation est nécessaire afin de les placer à zéro. La figure 4-21 présente les vitesses calculées obtenues, avec l'aide de ces équations, pour chacun des 14 cantons situés entre les stations Crémazie et Beaubien, pour les deux directions. Chacun des points sur le graphique représente un calcul de vitesse sur un canton lors du passage d'un train, alors que les traits pointillés sont le résultat du calcul de la vitesse moyenne dans l'espace (équation 3-17). Tel que discuté au chapitre précédent, le profil de vitesse complet, comprenant les cinq phases de marche des trains, se dessine.

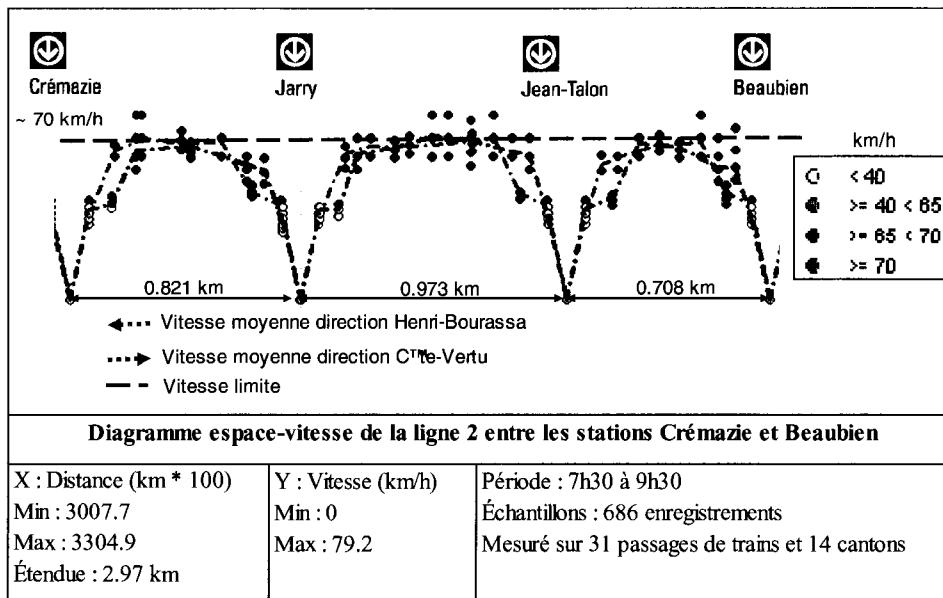


Figure 4-21 : Diagramme espace-vitesse des stations hors centre-ville de la ligne 2.

Cette section de voie a été utilisée dans le but de démontrer la constance des profils de vitesse et la vitesse limite atteinte sur cette ligne. Cette vitesse limite est approximée à 70 km/h, alors que la consigne de vitesse maximale, préétablie par le système et les pilotes automatiques, est de 72 km/h. Bien que le reste du parcours ne soit pas représenté, pour les besoins de la visualisation, les courbes de profils de vitesse et les limites de vitesse sont identiques pour toutes les autres interstations, à l'exception de celles situées à l'intérieur du centre-ville. Un aperçu des relevés des profils de vitesse des interstations du centre-ville suit à la figure 4-22.

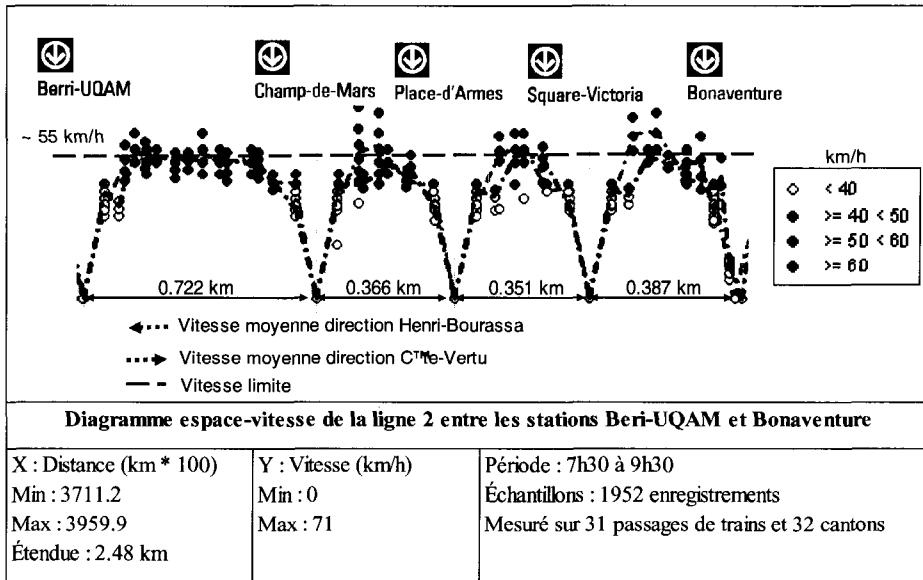


Figure 4-22 : Diagramme espace-vitesse des stations du centre-ville de la ligne 2.

La proximité de chacune des stations empêche les trains d'atteindre leur vitesse maximale. En effet, l'approximation de la limite de vitesse atteinte est de 55 km/h. Cette approximation correspond à une des consignes de vitesse des pilotes automatiques du système qui est de 56 km/h. Cette limite de vitesse est rapidement atteinte par l'accélération des véhicules pour, par la suite, entamer la phase de freinage programmé.

Un approfondissement sur la comparaison des profils de vitesse avec les consignes permises permet de constater que les trains n'atteignent pas leur vitesse maximale le plus rapidement possible. En effet, l'atteinte de la consigne maximale s'effectue en deux étapes. La première consigne de vitesse, avant celle de la vitesse maximale, est de 40 km/h et ce, pour toutes les interstations du réseau, qu'elles soient situées au centre-ville ou non, comme l'illustre la figure 4-23.

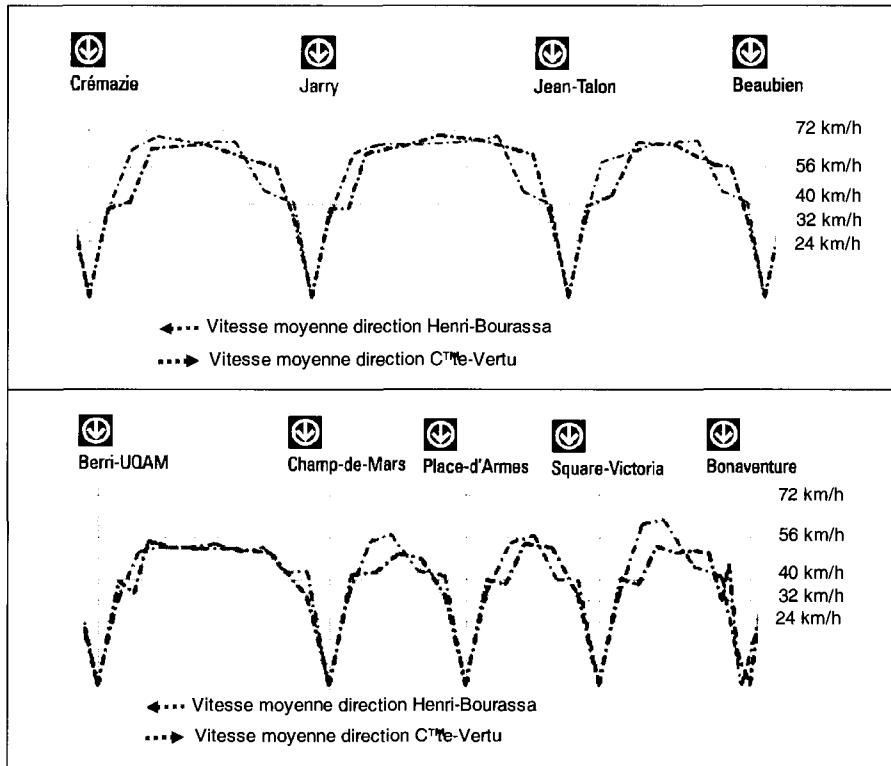


Figure 4-23 : Profils de vitesse obtenus comparés aux consignes de vitesses possible.

Il se peut que les vitesses moyennes calculées manquent de précision puisque l'échantillonnage est faible pour l'ensemble du réseau. En effet, les calculs de vitesses dans l'espace sont effectués à partir d'un n situé entre 31 et 34.

4.5.1. Temps d'arrêt en station

Une fois les temps d'arrêt en station calculés pour l'ensemble des trains qui ont circulé sur le réseau, la moyenne pour chacune des stations est déterminée en tenant compte seulement des valeurs à l'intérieur de deux écarts-types pour ainsi obtenir un niveau de confiance suffisant. La figure 4-24 présente les temps d'arrêt moyens, en heure de pointe du matin, pour les stations de la ligne 2, dans les deux directions.

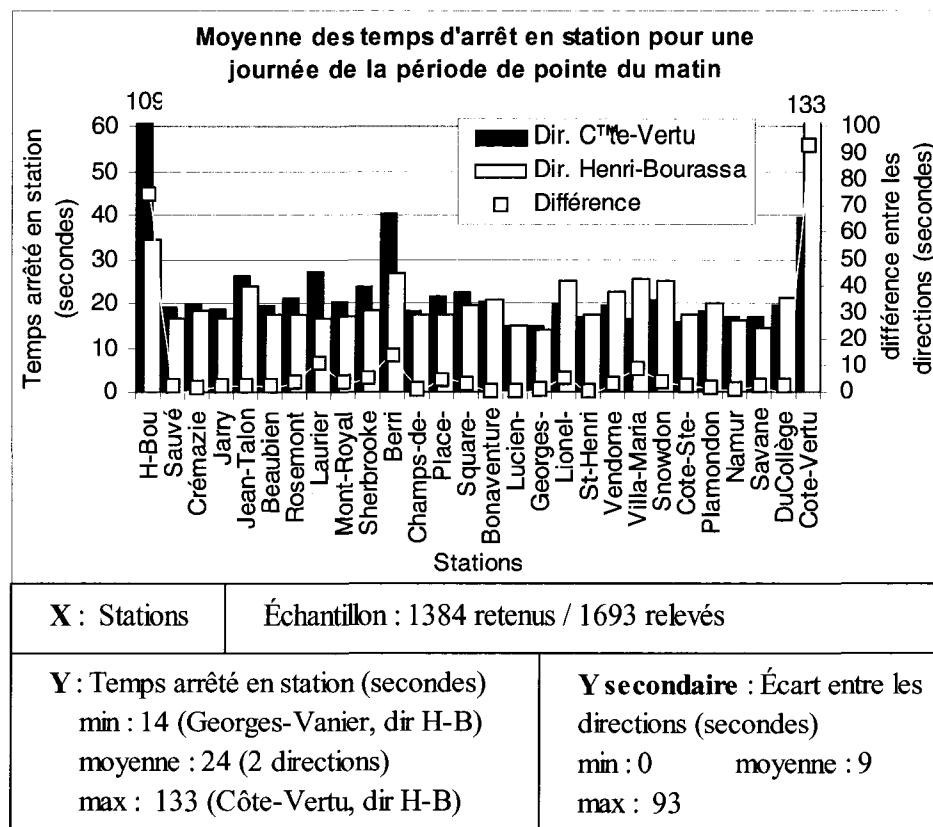


Figure 4-24 : Temps d'arrêt moyen en station pour la ligne 2.

Les temps d'arrêt en station des terminus de départ sont beaucoup plus longs que pour l'ensemble du réseau. Aussi, la station Berri-UQÀM, possède les temps d'arrêt moyen les plus longs de tout le réseau. Une représentation de l'ensemble des données disponibles pour le calcul des temps d'arrêt est illustrée à la figure 4-26. Alors que la figure 4-25 présente les temps d'arrêt en station pour la ligne 2, en direction de Côte-Vertu. Les stations terminus ont volontairement été retirées de la présentation puisque les longs temps d'attentes à ces stations empêchent une visualisation claire.

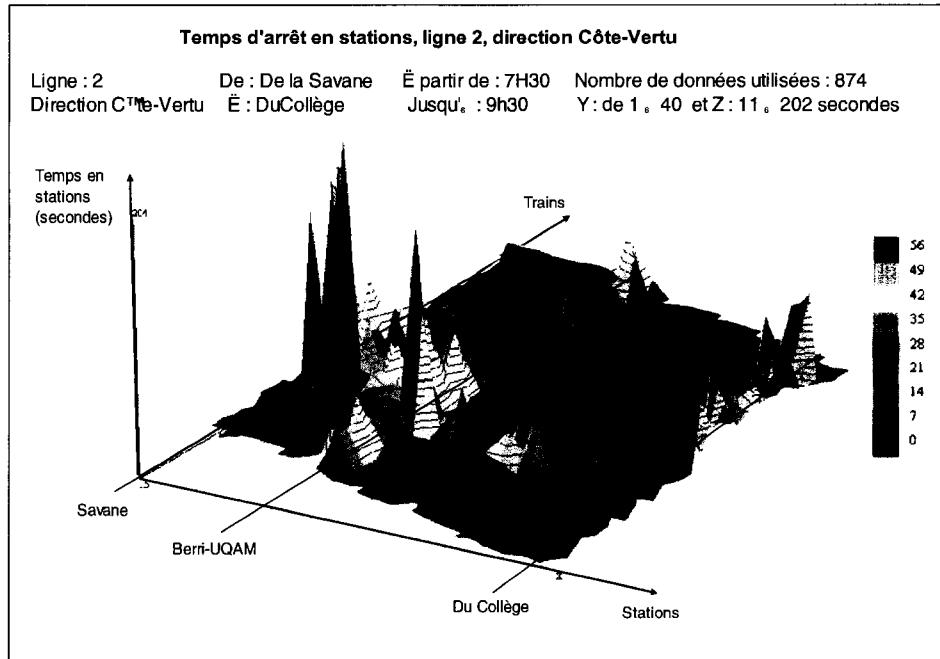


Figure 4-25 : Temps d'arrêt en stations pour la ligne 2, direction Côte-Vertu.

Dans ce cas-ci, de longs temps d'attente, supérieurs à la normal, sont clairement apparents (figure 4-25), contrairement au temps de parcours (figure 4-15), qui eux sont réguliers pour l'ensemble des trains. Effectivement, les temps d'arrêt aux stations sont utilisés afin de réguler les intervalles de service.

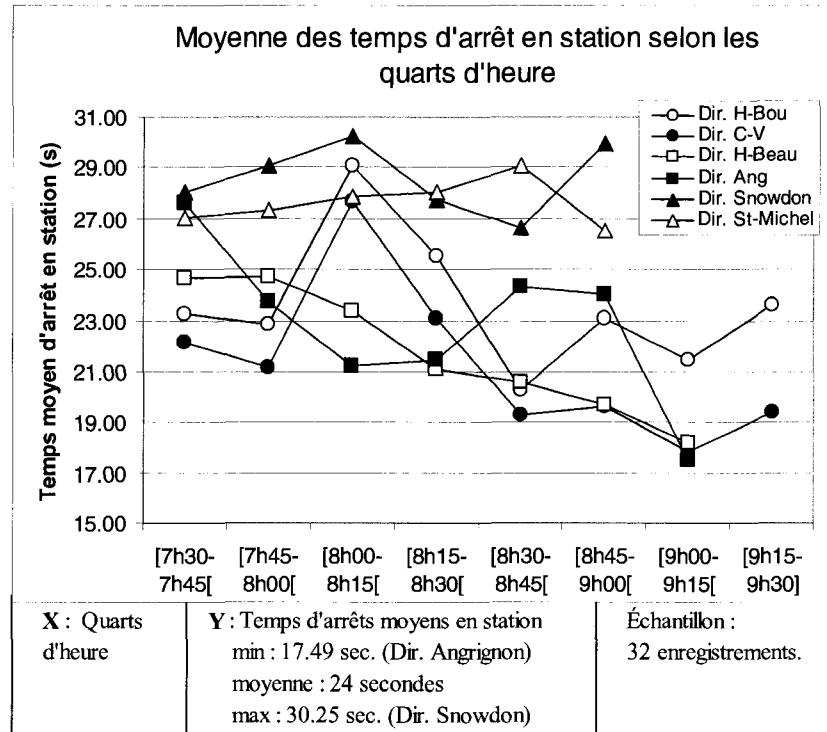


Figure 4-26 : Moyenne des temps d'arrêt aux stations selon les quarts d'heure pour l'ensemble du réseau.

4.5.2. Temps de retournement

Le graphique suivant (figure 4-27) présente l'ensemble des temps de retournement recueillis, ainsi que la moyenne, pour chacun des terminus.

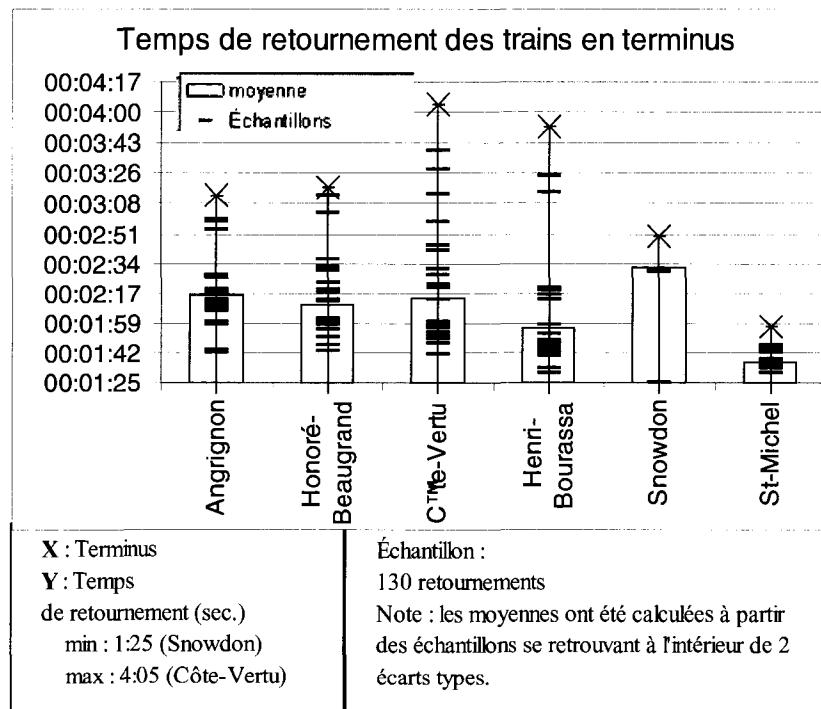


Figure 4-27 : Temps de retournement des trains aux terminus.

Pour la ligne 5, les temps de retournement de chacun des trains sont rapprochés et stables pour l'ensemble de l'heure de pointe du matin. Tandis que, pour les lignes 1 et 2, une grande variance entre chacun des retournements est visible. Il semble qu'il soit possible d'accélérer le temps de retournement afin de permettre le rattrapage d'un intervalle qui serait trop grand. Le temps le plus bas a été enregistré au terminus Snowdon, il est de 1 minute et 25 secondes.

4.6. Correspondance

Les stations de correspondance apportent aux usagers la possibilité de changer de ligne afin de leur permettre d'atteindre leur destination. Parmi les quatre stations de correspondance du métro de Montréal, la station Lionel-Groulx possède un aménagement particulier qui permet aux usagers de circuler facilement des trains de la ligne 1 aux trains de la ligne 2, comme l'illustre la figure 4-28.

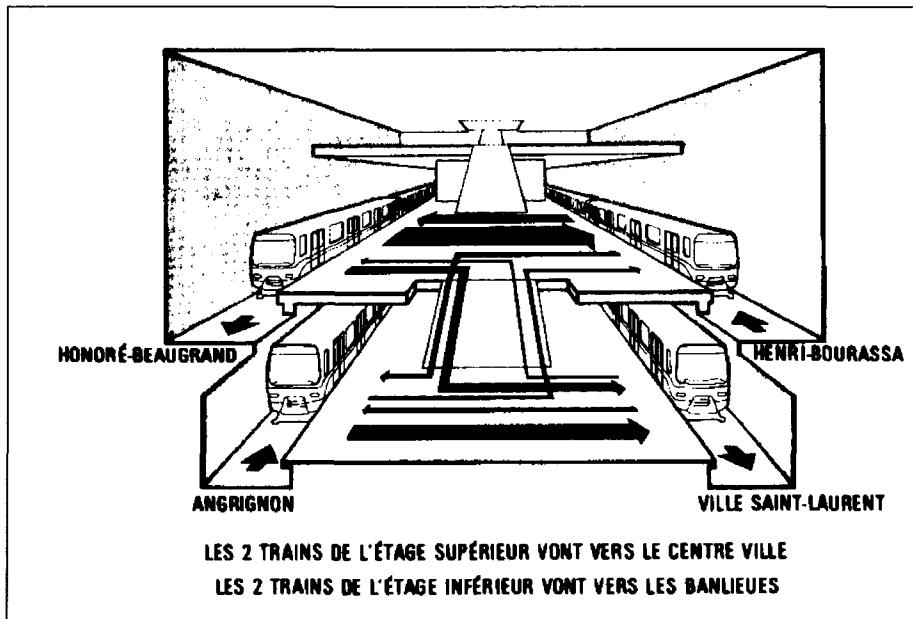


Figure 4-28 : Station de correspondance Lionel-Groulx.
Source : (Communauté urbaine de Montréal *et al.*, 1983)

Cet aménagement peut suggérer qu'une certaine synchronisation entre chacune des directions est offerte afin de faciliter davantage la correspondance des usagers. Le diagramme espace-temps peut être utilisé dans le but de visualiser l'arrivée des trains à cette station de correspondance pour ainsi déterminer si cette synchronisation existe. Aussi, cette même visualisation peut être faite grâce à l'utilisation d'un diagramme sur les temps d'arrivée et de départ des trains sur les quais de la station, comme présenté dans la figure 4-29.

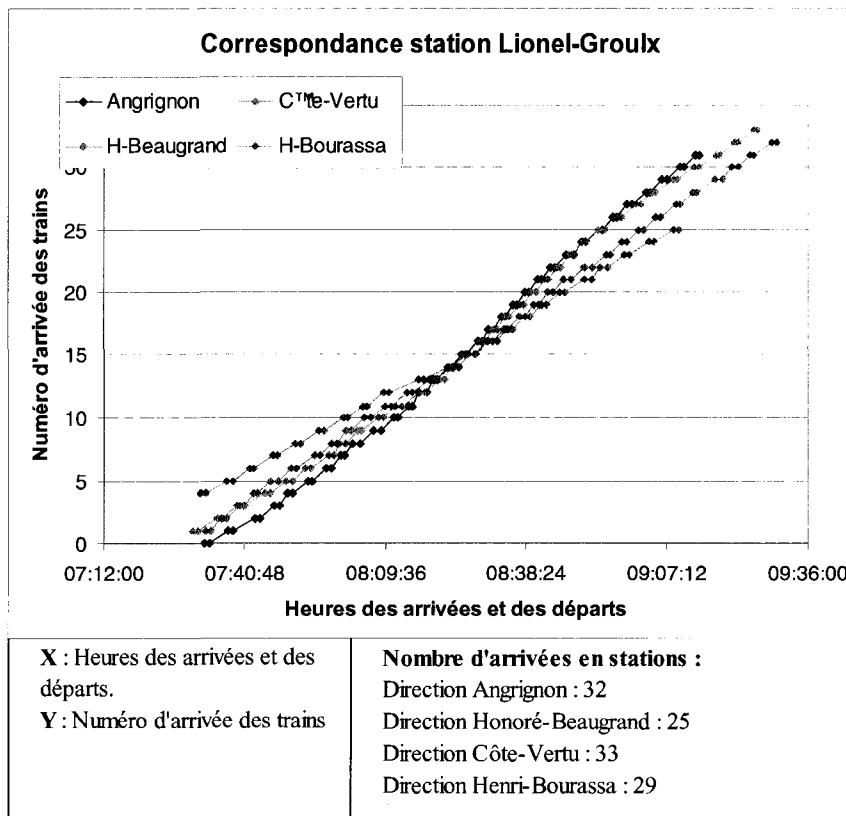


Figure 4-29 : Temps des arrivées et des départs des trains à la station Lionel-Groulx.

Afin d'améliorer la visualisation de la synchronisation des stations de correspondance, l'application des technologies VRML permet d'animer l'arrivée et le départ des trains selon les données réelles. En effet, la programmation VRML permet non seulement d'explorer des environnements en trois dimensions mais aussi d'y faire animer des objets. Donc, à partir d'une modélisation de la station Lionel-Groulx faite par le groupe de travail MADITUC de l'École Polytechnique, l'ajout des informations sur l'activation et la désactivation des cantons dans l'animation des trains permet de visualiser, selon le point de vue désiré, la synchronisation qui est faite. Un exemple de cette application est présenté à la figure 4-30.

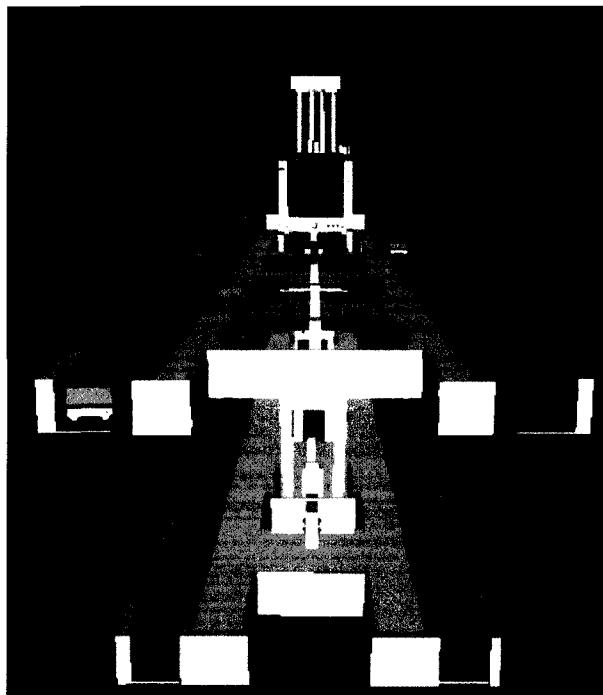


Figure 4-30 : Présentation animée VRML de la station Lionel-Groulx.

Source : Modélisation de la station effectuée par le Groupe MADITUC, École Polytechnique.

À la lumière de ces observations, il n'est pas possible de conclure à une synchronisation entre les trains à la station Lionel-Groulx. La faible quantité de données disponibles peut être en cause en ne permettant pas d'établir de cycles ou de régulations dans les arrivées et les départs des trains à cette station. Cependant, l'observation de la régulation des temps d'intervalles semble être un facteur et une motivation beaucoup plus déterminante dans les départs et les arrivées des trains que la synchronisation. En effet, l'étude des données démontre que les intervalles observés pour les quatre directions de la station Lionel-Groulx suivent les tendances étudiées par les moyennes du réseau. À titre d'exemple, la figure 4-31 superpose les intervalles observés selon les quarts d'heure pour la direction Côte-Vertu à la station Lionel-Groulx, sur les moyennes obtenues pour l'ensemble des stations dans cette même direction.

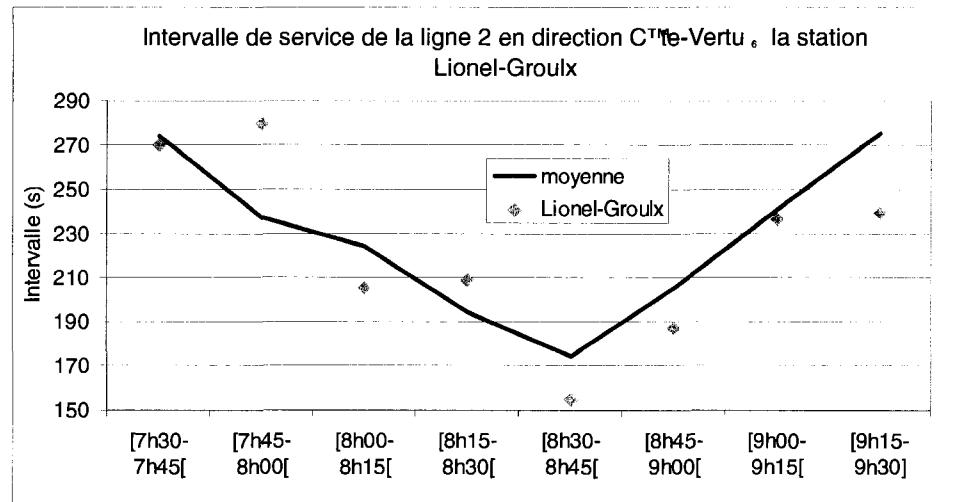


Figure 4-31 : Intervalles de la station Lionel-Groulx, direction Côte-Vertu.

4.7.Détection des incidents

Cette section, qui vient s'ajouter au chapitre quatre, présente une technique de détection des incidents et des retards du métro de Montréal à partir des données d'occupation de voie par cantons fixes de longueurs variables.

Selon un article paru dans le journal *La Presse* du 20 février 2001, il y a en moyenne deux interruptions de service de plus de cinq minutes par jour dans le réseau du métro de Montréal. De plus, selon Carl Desrosier, directeur exécutif de l'exploitation du métro de la STM :

« [...] [Dans le métro de Montréal] une panne de cinq minutes à l'heure de pointe touche autant de passagers que peuvent en contenir 10 avions Boeing 747 [...] »

*Extrait du journal *La Presse* vendredi 27 juin 2003*

De telles interruptions impliquent des retards pour les usagers qui peuvent se sentir lésés dans leurs attentes d'un service de qualité. Des techniques de détermination de la quantité d'usagers atteints par ces pannes sont élaborées par Chapleau (1997). La technique consiste à faire la dérivation des déplacements origine-destination, pour, par la suite dériver les entrants et les sortants de chacune des stations de métro, le tout, à partir d'une enquête origine-destination. Pour la période allant du 28 octobre au 7

décembre 1996, la STM (STCUM, à l'époque) a procédé à une enquête spéciale, avec distribution de formulaires de réclamation afin de mieux connaître et d'étudier le phénomène des retards. Ne serait-il pas possible d'utiliser les données d'occupation de voie disponibles afin de constater avec précision les retards sur le réseau ?

4.7.1. Effets sur les temps d'arrêt en station

Jusqu'à présent, dans ce mémoire, les caractéristiques dévoilées sur le réseau du métro de Montréal, ont révélé les tendances moyennes observées sans toutefois mettre à profit la gamme complète des données disponibles. En effet, les valeurs extrêmes ont toutes été retirées afin d'assurer le calcul de moyennes représentatives. Cependant, les valeurs extrêmes renferment des informations importantes relativement à l'efficacité du réseau. En plus de permettre la détection d'incidents, les valeurs extrêmes mettent en lumière les facteurs d'amélioration les plus importants sur le réseau. Effectivement, la récurrence de l'apparition de valeurs extrêmes sur certaines parties du réseau est un indicateur qu'un ou plusieurs problèmes font obstacle au bon fonctionnement du système. Puisque le nombre de données disponibles ne permet pas d'établir d'horaires, la détection d'incidents sur les retards, ou les avances, par rapport à un horaire est impossible. Cependant, l'analyse du diagramme espace-temps permet de constater, d'un simple coup d'œil, les anomalies de certains voyages. Le diagramme espace-temps de la figure 4-32 qui suit, illustre bien les particularités visuellement détectables pour les voyages de la ligne 2 en direction du terminus Côte-Vertu. Un long temps d'arrêt en station est détecté pour plusieurs trains qui se suivent.

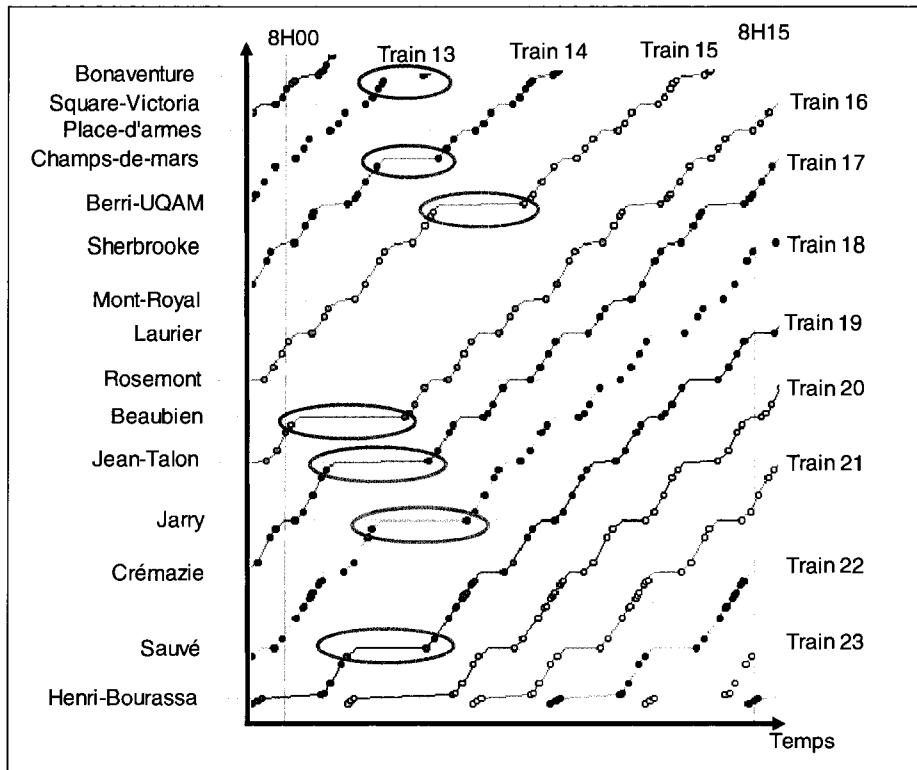


Figure 4-32 : Aperçu des retards sur le diagramme espace-temps de la ligne 2, direction Côte-Vertu.

Comme avec la quantité de données disponibles, aucun horaire ne peut être établi, il est donc nécessaire de déterminer une autre méthode de détection des retards. Des valeurs moyennes d'intervalles furent présentées au chapitre précédent, leur utilisation permet de comparer l'intervalle entre chacun des trains pour ainsi détecter les incidents. En effet, la régulation des intervalles assure un service efficace et stable pour l'ensemble des usagers. La conséquence d'une mauvaise régulation de l'intervalle des trains en heure de pointe peut amener à une surcharge d'un train, accroissant ainsi son flot d'usagers lors de ses arrêts en station et augmenter, du coup, le temps d'arrêt en station pour l'ensemble de la ligne. Ainsi, de fortes variations dans l'intervalle entre deux trains consécutifs pourraient mener à la détection d'incidents. Comme les temps de parcours de chacun des trains aux interstations sont réguliers, tel que démontré au chapitre précédent, c'est grâce aux temps d'arrêt en station et aux intervalles que les incidents seront déduits. Donc, la production du graphique des temps d'arrêt en station,

avec toutes les valeurs calculées, permet de constater que certaines d'entre elles sont bien en dehors de la moyenne (figure 4-33).

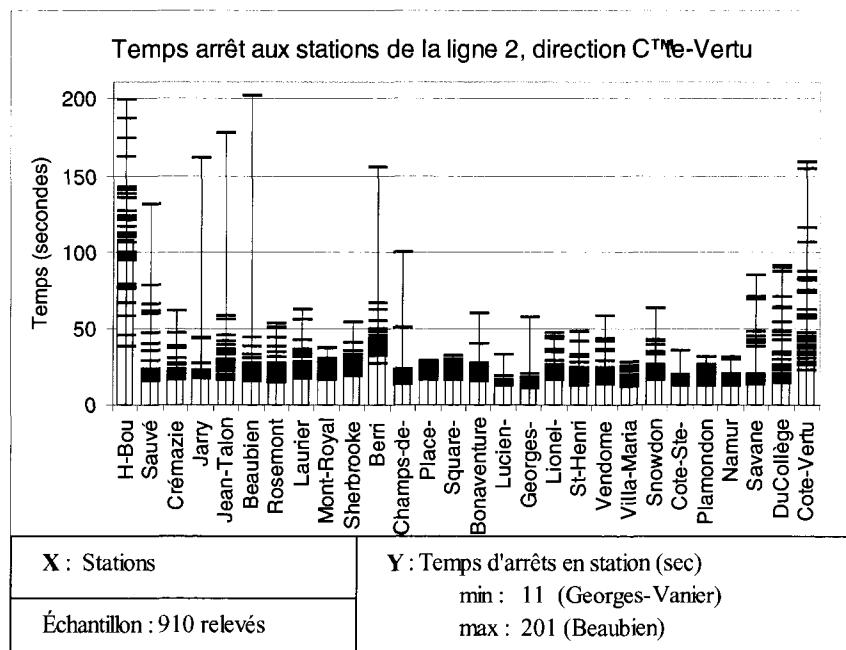


Figure 4-33 : Temps d'arrêt en station avec valeurs extrêmes, ligne 2 direction Côte-Vertu.

4.7.2. Effets sur les intervalles de service

De même, il est possible de constater des écarts identiques pour l'intervalle de service entre les trains en station. La figure 4-34 se concentre sur les trains auxquels sont associés les temps excessifs d'arrêt en station.

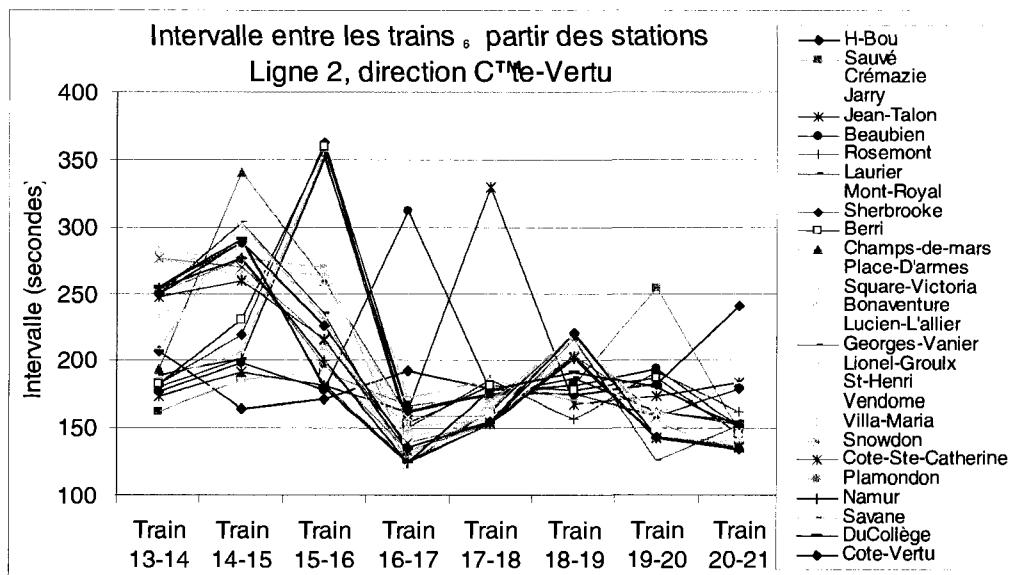


Figure 4-34 : Intervalle de service entre les trains 13 à 21, pour la ligne 2, direction Côte-Vertu.

La visualisation des intervalles en station permet de constater que l'intervalle est bien supérieur à la normale pour sept trains du réseau. Les temps des intervalles en station croissent proportionnellement aux temps d'arrêt en station. C'est pourquoi les excès de temps pour les mêmes trains sont visibles à l'intérieur des deux derniers graphiques. Donc, afin de retirer cet effet et de concentrer la visualisation de l'impact d'un incident en station sur l'intervalle, un calcul sur le temps de remplacement doit être produit. Le temps de remplacement est le temps entre le départ d'un train en station et l'arrivée du train suivant. Il se différencie donc de l'intervalle puisqu'il ne tient pas compte du temps passé en station. Le graphique suivant (figure 4-35) présente les résultats de ce nouveau calcul.

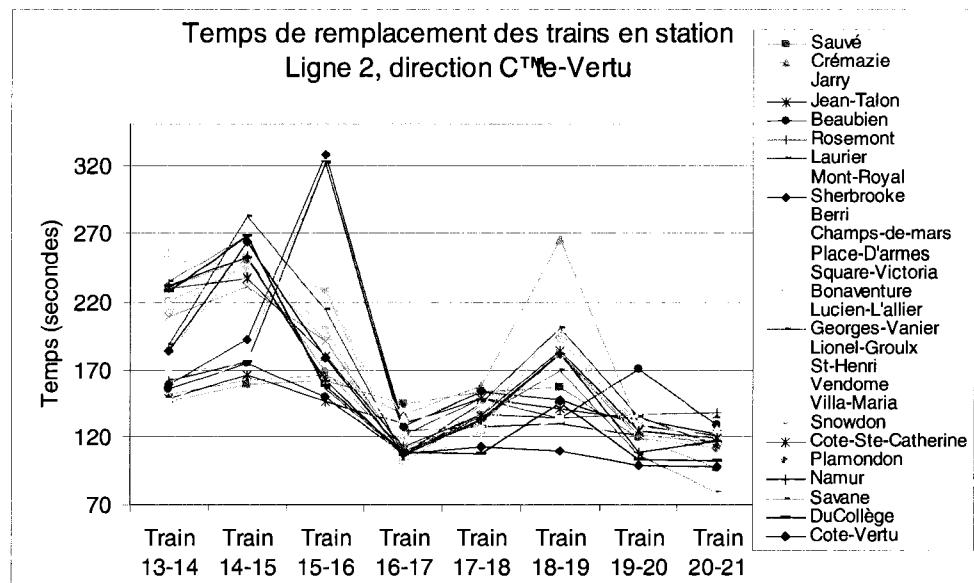


Figure 4-35 : Temps de remplacement des trains 13 à 21, pour la ligne 2, direction Côte-Vertu.

Un coup d’œil sur le diagramme espace-temps, de la figure 4-32, révèle que le 16^{ème} train a été le premier train à subir un retard dans le quart d’heure 8h00-8h15, à la station Beaubien. Effectivement, son temps d’arrêt est de 202 secondes (3:22) alors que la moyenne pour cette station est de 23 secondes. Comme les deux trains qui suivent (17 et 18) se retrouvent dans les stations en amont (figure 4-32), ceux-ci ne peuvent procéder et ils subissent donc, eux aussi, un retard sur leur départ (figure 4-33). Bien que le train 19 puisse procéder vers la station suivante, celui-ci entreprend tout de même un temps d’attente en station (figure 4-32). Cette attente résulte en une augmentation de l’intervalle avec le train 18 à la station Crémazie et oblige le train 20 à patienter à la station précédente (figure 4-35). Cependant, comme le train 18 retarde son départ en attendant que la station suivante se libère, une petite prolongation du temps d’attente permet de rétablir l’intervalle avec le train 19 pour l’ensemble de la ligne (figure 4-35). Aussi, comme le démontre la figure précédente, le train 16 se fait distancer par le train 15 aux stations Laurier, Mont-Royal et Sherbrooke. Afin de pallier ce problème, les trains 14 et 15 effectuent une pause en station, permettant ainsi de reprendre un temps d’intervalle régulier pour le reste du parcours de la ligne. De plus, la visualisation du diagramme vitesse-temps permet de constater qu’il n’y a pas

d'accélération ou de marche au ralenti entre les stations afin de régulariser les intervalles. En effet, la figure 4-36 présente ce diagramme pour le train 16, qui a été le premier train retardé et il est possible de constater que sa vitesse, par la suite, atteint toutes les consignes de vitesse maximale permise.

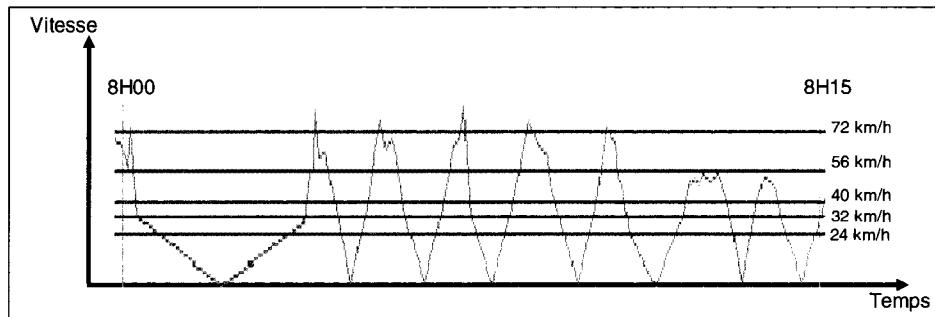


Figure 4-36 : Diagramme vitesse-temps du train 16 de ligne 2, direction Côte-Vertu.

Finalement, un incident en station, de moins de cinq minutes, sur un seul train, fait ressentir son impact sur environ sept trains présents sur la même ligne. Le nombre exact de trains touchés par un retard est difficilement détectable puisque la temporisation en station, afin de retrouver l'intervalle requis, peut se jouer sur quelques secondes. La quantité de données utilisées ne permet pas ici d'obtenir une moyenne de temps d'arrêt suffisamment précise afin de détecter les temps de temporisation. De plus, plusieurs facteurs peuvent influencer le flot des usagers et retarder le départ d'un train de quelques secondes et dans ce cas, ce retard ne constitue pas nécessairement une temporisation de régulation de l'intervalle ou un incident.

4.7.3. Régulation suite à un incident

Suite à cette démonstration, il est clair que la régulation de l'intervalle passe par une pause en station plutôt qu'une pause en interstation. Le temps de parcours aux interstations étant déjà optimisé, le ratrappage ne peut se faire que par la mise en attente forcée des trains de tête en station. La meilleure méthode afin de détecter des incidents consiste à s'attaquer aux valeurs extrêmes des temps d'attente en station et de faire correspondre ces valeurs avec les temps de remplacement des trains. La figure 4-37 présente les temps de remplacement en station pour l'ensemble de la ligne 2, en

direction du terminus Côte-Vertu. Plusieurs valeurs en dehors de la moyenne peuvent ainsi être rapidement visualisées.

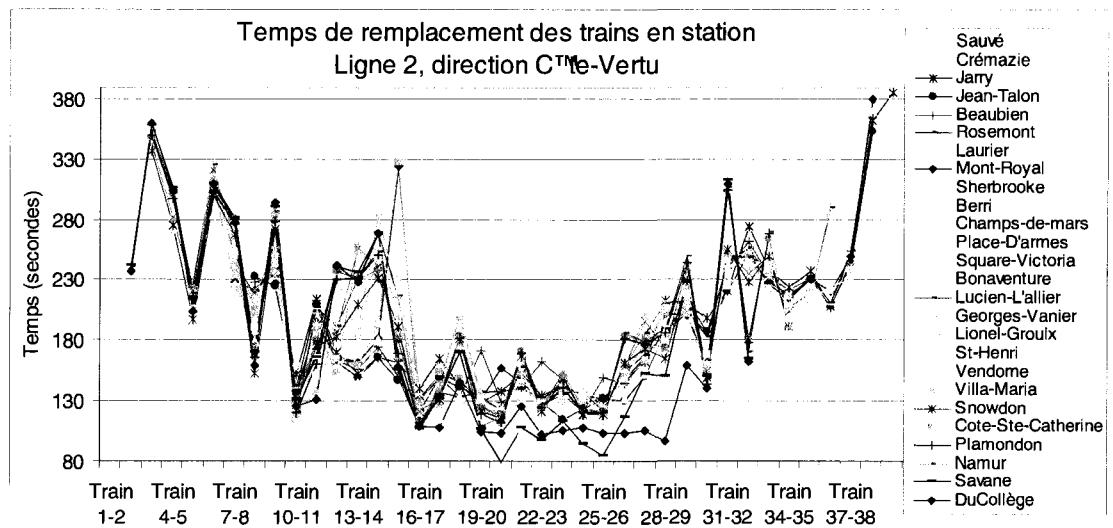


Figure 4-37 : Temps de remplacement des trains de la ligne 2, direction Côte-Vertu.

4.8. Conclusion

En conclusion à ce chapitre, la caractérisation du métro de Montréal par la démonstration de différents indicateurs de performance ont permis d’apprécier le service offert par la STM aux usagers lors d’une heure de pointe du matin. Cependant, cette caractérisation s’établit à partir de valeurs moyennes en retirant de celles-ci les valeurs jugées trop à l’écart. Bien que ces valeurs soient écartées, elles doivent néanmoins être conservées pour d’autres analyses plus détaillées. En effet, l’existence de ces données renseigne sur les défauts de fonctionnement et identifie les principaux points sensibles aux perturbations.

Les sections présentées jusqu’ici ont exhibé les méthodes de traitement des données d’occupation de voie du métro de Montréal. Elles ont aussi démontré les différents indicateurs de performance pouvant être extraits de ces données. Des techniques de visualisation du mouvement, dans le temps et dans l’espace, des trains ont aussi été explorées afin de permettre de présenter les résultats obtenus à partir des données

d'occupation. Finalement, un moyen de détection des incidents des trains à partir de ces données a été élaboré.

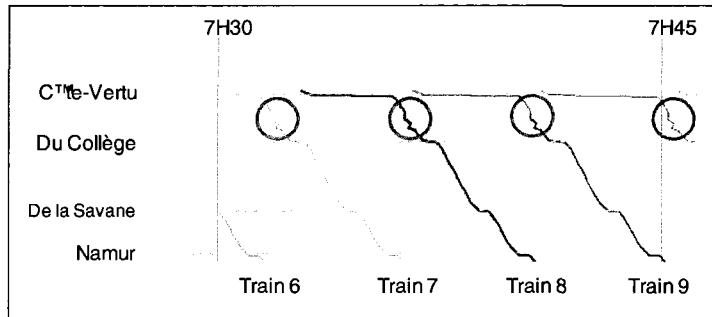
Le prochain chapitre propose une discussion sur les résultats obtenus et les méthodes utilisées. Il offre des pistes de solutions pour d'éventuelles manipulations sur de grandes quantités de données opérationnelles. Puis, il conclut ce mémoire par un retour sur les objectifs, les innovations apportées par cette recherche et les perspectives futures.

DISCUSSION ET CONCLUSION

Le but de ce mémoire était d'identifier les différents indicateurs de performance pouvant être extraits des données d'occupation provenant du métro de Montréal dont la voie est découpée en cantons fixes de longueur variable. Cette recherche a réussi à atteindre cet objectif et à démontrer qu'il est possible de caractériser une partie de l'offre de transport d'un réseau ferroviaire ou de métro au travers divers indicateurs. Ce chapitre débute par une discussion sur la surestimation de la longueur des trains qui peut être une cause potentielle d'erreurs dans l'établissement des résultats. Par la suite, quelques recommandations sont prodiguées dans le cas où un travail de nature semblable à cette recherche serait entrepris. Puis, un retour sur les objectifs, les innovations apportées et les perspectives futures de cette recherche concluent ce mémoire.

Discussion sur la surestimation de la longueur des trains

Lors de la rédaction de ce mémoire et des manipulations nécessaires à sa réalisation, il a été découvert que la longueur des trains ne correspond pas à la longueur physique totale de ceux-ci. En effet, les données ne sont pas capturées sur le début et la fin des 152,4 mètres du train. Une visualisation attentive du diagramme espace-temps permet de réaliser que les trains n'activent les bornes des cantons qu'à partir de 147 mètres. Effectivement, il est possible de constater que les données effectuent un bref retour dans le temps dans le diagramme espace-temps pour les petits cantons, tel que présenté dans les encerclés de la figure suivante.

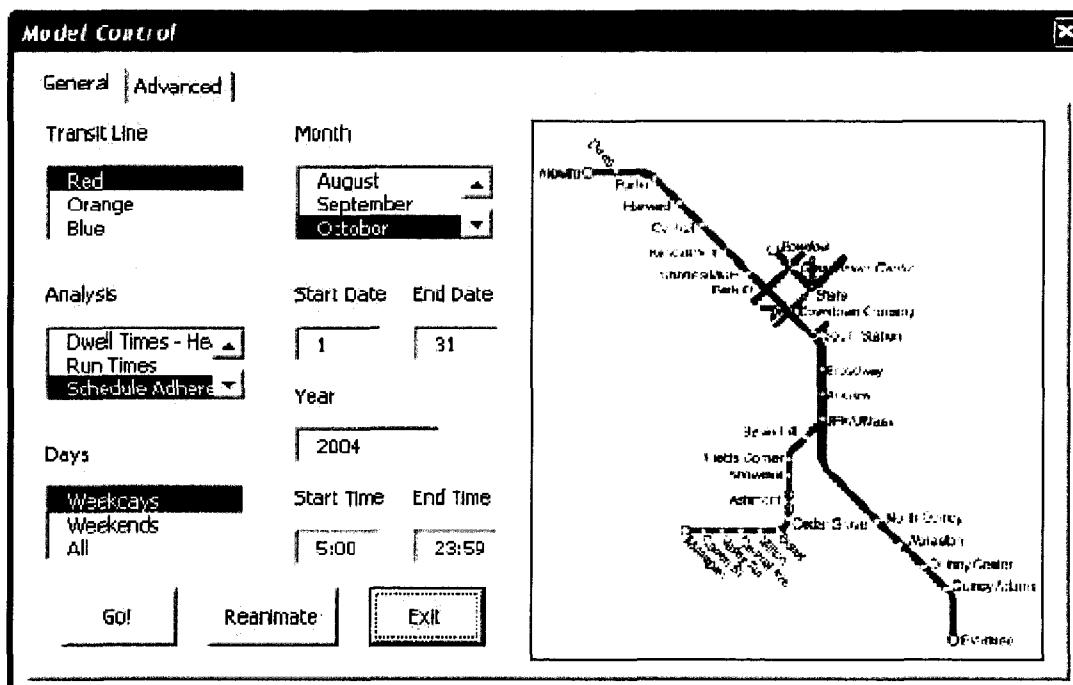


Ce retour dans le temps est attribuable à la longueur excessive allouée aux trains. Ainsi, en accordant une longueur de 147 mètres aux trains de trois éléments et de 96 mètres aux trains de deux éléments, cette erreur se corrige. De plus, ces longueurs concordent exactement à la distance séparant le milieu du premier bogie du wagon de tête au milieu du dernier bogie du wagon de queue et donc, à l'emplacement exact où sont situés les patins qui font contact avec le rail de fer. Cette longueur correspond à la longueur particulière du canton de station de Berri-UQÀM, dans la direction Angrignon, qui est de 147 mètres.

Les conséquences d'une telle découverte affectent surtout les calculs de vitesse sur l'entrée des cantons et les temps d'arrêt en station. Les vitesses ont été sous-estimées, alors que les temps d'arrêt en station ont été surévalués.

Discussion sur la répétitivité des expérimentations

Dans la perspective où un nouvel ensemble de données serait disponible, il est important d'assurer une répétitivité dans les démarches et la démonstration des indicateurs de performance. Pour ce faire, l'emploi de routines informatisées est fortement suggéré. Un exemple de l'interface de ces routines est présenté à la figure suivante.



Source : (Dixon *et al.*, 2006).

Ces routines doivent s'exécuter sur une base de données contenant toutes les informations d'origine, bonifiées de leurs caractéristiques physiques fixes, sans en modifier le contenu. Les résultats qui émergent de ces routines devraient se retrouver dans une base de données secondaire pour ainsi éviter de modifier les données originales. Il est très important de bien structurer la base de données originale afin que les opérations sur celle-ci soient faciles et rapidement exécutables. Aussi, l'utilisation de la nomenclature des stations et des interstations utilisée par la STM (annexe F) permettrait de garder une référence claire sans créer de nouveaux noms qui peuvent être suggestifs ou non représentatifs. Le plus difficile dans la bonification de la base de données originale est l'ajout des numéros de trains sur chacun des événements et de réussir à conserver ce numéro, même à la suite des retournements des véhicules.

Retour sur les objectifs

Une méthodologie d'analyse et de traitement de données a permis de caractériser l'offre du métro de Montréal par le biais d'indicateurs de performance spatiotemporelle. La caractérisation de l'offre d'un moyen de transport en commun,

comme le métro, passe par l'analyse de plusieurs mesures de performance opérationnelle du service offert. Ainsi, au travers de ce document, des techniques de mesure sur la composition physique des infrastructures du métro de Montréal furent établies pour, par la suite, spécifier l'application de chacune de ces mesures de performance afin de procéder à des opérations sur les données disponibles. Cela a permis de dévoiler l'offre de service offert et, à terme, atteindre l'identification des incidents d'opération.

Pour le métro de Montréal, les informations sur la position des trains proviennent de cantons fixes de longueur variable qui découpent l'ensemble des voies du réseau. Cette technologie couplée à un pilote automatique permet de faire l'enregistrement de l'heure exacte, à la seconde, à laquelle un train occupe et libère un canton. Ce type d'enregistrement seul oblige l'élaboration de techniques afin de dériver approximativement les indicateurs de performance du réseau. C'est donc en étudiant la structure des cantons sur les voies et les notions fondamentales de la dynamique des trains que les différents indicateurs de performance permettant de caractériser l'offre de service du métro de Montréal ont pu être élaborés. Ainsi, plusieurs méthodes et techniques existent afin de raffiner les calculs de vitesses et de temps en stations des trains.

L'application de ces concepts et leur mise à l'épreuve par des données réelles recueillies en heure de pointe du matin ont permis de démontrer leur validité. Cependant, leur conformité ne peut être établie que par des manipulations informatiques automatisées et par l'application de règles de visualisation dans un SIG. Il a pu être démontré que les profils de vitesses et les temps de parcours aux interstations, pour l'ensemble du réseau, sont constants. Aussi, ce sont les temps d'arrêt en stations qui permettent aux planificateurs de réguler les intervalles de service en retardant les départs.

Innovations

Sachant que ce sont les temps d'arrêt en stations qui permettent aux planificateurs de réguler les intervalles de service en retardant les départs, il est possible de connaître les répercussions d'un incident ou d'un retard de départ sur l'ensemble des trains présents sur la ligne et les effets de ces incidents sur la qualité du service offert aux voyageurs. Pour un métro, c'est le respect des intervalles qui régit les départs en stations des trains puisqu'il ne possède aucun horaire. Donc, si un train est retardé par un certain type d'incident qui ne lui permet pas de repartir de la station de façon normale, la répercussion se fera sentir sur les trains qui le précédent et sur ceux qui le suivent. En effet, un train qui tarde son départ d'une station verra l'intervalle augmenter entre lui et le train précédent. Ainsi, dans le but de conserver un intervalle régulier, le train de devant doit, lui aussi, faire une pause en station.

L'ensemble des expérimentations sur les données disponibles a permis de déterminer que le quart d'heure 8 h 30 – 8 h 45 est le plus avantageux, du point de vue de l'usager. C'est pendant cette période qu'il peut optimiser son temps de déplacement sur le réseau du métro de Montréal en heure de pointe du matin. Du côté des exploitants, ces indicateurs de performance apportent plusieurs informations essentielles relatives à la fiabilité du service. Des indicateurs tels que les temps d'arrêt en station et l'intervalle permettent de percevoir la régularité du service. De plus, ces informations s'ajoutent à celles déjà connues, afin d'améliorer la planification du service offert. Il n'est pas impossible d'imaginer l'utilisation de telles données dans un contexte de temps réel. Une telle utilisation permettrait aux planificateurs de détecter des retards, des incidents ou des problèmes sur les quais avant même que l'opérateur ait à les signaler. Pour des métros sans opérateur, ce type de technologie peut s'avérer utile.

Perspectives pour des travaux futurs

L'apport de données supplémentaires permettrait d'ajouter de la profondeur dans l'analyse des phénomènes apparents sur le réseau. En effet, des tendances sur plusieurs mois permettraient d'établir des modèles et de découvrir l'apparition de problèmes

récurrents à améliorer. L'automatisation totale des manipulations sur les données serait un atout précieux pour l'analyse d'une très grande quantité d'information.

Finalement, l'apparition prochaine des systèmes de perception par cartes à puce permettra de mesurer la demande exacte et de l'associer à l'offre de service. Cette avenue pourrait dévoiler plusieurs indicateurs de performance à l'égard des usagers. Bien sûr, la combinaison des données d'occupation de voie avec des données de cartes à puce pourrait apporter un haut niveau d'information sur la régularité de la demande et les habitudes comportementales des utilisateurs du métro comme pour le cas des autobus de la société de transport de l'Outaouais (Tranchant, 2005). Cependant, comme les tourniquets sont situés à l'entrée des stations et que, par la suite, l'usager choisit sa direction et son quai, parfois jusqu'à six pour la station Berri-UQAM, un algorithme de détection des habitudes des usagers est nécessaire. Ainsi, la combinaison de ces données aux relevés d'occupation de voie permettrait d'estimer à l'intérieur de quel train l'usager se déplace. Mais, pour ce faire, une codification tridimensionnelle des stations doit être envisagée afin de connaître avec précision les temps d'accès aux quais. L'apport de toutes ces nouvelles données apportera beaucoup d'informations aux sociétés de transport et permettra aux planificateurs de mieux identifier les manques au réseau et d'améliorer le service offert. Le défi des sociétés de transport sera de réussir à capter, archiver, corriger et visualiser les données spatiotemporelles disponibles de façon à caractériser correctement leur réseau.

RÉFÉRENCES

- ALLAIRE, M., LANTEIGNE, L., PAQUETTES, G. (1994). Optimisation de la consommation énergétique des rames de métro de la STCUM, 38 pages.
- ALTERKAWI, M. M. (2006). A computer simulation analysis for optimizing bus stops spacing: The case of Riyadh, Saudi Arabia. *Habitat International*, volume 30(3), pages 500-508.
- AMT. (2003). Portrait des transports collectifs dans la région métropolitaine de Montréal. Montréal : Agence Métropolitaine de Transport. 76 pages.
- ANONYME. (2001). Normal distribution. *Wikipedia The Free Encyclopedia*. Consulté le 5 mai 2007, tiré de http://en.wikipedia.org/wiki/Normal_distribution.
- ANONYME. (2002). Montreal Metro. *Wikipedia The Free Encyclopedia*. Consulté le 30 janvier 2007, tiré de http://en.wikipedia.org/wiki/Montreal_Metro.
- ANONYME. (2006). Communauté urbaine de Montréal. *Wikipédia L'encyclopédie Libre*. Consulté le 19 décembre 2006, tiré de http://fr.wikipedia.org/wiki/Communaut%C3%A9_urbaine_de_Montr%C3%A9al.
- AUBERT, D., BOUCHAFA, S. (1999). Détection de stationnarités anormales dans les couloirs du métro. *Recherche transports sécurité*, volume 62, pages 56-70.
- BEAUQUIER, S. (2004). Quand l'orientation client vide le travail de son sens. Le cas de la ligne 14 du métro Parisien. *Recherche transports sécurité*, volume 84, pages 189-202.

BLAIN, G., GASTON, J., COMMUNAUTÉ URBAINE DE MONTRÉAL, BUREAU DE TRANSPORT MÉTROPOLITAIN, COMITÉ-INTERSERVICES DU MÉTRO. (1976). *Le Métro de Montréal*. Montréal : Communauté urbaine de Montréal, Bureau de transport métropolitain.

CATHEY, F. W., DAILEY, D. J. (2003). A prescription for transit arrival/departure prediction using automatic vehicle location data. 24 pages.

CENTRE D'HISTOIRE DE MONTRÉAL. (2006). Histoire sur le métro de Montréal. Consulté le 25 novembre 2006, tiré de http://ville.montreal.qc.ca/portal/page?_dad=portal&_pageid=2497,3090381&_schema=PORTAL.

CHAPLEAU, R. (1992). Profil socio-économico-démographique du métro de Montréal: anatomie de la ville dans le voisinage du métro. *27ème congrès annuel de l'Association Québécoise du Transport et des Routes, Sherbrooke* (pp. 326-348).

CHAPLEAU, R. (1994). Les pieds, les pauvres et le métro. *Routes et Transports, volume 24(1)*, pages 35-46.

CHAPLEAU, R. (1997). Pannes du métro et ses clients-victimes : un essai de mesure avec les données d'enquêtes origine-destination. *32ème congrès annuel de l'Association Québécoise du Transport et des Routes, Trois-Rivières* (pp. 426-441).

CHAPLEAU, R. (2001). *Systèmes de transport : notes de cours et exercices : cours CIV3601* : École polytechnique de Montréal. Département des génies civil géologique et des mines.

CHAPLEAU, R., PICHÉ, D., CHAPLEAU, M.-A. (2003). Les stations de métro en réalité virtuelle : une autre technologie d'information pour l'usager du transport en commun. *38e Congrès Annuel de l'Association québécoise du transport et des routes.*, Sherbrooke, QC, Canada.

CHARTRAND, G. (1991). Les 25 ans du métro de Montréal. Journal *LaPresse*, 19 mars, pages B3.

COMMUNAUTÉ URBAINE DE MONTRÉAL, BUREAU DE TRANSPORT MÉTROPOLITAIN. (1983). *Le Métro de Montréal*. Montréal : Bureau de transport métropolitain.

CONNOR, P. (1998). Railway Technical Web Pages. Consulté le 20 février 2007, tiré de <http://www.railway-technical.com/index.html>.

COZENS, P., NEALE, R., WHITAKER, J., HILLIER, D. (2003). Investigating personal safety at railway stations using “virtual reality” technology. *Facilities, volume 21(7/8)*, pages 188 - 194.

DEMERY, LEROY W. Jr. (1994). Supply-Side Analysis and Verification of Ridership Forecasts for Mass Transit. *Journal of Americain Planing Association, Capital Projects*, pages 355-371

DIXON, M., KOUTSOPoulos, H. N., RAHBEE, A., WILSON, N. H. M. (2006). *Analysis of rail transit operations with rail track circuit occupancy data*. Boston: Northeastern University.

ENOCH, M., POTTER, S., PARKHURST, G., SMITH, M. (2004). *INTERMODE: Innovations in Demand Responsive Transport*: Department for Transport and Greater Manchester Passenger Transport Executive.

FHWA. (1998). *Travel Time Data Collection Handbook* (FHWA-PL-98-035). Washington: Federal Highway Administration.

FURTH, P. G. (2006). *Using archived AVL-APC data to improve transit performance and management*.TCRP report (Transit Cooperative Research Program) ; Rapport no.113

GREENFELD, J. (2000). Automatic vehicle location (AVL) for transit operation. (Vol. 2, pp. 656-659 vol.652).

HENSHER, D. A. (2007). Sustainable public transport systems: Moving towards a value for money and network-based approach and away from blind commitment. *Transport Policy*, volume 14(1), pages 98-102.

HORBURY, A. X. (1999). Using non-real-time Automatic Vehicle Location data to improve bus services. *Tramsportation research part B* 33. Pages 559- 579.

JAIN, J., LYONS, G. (2007). The gift of travel time. *Journal of Transport Geography*, volume In Press, Corrected Proof, 9 pages.

KAUFMANN, V. (2002). Temps et pratiques modales. Le plus court est-il le mieux ? The rationality of perception and modal choice. Is quickest best? *Recherche - Transports - Sécurité*, volume 75, pages 131-143.

KHISTY, C. J., LALL, K. (1998). *Transportation engineering : an introduction* (2^e éd.). Upper Saddle River, N.J. : Prentice Hall.

KITTELSON AND ASSOCIATES. (1999). Transit capacity and quality of service manual, 2nd Edition. *TCRP Web Document (Transit Cooperative Research Program)* ; *Document no.6.* Consulté le 16 mai 2007, tiré de http://www.trb.org/news/blurb_detail.asp?id=2326.

- KITTELSON AND ASSOCIATES. (2003). *A guidebook for developing a transit performance-measurement system*.TCRP report (Transit Cooperative Research Program) ; Rapport no. 88. 368 pages.
- KUBRAK, D. (2007). Ph. D. Thèse, *Étude de l'hybridation d'un récepteur GPS avec des capteurs bas coûts pour la navigation personnelle en milieu urbain.*, École Nationale Supérieure des Télécommunications, France.
- LI, J. P. (2000). Train station passenger flow study. *Proceedings of 2000 Winter Simulation Conference, Orlando, FL, USA*. Pages 1173-1176.
- Li, K., GAO, Z. (2007). An improved equation model for the train movement. *Simulation Modelling Practice and Theory, volume 15(9)*, pages 1156-1162.
- MANHEIM, M. L. (1979). *Fundamentals of transportation systems analysis*. Cambridge, Mass.: MIT Press.MIT Press series in transportation studies.
- MARSDEN, A. W. (1998). Training railway operating staff to understand and manage passenger and crowd behaviour. *Industrial and Commercial Training, volume 30(5)*, pages 171-175.
- MCSHANE, W. R., ROESS, R. P. (1990). *Traffic engineering*. Englewood Cliffs, New Jersey : Prentice-Hall.Prentice Hall polytechnic series in transportation.
- MÉTROPOLE. (2006). Le Contrôle de Vitesse par Balises (KVB). Consulté le 15 novembre 2006, tiré de <http://www.metro-pole.net/expl/signal/kvb.html>.
- MEYER, M. D., MILLER, E. J. (1984). *Urban transportation planning : a decision-oriented approach*. New York : McGraw-Hill.McGraw-Hill series in transportation.

- MILLER, H. J. (1999). Potential contributions of spatial analysis to geographic information systems for transportation (GIS-T). *Geographical Analysis, volume 31*, pages 373-399.
- MILLER, H. J. (2004). Activities in space and time. In D. Hensher, P. Stopher, K. Button & K. Haynes (éds.), *Handbook of Transport 5: Transport Geography and Spatial Systems* (pp. 647-658): Pergamon/Elsevier Science.
- MINTSIS, G., BASBAS, S., PAPAIOANNOU, P., TAXILTARIS, C., TZIAVOS, I. N. (2004). Applications of GPS technology in the land transportation system. *European Journal of Operational Research, volume 152*(2), pages 399-409.
- MORLOK, E. K. (1978). *Introduction to transportation engineering and planning*. New York : McGraw-Hill
- OKUNIEFF, P. E. (1997). *AVL systems for bus transit*.TCRP synthesis (Transit Cooperative Research Program) ; Rapport no. 24. 41 pages.
- PARKINSON, T., FISHER, I. (1996). *Rail transit capacity*.TCRP report (Transit Cooperative Research Program) ; Rapport no. 13. 178 pages.
- PEARSON, L. V. (1973). Ph.D. Thèse, *Moving block signalling*. Loughborough University of Technology, R-U.
- QUDDUS, M., OCHIENG, W., ZHAO, L., NOLAND, R. (2003). A general map matching algorithm for transport telematics applications. *GPS Solutions, volume 7*(3), pages 157-167.
- RESSOURCES NATURELLES CANADA. (2006). Généralisation de réseaux routiers. Consulté le 22 mai 2007, tiré de http://ccrs.nrcan.gc.ca/radar/map/genrn_f.php.

- ROBERTSON, H. D., HUMMER, J. E., NELSON, D. C., Institut des ingénieurs des transports. (1994). *Manual of transportation engineering studies*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall
- SARAKINIS, L. (2006). Mémoire de maîtrise, *Simulation détaillée du comportement des voyageurs dans le métro de Montréal.*, Génies civil, géologique et des mines, École Polytechniques de Montréal.
- STM. (2001). *Rapport annuel*. Consulté le 13 février 2007, tiré de <http://www.stm.info/en-bref/annuel01.htm>
- STM. (2002a). La STM aujourd’hui. Consulté le 5 février 2007, tiré de <http://www.stcum.qc.ca/en-bref/fiches-c.htm>
- STM. (2002b). Le métro de Montréal, notre fierté. Consulté le 12 février 2007, tiré de <http://www.stcum.qc.ca/en-bref/notrefierte.htm>
- STM. (2002c). Le métro sur pneumatiques. *Journal Métro*, 04-06 octobre 2002, p. 9.
- STM. (2006). La STM en bref. *Saviez-vous que...?* Consulté le 25 novembre 2006, tiré de <http://www.stm.info/en-bref/faq3.htm#metro>.
- TAKEUCHI, H., GOODMAN, C. J., SONE, S. (2003). Moving block signalling dynamics: performance measures and re-starting queued electric trains. *Electric Power Applications, IEE Proceedings -*, volume 150(4), pages 483-492.
- TEAGUE, O. E., CASE, C. P., DADDARIO, E. Q. (1976). *Automatic train control in rail rapid transit*: United States Congress. 238 pages.
- THEVENIN, T. (2001). Application à l'analyse des générateurs de déplacements à l'échelle urbaine. *Ve rencontre de Théo Quant*.

- TRANCHANT, N. (2005). Mémoire de maîtrise, *Modèle de dérivation des déplacements en transport collectif à partir de données de cartes à puce*. Génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal.
- TREMBLAY, P., OUIMET, M. (2001). Trajets urbains et risques de victimisation : les sites de transit et le cas du métro de Montréal. *Criminologie, volume 34(1)*, pages 157-176.
- TREPANIER, M., CHAPLEAU, R. (2003). Transit user information website: The birth of a new planning tool. *Canadian Society for Civil Engineering, Moncton, NB, Canada* (Vol. 2003, pp. 1652-1660) Canadian Society for Civil Engineering, Montreal, H3H 2R9, Canada.
- TRÉPANIER, M., CHAPLEAU, R., TRANCHANT, N. (2005). Cartes à puces en transport en commun : une exploitation informationnelle pour fins de planification. *40ième congrès de l'Association Québécoise du Transport et des Routes, Laval*.
- VOYER, É. (2006). Mémoire de maîtrise, *Le benchmarking; expérimentations appliquées à l'étude du transport urbain à Montréal*. Génies civil, géologique et des mines, École Polytechnique de Montréal.
- VUCHIC, V. R. (1981). *Urban public transportation : systems and technology*. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall.
- VUCHIC, V. R. (2005). *Urban transit : operations, planning and economics*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.
- VUCHIC, V. R. (2007). *Urban transit : systems and technology*. Hoboken, N.J.: John Wiley & Sons.

WARDMAN, M., BRISTOW, A. L. (2004). Traffic related noise and air quality valuations: evidence from stated preference residential choice models. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, volume 9(1), pages 1-27.

WARDROP, J. G. (1952). *Some Theoretical Aspects of Road Traffic Research* (Vol. 1). London, Great Britain, Institute of Civil Engineers.Road Engineering Division Meeting.

WIGGENRAAD, P. B. L. (2001). Alighting and boarding times of passengers at Dutch railway stations. *Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology*.

ZITO, R., D'ESTE, G., 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*, volume 3(4), pages 193-209.

ANNEXE A – DIAGRAMMES ESPACES-TEMPS

Cette annexe regroupe les diagrammes espaces-temps produits pour les trois lignes du métro de Montréal dont les données d'occupation de voie étaient disponibles.

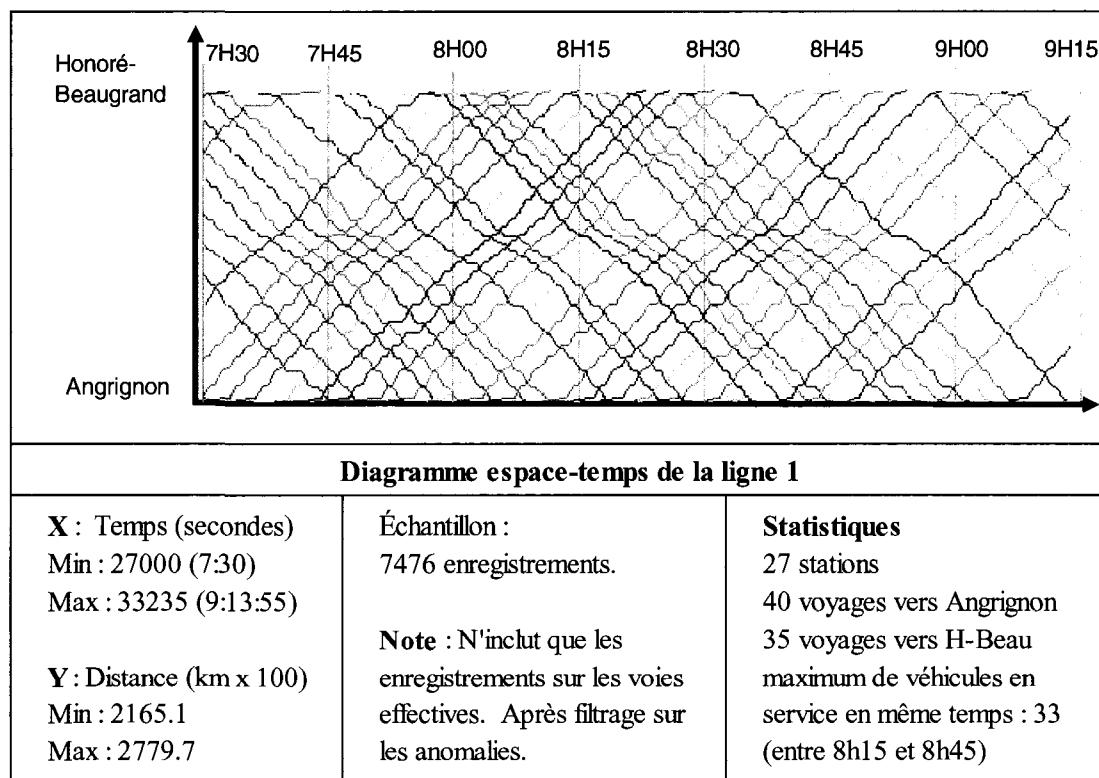


Figure A-1 : Diagramme espace-temps de la ligne 1.

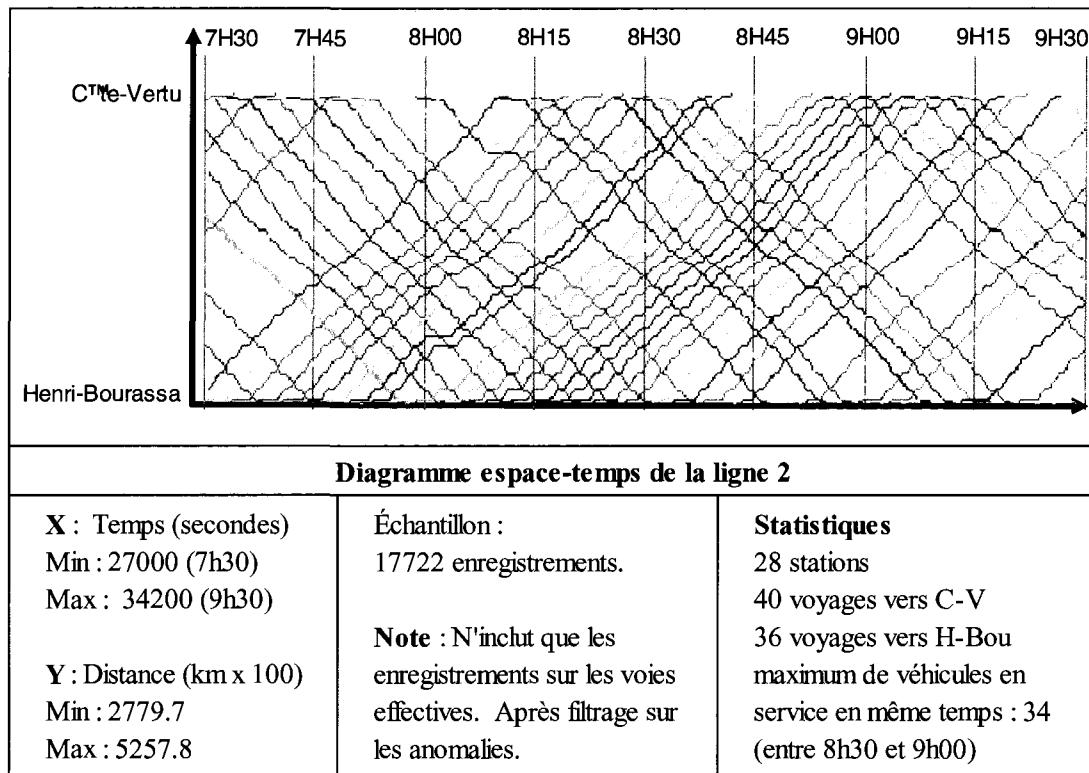


Figure A-2 : Diagramme espace-temps de la ligne 2.

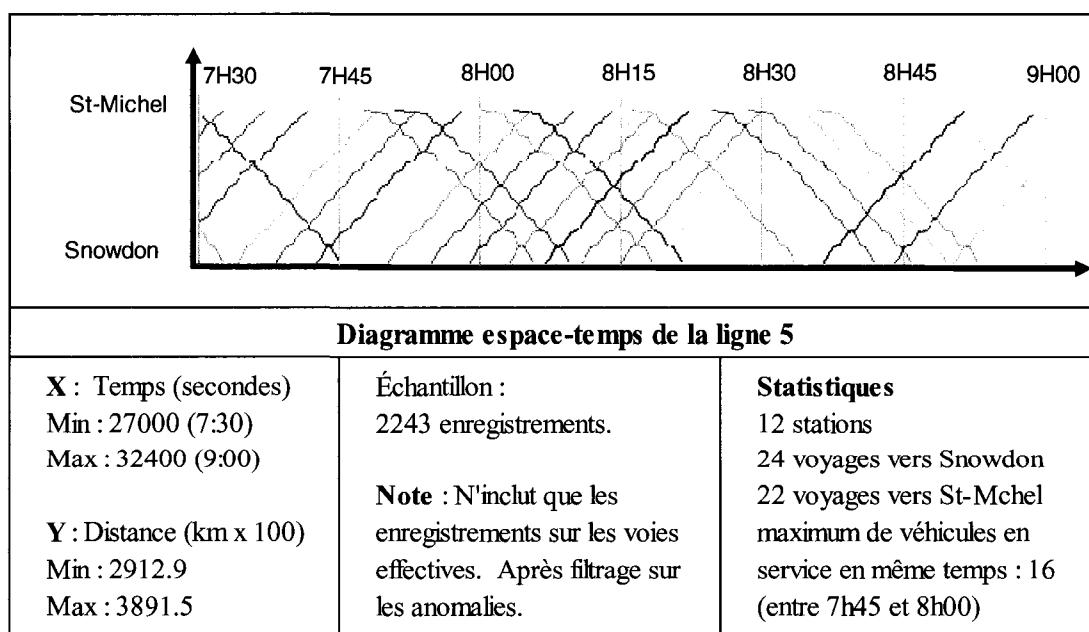


Figure A-3 : Diagramme espace-temps de la ligne 2.

ANNEXE B – LONGUEUR DES STATIONS ET NOMBRE DE CANTONS ASSOCIÉS

Cette annexe est ajoutée afin de démontrer la longueur totale des cantons se retrouvant à l'intérieur des stations.

Tableau B-1 : Longueur totale des cantons des stations de la ligne 1.

Ligne 1	Angrignon		Honoré-Beaugrand	
	Longueur (km)	Nb de cantons	Longueur (km)	Nb de cantons
H-Beaugrand	0.162	2	0.157	3
Radisson	0.161	1	0.159	1
Langelier	0.161	1	0.160	1
Cadillac	0.160	1	0.160	1
Assomption	0.162	1	0.162	1
Viau	0.161	1	0.161	1
Pie 9	0.168	1	0.160	1
Joliette	0.160	1	0.160	1
Préfontaine	0.160	1	0.161	1
Frontenac	0.163	1	0.158	1
Papineau	0.158	1	0.160	1
Beaudry	0.160	1	0.158	1
Berri	0.147	1	0.164	1
St-Laurent	0.158	1	0.159	1
Place des arts	0.158	1	0.158	1
McGill	0.159	1	0.159	1
Peel	0.160	1	0.160	1
Guy	0.170	1	0.168	1
Atwater	0.162	1	0.162	1
Lionel-Groulx	0.160	1	0.160	1
Charlevoix	0.160	1	0.160	1
Lasalle	0.160	1	0.160	1
De L', glise	0.172	1	0.162	1
Verdun	0.161	1	0.160	1
Jolicoeur	0.161	1	0.160	1
Monk	0.160	1	0.158	1
Angrignon	0.160	2	0.160	2
Moyenne	0.161	1.1	0.160	1.1

Tableau B-2 : Longueur totale des cantons des stations de la ligne 2.

Ligne 2	Côte-Vertu		Henri-Bourassa	
	Longueur (km)	Nb de cantons	Longueur (km)	Nb de cantons
H-Bou	0.176	3	0.156	3
Sauvé	0.159	1	0.161	1
Crémazie	0.158	1	0.158	1
Jarry	0.159	1	0.159	1
Jean-Talon	0.159	1	0.159	1
Beaubien	0.158	1	0.158	1
Rosemont	0.158	1	0.158	1
Laurier	0.16	1	0.172	1
Mont-Royal	0.16	1	0.158	1
Sherbrooke	0.16	1	0.160	1
Berri	0.158	1	0.158	1
Champs-de-mars	0.164	1	0.159	1
Place-D'armes	0.158	1	0.158	1
Square-Victoria	0.159	1	0.159	1
Bonaventure	0.163	2	0.157	1
Lucien-L'allier	0.162	1	0.160	1
Georges-Vanier	0.163	1	0.161	1
Lionel-Groulx	0.16	1	0.162	1
St-Henri	0.16	1	0.162	1
Vendome	0.16	1	0.160	1
Villa-Maria	0.16	1	0.160	1
Snowdon	0.16	1	0.160	1
Cote-Ste-Catherine	0.16	1	0.160	2
Plamondon	0.161	1	0.161	1
Namur	0.16	1	0.162	1
Savane	0.157	1	0.161	1
DuCollège	0.16	2	0.162	2
Côte-Vertu	0.156	2	0.156	2
Moyenne	0.160	1.2	0.160	1.2

Tableau B-3 : Longueur totale des cantons des stations de la ligne 5.

Ligne 5	Direction Snowdon		Direction St-Michel	
	Longueur (km)	Nb de cantons	Longueur (km)	Nb de cantons
St-Michel	0.160	2	0.161	2
Iberville	0.160	1	0.161	1
Fabre	0.160	1	0.161	1
Jean-Talon	0.155	1	0.155	1
Castelnau	0.161	2	0.161	1
Parc	0.161	2	0.160	1
Acadie	0.160	1	0.160	1
Outremont	0.161	1	0.160	1
Edouard	0.161	1	0.161	1
UdM	0.160	1	0.162	1
CDN	0.160	1	0.160	1
Snowdon	0.161	1	0.160	1
Moyenne	0.160	1.3	0.160	1.1

ANNEXE C – TEMPS DE PARCOURS AUX INTERSTATIONS

À l'intérieur de cette annexe, les temps de parcours des interstations de chacune des directions sont présentés. Chacun des traits sur les graphiques suivants représente une lecture tandis que les histobars représentent la moyenne incluse à l'intérieur de deux écarts-types. De plus, les relations de ces temps de parcours avec les longueurs associées à leur interstation sont présentées.

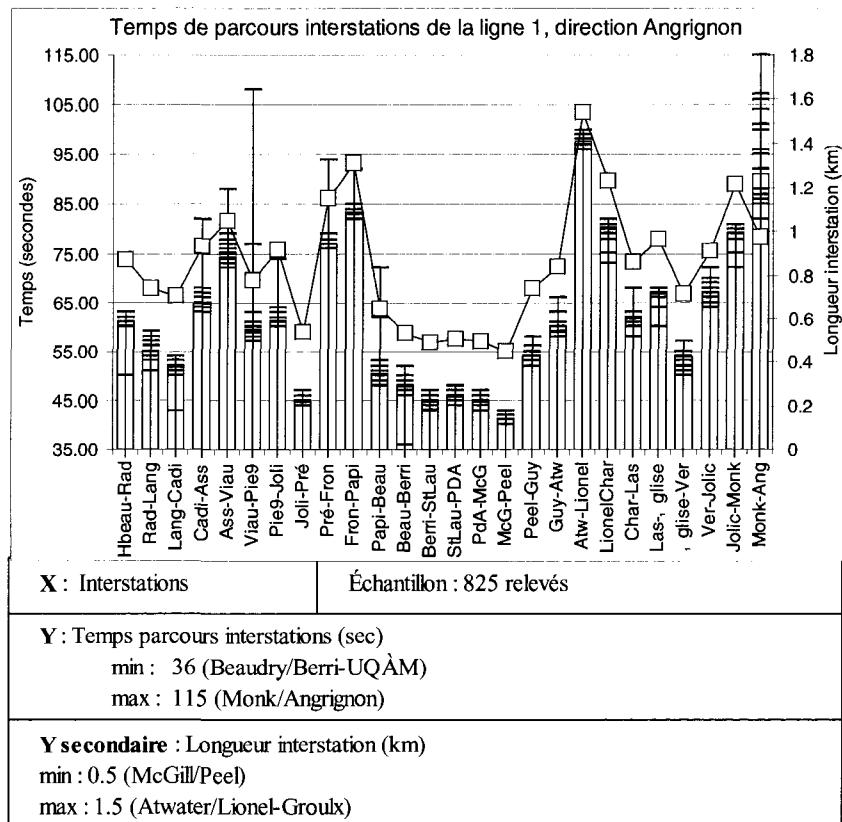


Figure C-1 : Temps de parcours interstations sur la ligne 1, direction Angrignon.

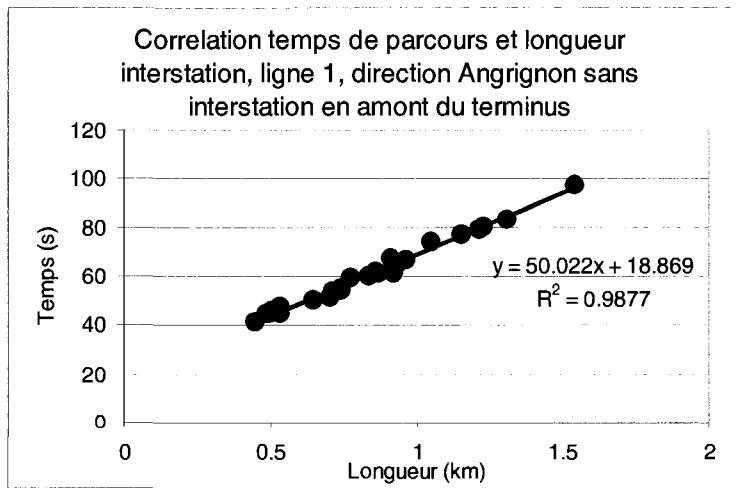


Figure C-2 : Corrélation entre les temps de parcours et la longueur des interstations sur la ligne 1, direction Angrignon, sans l'interstation terminus.

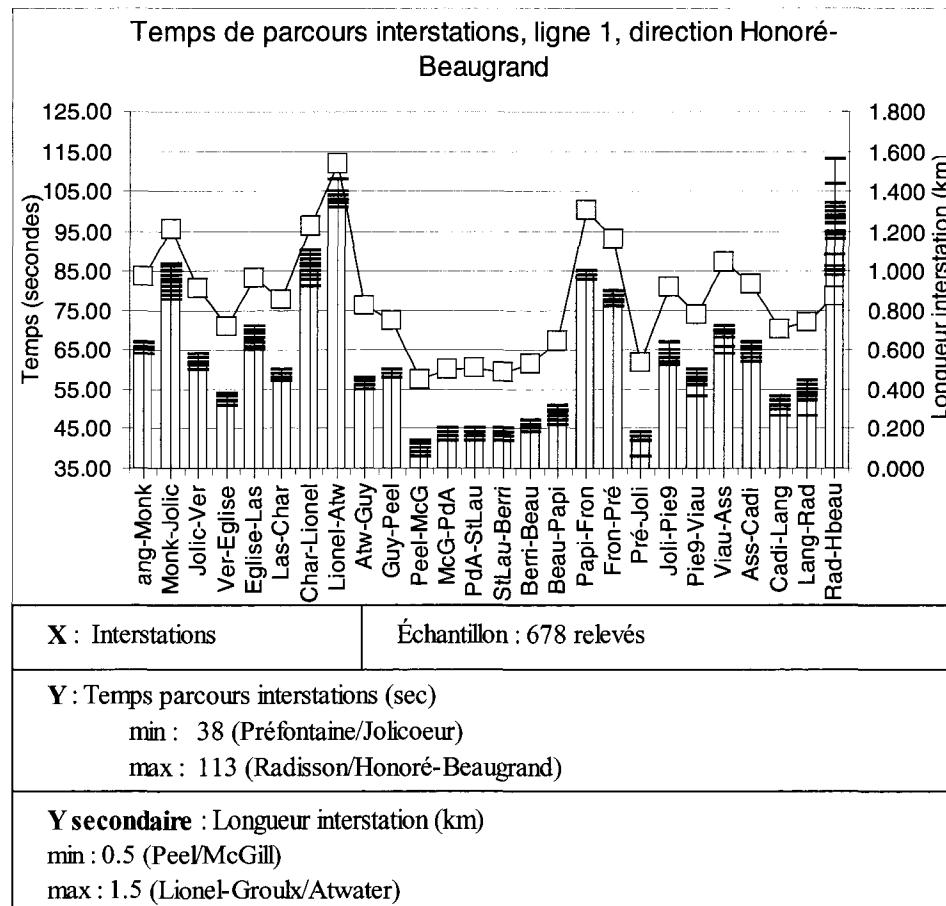


Figure C-3 : Temps de parcours interstations sur la ligne 1, direction Honoré-Beaugrand.

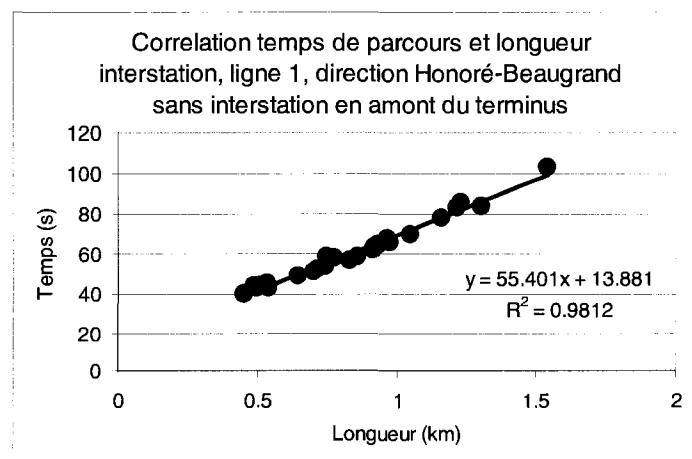


Figure C-4 : Corrélation entre les temps de parcours et la longueur des interstations sur la ligne 1, direction Honoré-Beaugrand, sans l'interstation terminus.

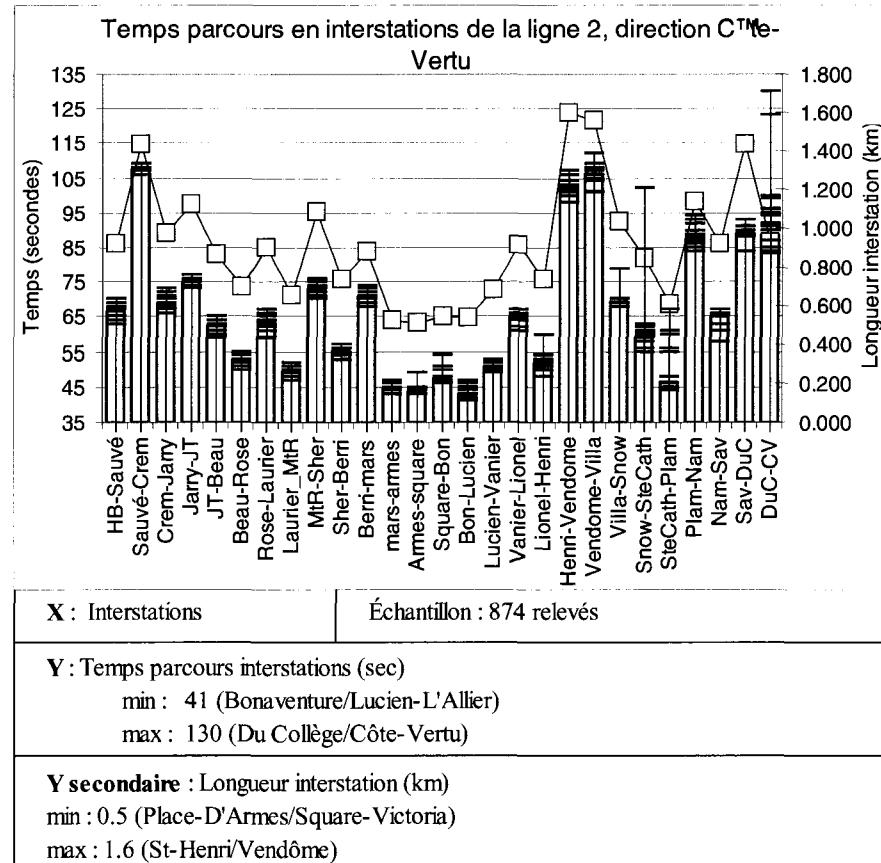


Figure C-5 : Temps de parcours interstations sur la ligne 2, direction Côte-Vertu.

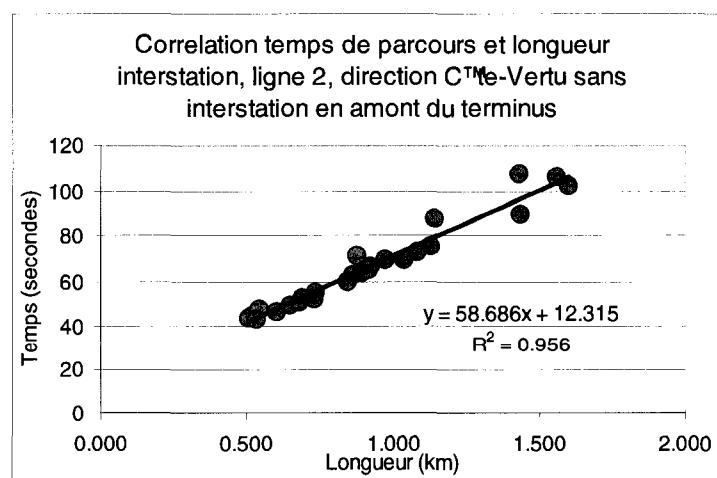


Figure C-6 : Corrélation entre les temps de parcours et la longueur des interstations sur la ligne 2, direction Côte-Vertu, sans l'interstation terminus.

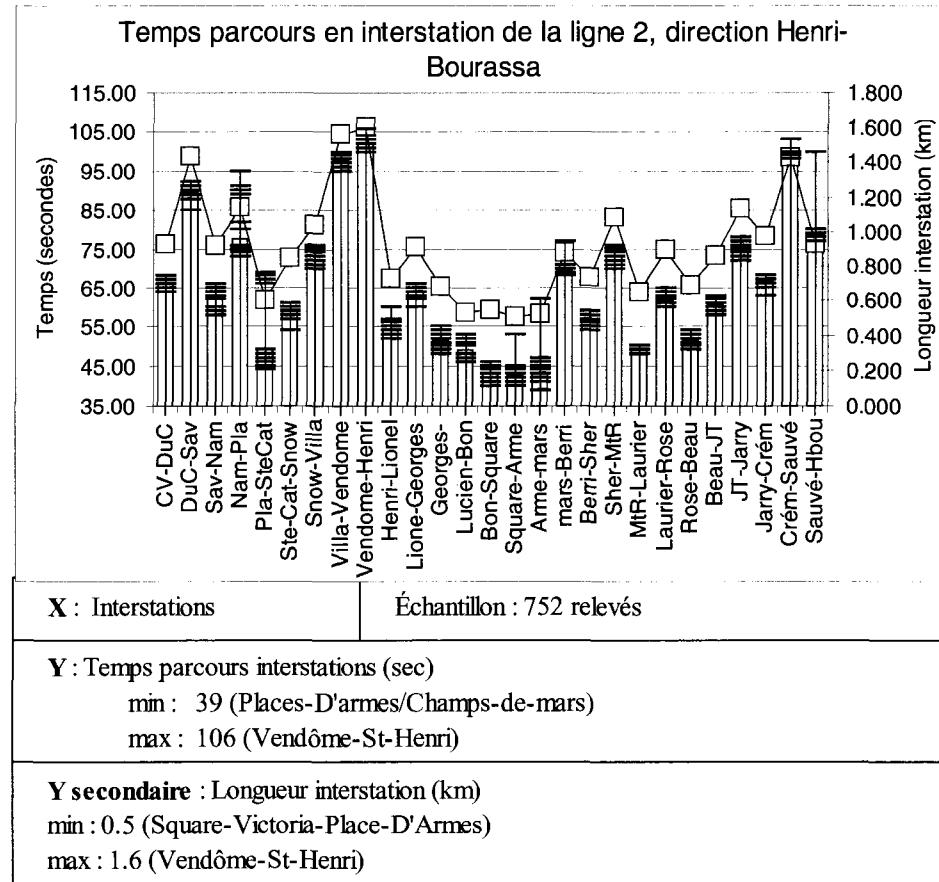


Figure C-7 : Temps de parcours interstations sur la ligne 2, direction Henri-Bourassa.

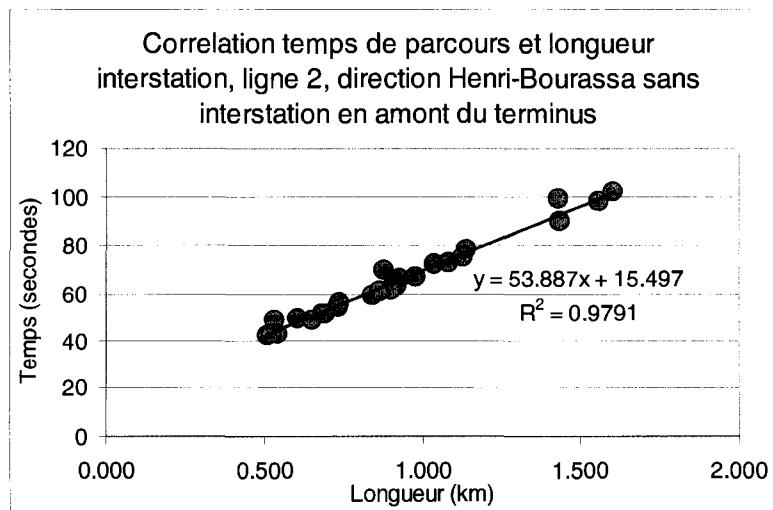


Figure C-8 : Corrélation entre les temps de parcours et la longueur des interstations sur la ligne 2, direction Henri-Bourassa, sans l'interstation terminus.

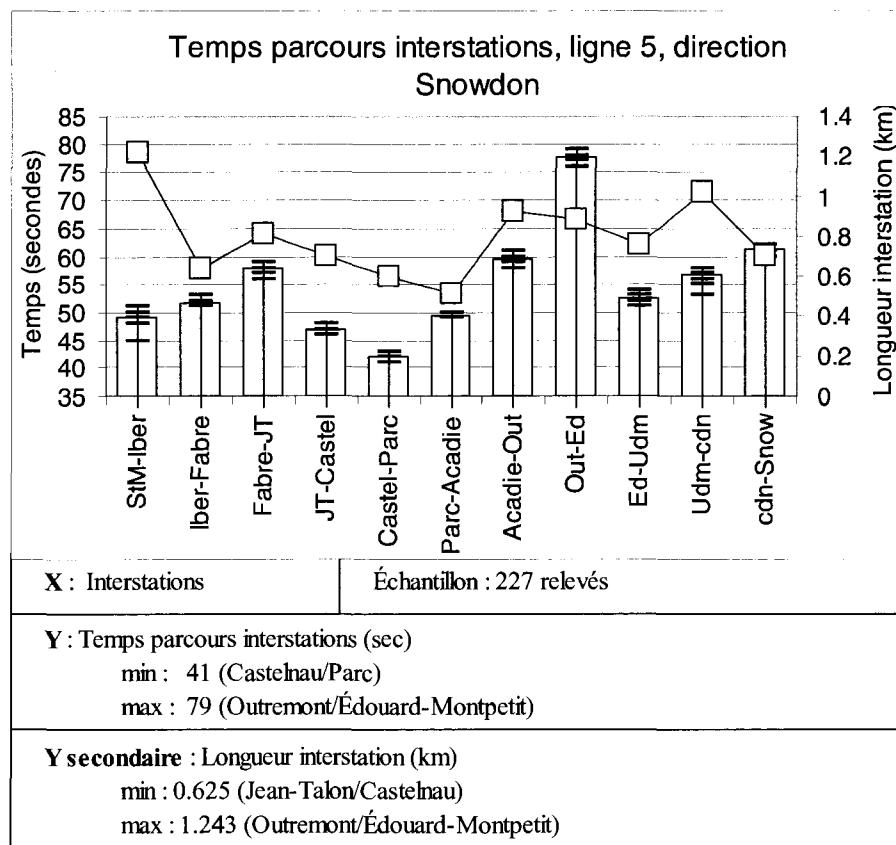


Figure C-9 : Temps de parcours interstations sur la ligne 5, direction Snowdon.

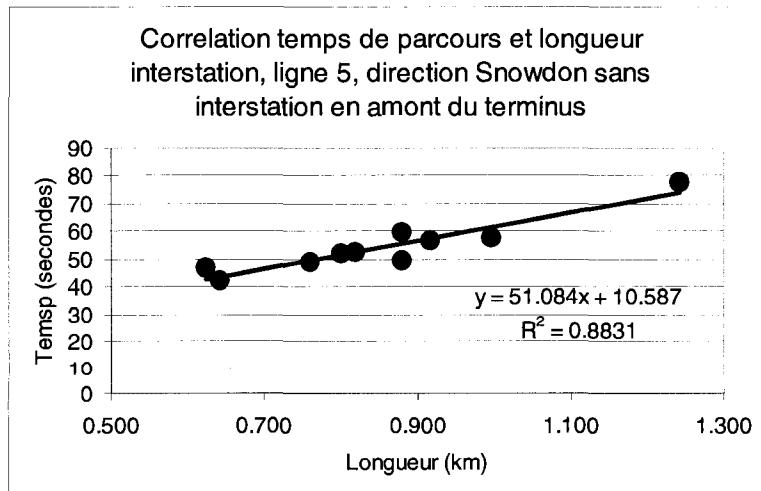


Figure C-10 : Corrélation entre les temps de parcours et la longueur des interstations sur la ligne 5, direction Snowdon, sans l'interstation terminus.

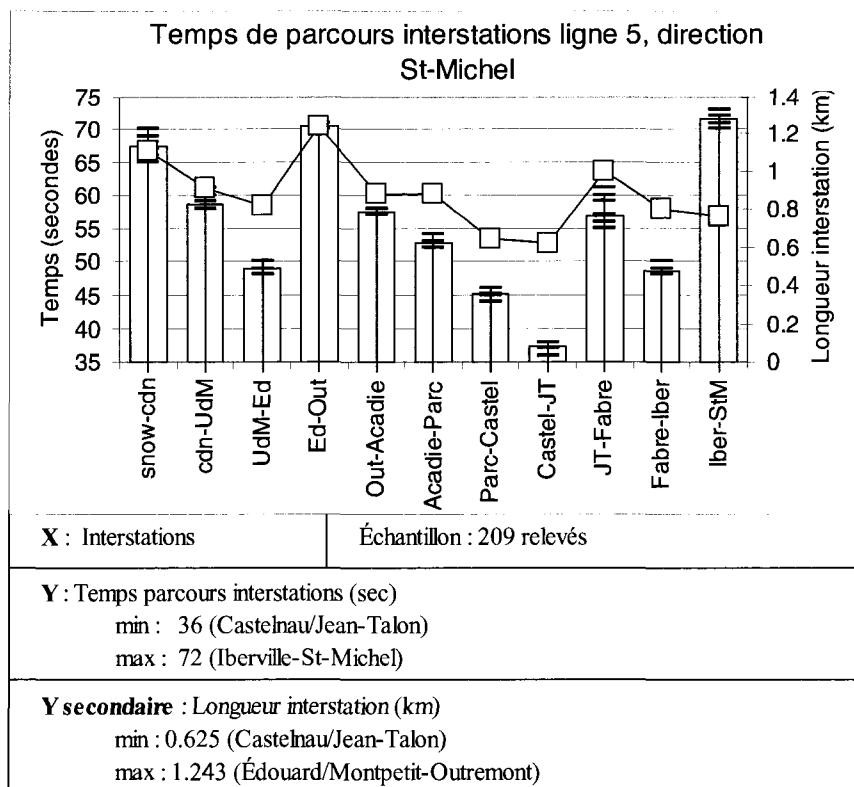


Figure C-11 : Temps de parcours interstations sur la ligne 5, direction St-Michel.

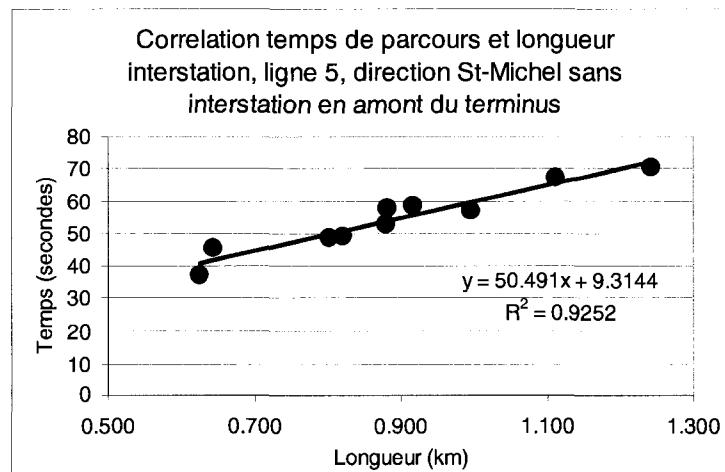


Figure C-12 : Corrélation entre les temps de parcours et la longueur des interstations sur la ligne 5, direction St-Michel, sans l'interstation terminus.

ANNEXE D – TEMPS D’ARRÊT AUX STATIONS

Cette annexe présente tous les temps d’arrêt aux stations, calculés pour l’ensemble du réseau du métro de Montréal.

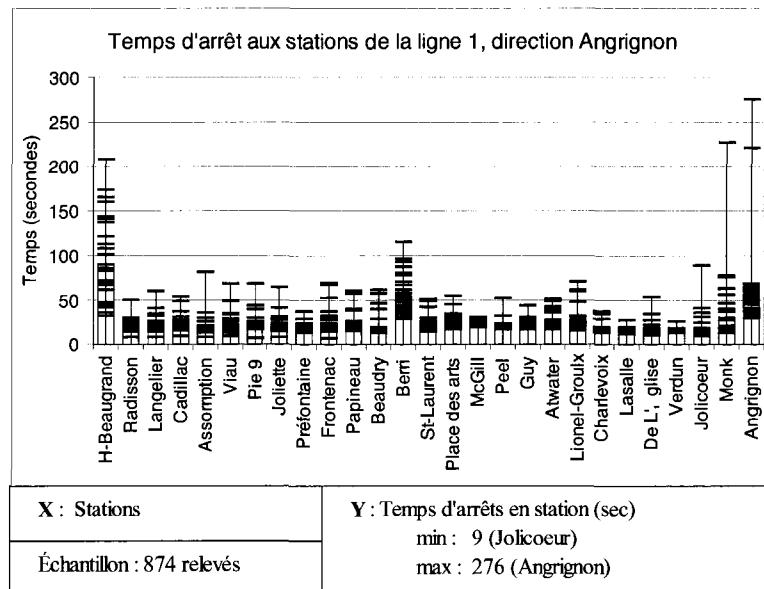


Figure D-1 : Temps d’arrêt aux stations de la ligne 1, direction Angrignon.

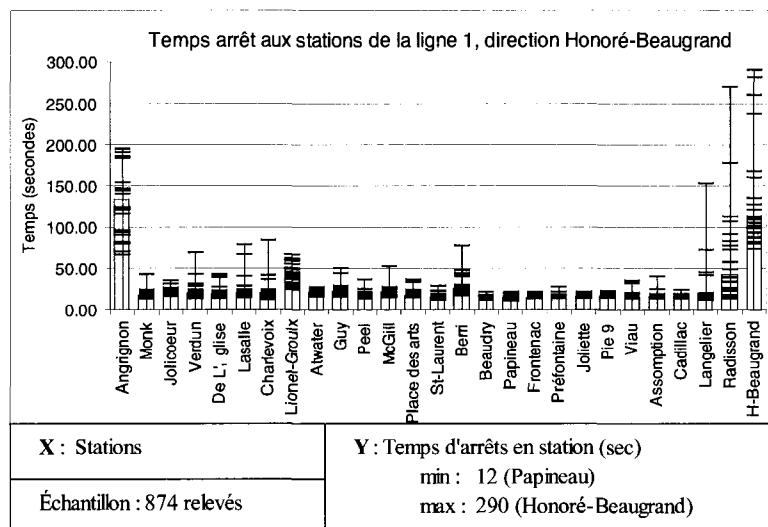


Figure D-2 : Temps d’arrêt aux stations de la ligne 1, direction Honoré-Beaugrand.

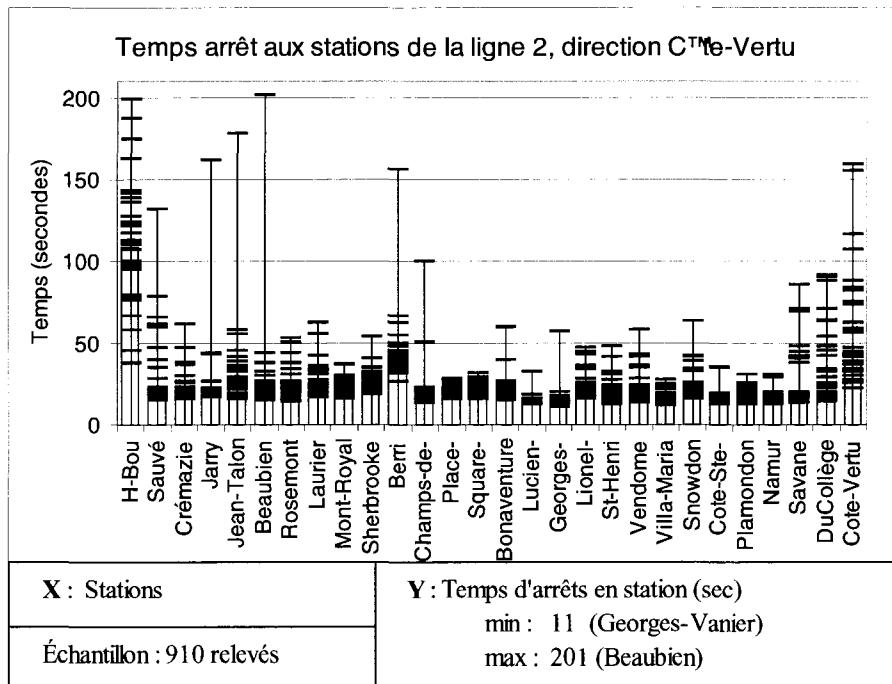


Figure D-3 : Temps d'arrêt aux stations de la ligne 2, direction Côte-Vertu.

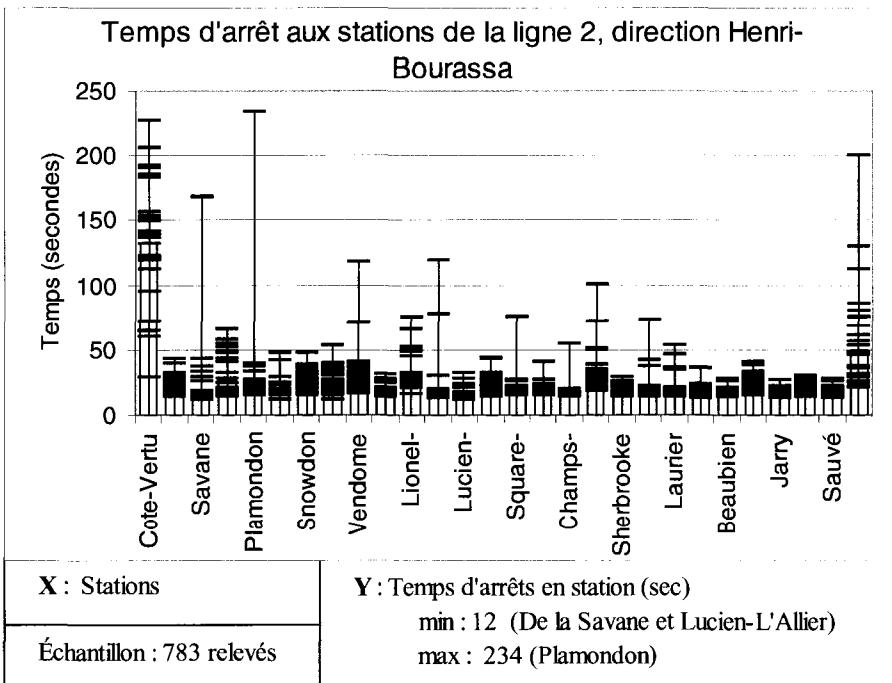


Figure D-4 : Temps d'arrêt aux stations de la ligne 2, direction Henri-Bourassa.

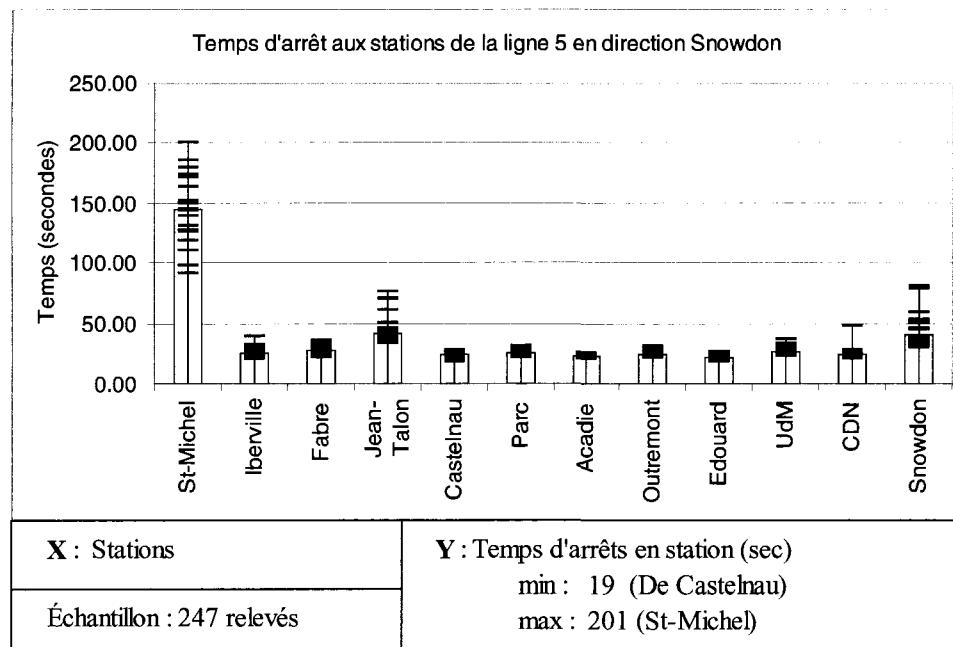


Figure D-5 : Temps d'arrêt aux stations de la ligne 5, direction Snowdon.

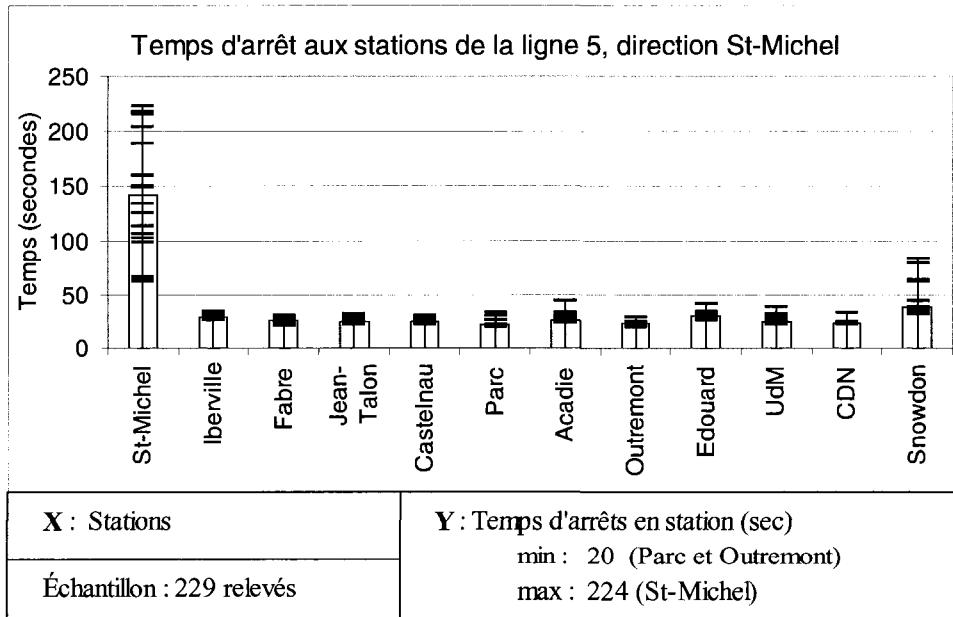


Figure D-6 : Temps d'arrêt aux stations de la ligne 5, direction St-Michel.

ANNEXE E – INTERVALLE DE SERVICE DE LA STATION LIONEL-GROULX

Cette annexe présente les intervalles recueillis pour les quatre directions de la station de correspondance Lionel-Groulx dans le but de démontrer que les arrivées et les départs de cette station sont régis par l'intervalle plutôt que par une synchronisation.

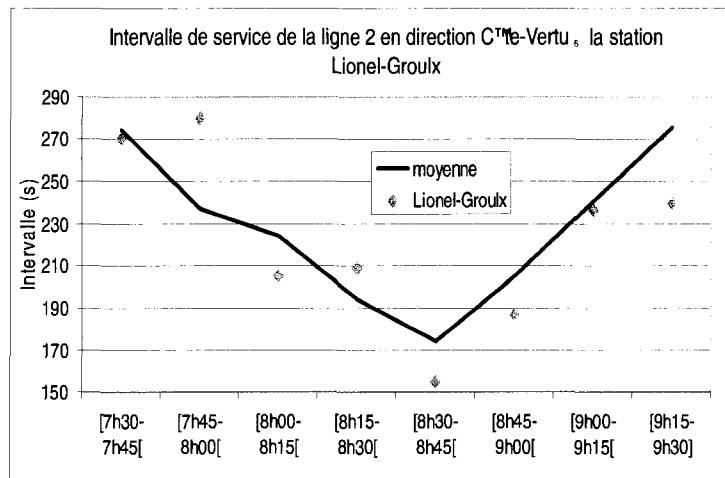


Figure E-1 : Intervalle de service de la ligne 2, direction Côte-Vertu à la station Lionel-Groulx.

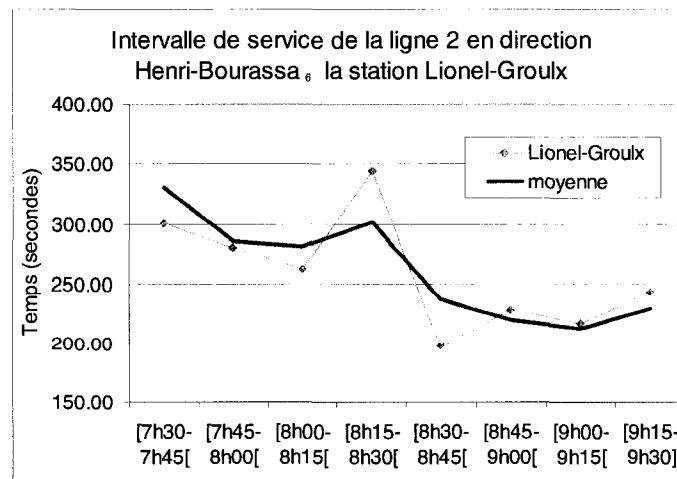


Figure E-2 : Intervalle de service de la ligne 2, direction de Henri-Bourassa à la station Lionel-Groulx.

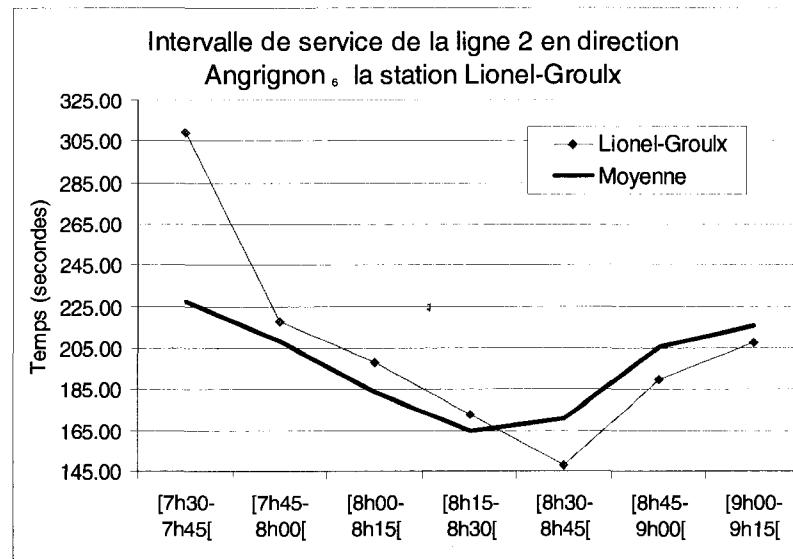


Figure E-3 : Intervalle de service de la ligne 1, direction de Angrignon à la station Lionel-Groulx.

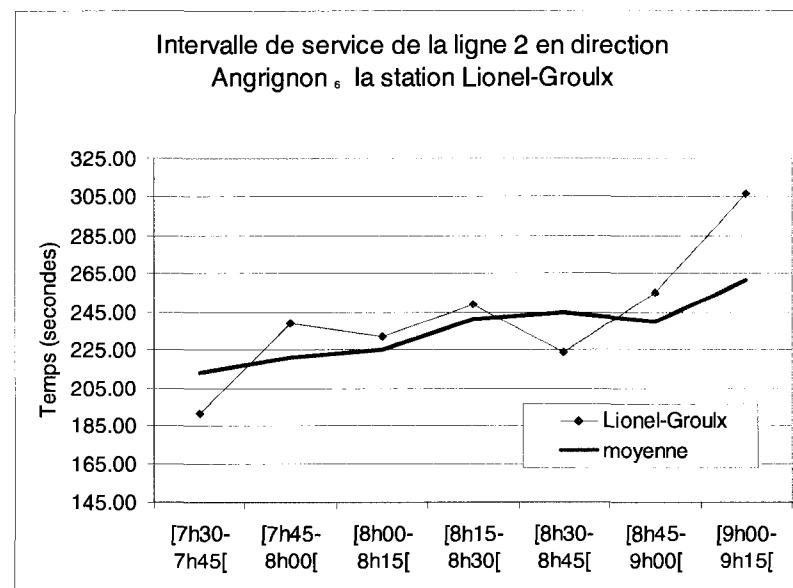


Figure E-4 : Intervalle de service de la ligne 1, direction de Honoré-Beaugrand à la station Lionel-Groulx.

ANNEXE F – HISTORIQUE DU MÉTRO DE MONTRÉAL

Afin de permettre une meilleure compréhension des choix technologiques et sociaux mis en cause par l'implantation du métro de Montréal, cette annexe approfondi l'historique du métro de Montréal.

Le métro de Montréal a été construit en deux temps. Aujourd'hui encore, les employés de la STM identifient ces deux étapes distinctes de la construction du réseau. Il est alors question du réseau initial et du réseau prolongé.

Réseau initial

Montréal inaugure son métro le 14 octobre 1966. À cette époque, le réseau est composé de 26 stations réparties sur trois lignes, pour un parcours totalisant 25,9 kilomètres. L'implantation d'un métro dans la ville de Montréal a été un enjeu important lors des élections municipales de 1960. À cette époque, Jean Drapeau, candidat à la mairie, propose aux citoyens l'idée de construire un métro. Cette idée avait été lancée par une entreprise de transport collectif, la « Montreal Street Railway Company », dès 1910. En plus d'augmenter le prestige de la ville à l'international, le développement du métro allait aider à diminuer les difficultés de circulation dans le centre de Montréal. Effectivement, dès la fin de la Seconde Guerre mondiale, la métropole québécoise connaît une croissance considérable. Croissance de population qui concorde avec l'augmentation de la motorisation et une revitalisation nouvelle du centre-ville de Montréal. Ces facteurs réunis ont comme effet de causer bons nombres de maux de tête aux usagers des routes congestionnées de Montréal. Pour Jean Drapeau, la solution pour soulager tous ces maux passe par la construction d'un métro. De plus, après que M. Drapeau ait remporté les élections, Montréal reçoit la confirmation qu'elle sera l'hôtesse de l'exposition universelle de 1967. Cette dernière nouvelle vint confirmer les intentions du nouveau maire de fonder le métro. Il forme

donc, dès 1961, le Bureau du métro [BM] qui est constitué d'ingénieurs et d'architectes. Le BM avait comme mandat de préparer les plans, les cahiers de charges, les appels d'offres publics et de superviser les travaux. Le BM n'avait pas à tout repenser du début, puisqu'il se référait au rapport de quatre documents, qui incluait des plans du futur métro, qu'avait déjà déposé la toute première société de transport collectif publique montréalaise : la commission de transport de Montréal [CTM] en 1953. Un système complètement souterrain et sur pneumatique a rapidement été choisi. Les travaux ont pu débuter dès 1962. Le réseau initial se compose des parcours Frontenac et Atwater « ligne 1 – verte », Henri-Bourassa et Bonaventure « ligne 2 – orange » ainsi que Berri-de-Montigny, maintenant Berri-UQAM, et Longueuil « ligne 4 – jaune », réalisé et financé entièrement par la ville de Montréal, au coût de 213,7 millions de dollars (Centre d'histoire de Montréal, 2006).

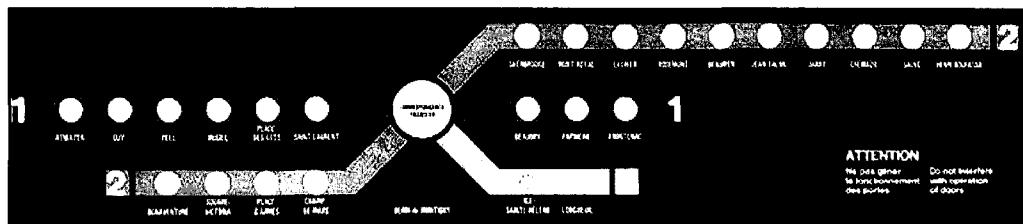


Figure F-1 : Temps d'arrêt aux stations de la ligne 1, direction Angrignon.

Plan du réseau inaugural de 1966.

Source : http://en.wikipedia.org/wiki/Montreal_metro

Réseau prolongé

En 1970 (<http://www.cum.qc.ca/>), plusieurs municipalités de l'île de Montréal se regroupent pour former la communauté urbaine de Montréal [CUM]. La CUM se veut un lieu d'activité industrielle qui favorise la prospérité économique en coordonnant les activités des municipalités de l'île, tel que les services de police (Anonyme, 2006). Afin d'élargir le champ des compétences de la CTM, qui est restreint à la ville de Montréal, celle-ci est remplacée par la commission de transport de la communauté urbaine de Montréal [CTCUM] en 1970. C'est au même moment, à la veille des Jeux Olympiques d'été à Montréal, que la décision de prolonger le tracé original du métro a été prise par le conseil administratif de la CUM. La « ligne 1 – verte » a été prolongée

dans ses deux directions et la « ligne 2 – orange » a été agrandie vers le nord-est. Aussi, l'ajout d'une toute nouvelle ligne a été planifié afin de relier les deux tronçons de la « ligne 2 – orange » à la hauteur de la rue Jean-Talon, il est ici question de la « ligne 5 – bleue ». La figure suivante expose les nouveaux prolongements suggérés par la CTCUM.

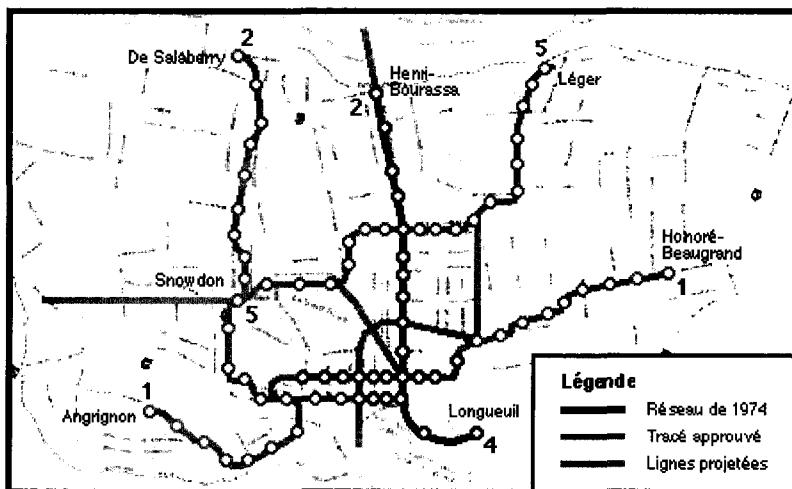


Figure F-2 : Réseau prolongé du métro tel que proposé par la CTCUM en 1974.
Source : site web de Matthew McLaughlin. <http://www.metrodemontreal.com/>

Les travaux ne se déroulèrent pas aussi bien que lors de la mise en place du réseau initial. Plusieurs facteurs sont venus compromettre les travaux, dont l'incapacité financière de la ville de Montréal à soutenir le projet. Ainsi, le gouvernement du Québec a dû commencer à contribuer au financement à partir de 1973 par l'entremise du ministère des Transports [MTQ]. C'était alors à ce ministère que revenait la responsabilité du métro puisque, la même année, le ministère de la Voirie s'était intégré à celui-ci. Quoiqu'il en advienne, le prolongement de la « ligne 1 – verte » vers l'est a été complété en 1976, juste à temps pour accueillir les millions de visiteurs sur le site des Jeux Olympiques. Deux ans plus tard, le prolongement vers l'ouest a été mis en opération. Dès lors, le gouvernement du Québec, qui était impliqué dans le financement du métro de Montréal, désirait être consulté avant l'entreprise de nouveaux projets. Il imposa donc un moratoire sur de futurs prolongements de métro en 1976. Cela retarda la construction du prolongement de la « ligne 2 – orange » vers

le nord-ouest et la construction de la « ligne 5 – bleue ». Le MTQ profita de ce moratoire afin de suggérer de nouvelles idées sur d'éventuels prolongements du métro. Cependant ces idées étaient différentes de celles proposées par la CTCUM, se qui eu comme conséquence de retarder encore davantage la réalisation des travaux. C'est en 1979 que le MTQ déposa son plan de transport intégré de la région de Montréal. À l'intérieur de ce plan, le MTQ modifia le tracé de la « ligne 5 – bleue » vers l'est et raccourcit la longueur du prolongement de la « ligne 2 – orange ». Malgré tout, les premières stations du prolongement de la « ligne 2 – orange » ont commencé à être accessibles aux usagers à partir de 1980. Les modifications apportées par le MTQ sont présentées à l'intérieur de la figure suivante.

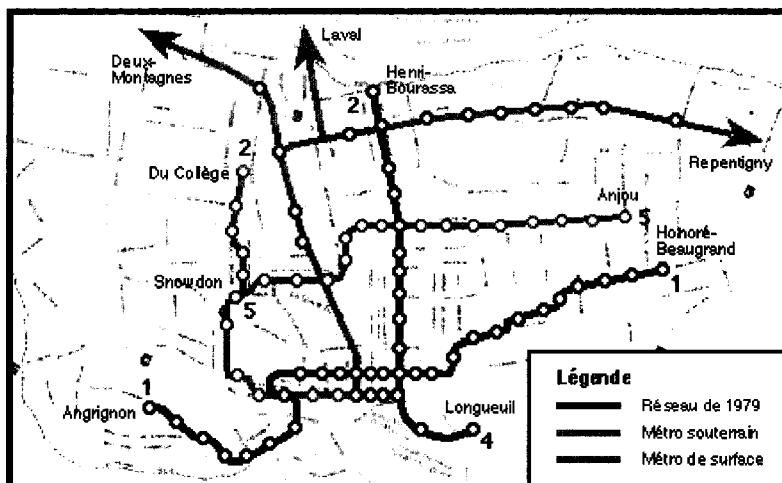


Figure F-3 : Réseau de métro proposé par le ministère des Transports en 1979.
Source : site web de Matthew McLaughlin. <http://www.metrodemontreal.com/>

En 1981, à la suite de pourparlers importants, la CUM et le MTQ se sont entendus sur les tracés et le financement des prolongements. Dans les clauses de cette entente, la CUM devait implanter un métro de surface pour desservir l'est de l'île de Montréal et, en contrepartie, le MTQ s'engageait à défrayer 100 % des coûts de tout prolongement effectué après le 1^{er} janvier 1980. Finalement, le projet de train de surface du MTQ n'a jamais vu le jour, dû au rapport Gascon qui recommandait plutôt le prolongement de la « ligne 5 – bleue » vers Anjou, l'ajout d'une ligne nord-sud sous le boulevard Pie-IX et de l'ajout d'un métro de surface de la station Radisson vers Pointe-aux-Trembles.

Cependant, en 1984, un groupe de travail composé de gens de la CUM et du MTQ soulignait les faibles prévisions du niveau d'achalandage de la ligne nord-sud sous le boulevard Pie-IX (Chartrand, 1991).

L'inauguration de stations de la « ligne 5 – bleue » débuta en 1986. Mais comme aucune décision sur le parcours à prendre pour la « ligne 5 – bleue » vers l'est n'était fixée, elle a été arrêtée à St-Michel qui est, encore aujourd'hui, la station terminus de cette ligne. À la suite de deux commissions parlementaires en 1987 et 1988, le MTQ proposa de prolonger la « ligne 5 – bleue » vers Montréal-Nord. Le 21 septembre 1989, un accord sur la création d'un organisme régional de transport prévoyait le prolongement de la « ligne 2 –orange » vers Laval, simultanément avec la réalisation d'une ligne sous le boulevard Pie-IX et la modernisation du circuit du train de banlieue Montréal-Deux-Montagnes. Cependant, cette entente intervient quelques jours avant la date de scrutin provincial et à moins de deux mois des élections municipales à Laval. Ceci a eu pour cause de retarder les développements et d'augmenter les pressions politiques afin qu'un lien soit fait pour rejoindre la ville de Laval (Chartrand, 1991). Entre temps, en 1985, le conseil d'administration de la CTCUM se voit ajouter des représentants du peuple et des usagers, elle devient donc une société. C'est alors qu'elle change de nom pour la Société de transport de la communauté urbaine de Montréal [STCUM]. Après quelques élections provinciales et municipales promettant un prolongement vers Laval, c'est finalement en 2002 que les travaux du nouveau prolongement du métro vers Laval peuvent débuter. Le projet consiste à ajouter trois stations sur 5,2 kilomètres sur la rive-nord de Montréal en prolongeant la « ligne 2 – orange » par la station Henri-Bourassa. Dans la même année, toutes les municipalités de l'île de Montréal furent fusionnées en une seule. Cela abolit automatiquement la CUM. Donc, la STCUM devient la Société de transport de Montréal [STM]. Depuis 2004, plusieurs villes de l'île de Montréal ce sont défusionnées, sans provoquer de nouveau changement d'appellation du seul service de transport public de l'île de Montréal. L'image suivante est présentée dans le but de synthétiser les dates d'ouverture des différents tronçons de métro.

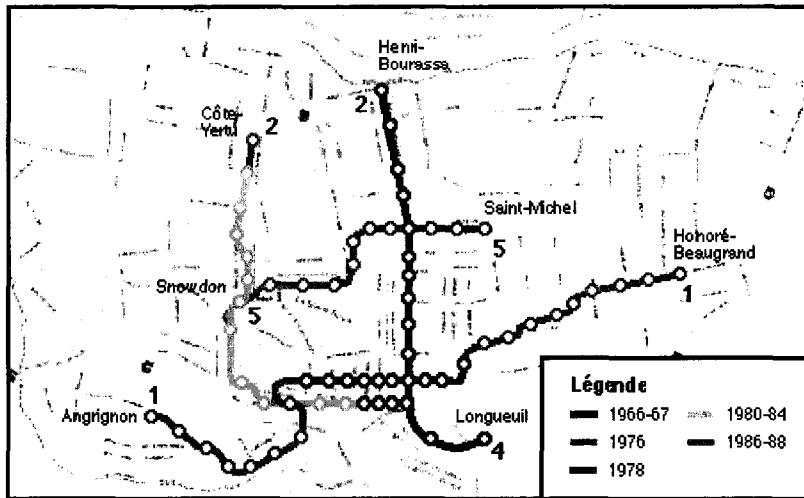


Figure F-4 : Réseau de métro actuel et dates d'ouverture des tronçons 1966.
Source : site web de Matthew McLauchlin. <http://www.metrodemontreal.com/>

Puisque les technologies installées sur le réseau existant ne sont plus disponibles aujourd’hui, les trois nouvelles stations à Laval utilisent donc une technologie beaucoup plus moderne, à un point tel que ces nouvelles technologies sont incompatibles avec le centre de contrôle existant. De ce fait, le prolongement vers Laval est l’occasion pour la STM de moderniser son métro. Le renouvellement du réseau existant est supervisé par le programme Réno-Systèmes. Ce programme est un partenariat entre la firme privée de génie-conseil Dessau-Soprin et la STM. La partie la plus importante de la première phase du mandat de ce programme est la construction d’un tout nouveau centre de contrôle, combiné à la remise à neuf des équipements de télématrice à l’intérieur de chacune des stations. La première phase inclut aussi le renouvellement d’escaliers mécaniques, la mise à jour du système d’alarme incendie et intrusion, la réfection du système de vente et de perceptions des titres de transport et l’ajout d’un système d’éclairage tunnel.

La phase suivante du programme Réno-Systèmes a comme objectif de remplacer les plus anciennes rames du métro, les MR-63, qui ont plus de 40 ans de service par de nouvelles. Cette deuxième phase a aussi comme objectif de réparer les structures auxiliaires (poste de ventilation, poste de pompage, etc.).

Matériel Roulant

Le métro de Montréal fonctionne grâce à un matériel roulant électrique équipé de pneumatiques par opposition au traditionnel système ferroviaire qui utilise une technologie « fer sur fer ». Ce type d'équipement fait de Montréal une ville innovatrice dans le domaine des métros lors de son inauguration en 1966. Aujourd'hui, 18 métros dans le monde possèdent au moins une ligne sur pneumatiques. C'est lors d'une visite à Paris de monsieur Lucien L'Allier, directeur du service de travaux publics de Montréal, et du maire de Montréal, monsieur Jean Drapeau, que l'idée de l'utilisation d'un système sur pneumatiques est confirmée. En effet, lors de leur visite, ils ont été séduits par une démonstration du nouveau train sur pneumatiques développé par la régie autonome des transports parisiens [RATP]. Le plus grand avantage d'une telle technologie est l'augmentation de l'adhérence du train sur sa voie. L'augmentation de l'adhérence permet une meilleure accélération au démarrage, un meilleur freinage et le franchissement de dénivellations importantes. De plus, l'utilisation de pneumatiques permet de réduire considérablement le bruit de roulement et le grincement engendré par le frottement des roues du train sur leur voie, en plus de réduire les vibrations transmises aux usagers et aux bâtiments environnants. L'image suivante présente les pneumatiques d'une voiture du métro de Montréal.

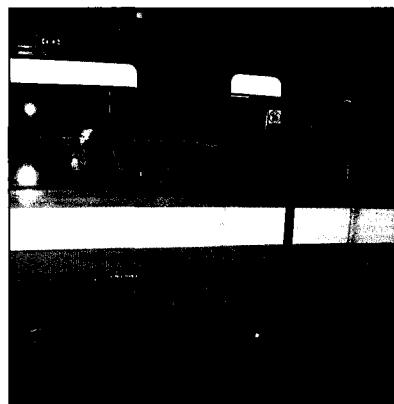


Figure F-5 : Vue des pneumatiques du matériel roulant du métro de Montréal.
Source : <http://fr.wikipedia.org/>

Cependant, depuis cette époque, les systèmes ferroviaires de type « fer sur fer » ont vu leur capacité d'accélération et de freinage grandement s'améliorer. De plus, les nouvelles roues en acier se sont sophistiquées en y incluant une matière caoutchoutée qui en fait un système de roulement sur rail silencieux et confortable. Aujourd'hui, les systèmes « fer sur fer » en sont pratiquement aux mêmes niveaux de performance et de confort que les systèmes sur pneumatiques. Le système sur pneumatiques demeure cependant supérieur dans des conditions de virages serrés et dénivellations négociées à grande vitesse. Bien que les pneumatiques présentent des avantages, leurs coûts de remplacement n'en demeure pas moins importants, la citation suivante permet de constater ce fait.

« Le 4 septembre dernier [2002], la STM a adjugé à la compagnie Michelin un contrat pour la fourniture de 1596 pneus porteurs et de 530 pneus de guidage pour le métro. Le coût unitaire (avant taxes) des pneus porteurs est de 617 \$, contre 219 \$ pour les pneus de guidage. »

(STM, 2002c)

Chacune des voitures est équipée de deux bogies. Les bogies possèdent quatre roues d'acier classiques et quatre pneumatiques. Les pneumatiques, de diamètre supérieur aux roues d'acier, assurent la traction, le freinage et le guidage, tandis que les roues d'acier sont utilisées dans les cas d'urgence de crevaison ou lors de manœuvre dans les aiguillages. Quatre roues pneumatiques horizontales sont ajoutées au bogie afin de guider le train dans sa voie, elles sont appelées roues de guidage. Le métro de Montréal a été le premier au monde à rouler entièrement et uniquement sur pneumatiques. Ces pneus sont gonflés à l'azote à l'aide d'une valve à air sur chacun d'eux.

Dans le but de réduire le bruit lors du freinage, les sabots de frein sont fabriqués en bois de merisier trempé dans l'huile d'arachides. C'est cette fabrication qui leur confère cette odeur particulière de beurre d'arachides lors de freinage intense (STM, 2006). Ces sabots de bois viennent s'appuyer sur les roues d'acier pour freiner le train. Il existe deux types de voitures dans le métro de Montréal, les voitures tractions et les

voitures remorques. Une voiture remorque est toujours ceinturée de deux voitures tractions. Ainsi, le train du métro est à la fois poussé et tiré. Sur les voitures tractions, les bogies sont équipés d'une prise en charge de l'alimentation électrique du système traction. Sur ces bogies, deux frotteurs et deux patins sont présents. Les frotteurs s'appuient sur la barre de guidage électrifiée et les patins s'appuient sur le rail de fer pour le retour du courant.

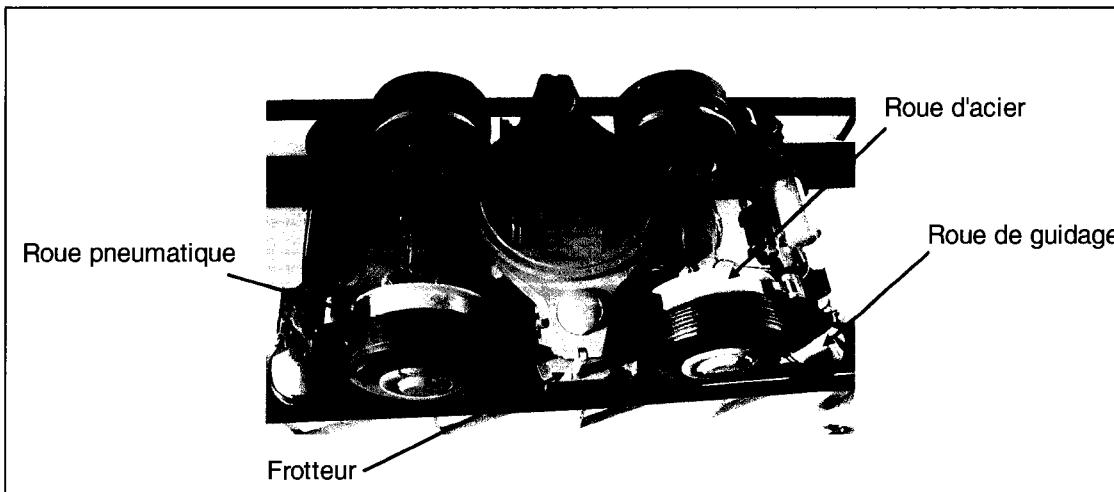


Figure F-6 : Bogie d'un système de métro sur pneumatiques.
Source : <http://fr.wikipedia.org/>

Afin de répondre à la demande, le métro peut être composé d'un, deux ou trois éléments de trois voitures, ce qui en fait des trains de 50.8, 101.6 ou 152.4 mètres de long. La charge maximale à bord en est ainsi modifiée. Chacune des voitures accueille un maximum de 160 usagers. Dans la théorie, il est donc possible de déplacer un maximum de 480, 960 ou 1440 usagers dans un seul train, selon la composition des éléments. Les voitures motrices ont une masse à vide, de 20 180 kilogrammes, tandis que les voitures tractions ont une masse à vide, de 27 450 kilogrammes. Donc, en y incluant les usagers, les trains du métro peuvent avoir une masse maximale de 106 830, de 213 660 ou de 320 490 kilogrammes, toujours selon l'arrangement des éléments.

Dans le but d'obtenir des temps d'arrêt les plus courts possibles en station, lors du débarquement/embarquement des usagers, chacune des voitures est équipée de quatre portes latérales à deux vantaux. L'ouverture utile de ces portes est de 1,3 mètre. La

figure suivante est présentée afin de démontrer les dimensions physiques des voitures du métro de Montréal.

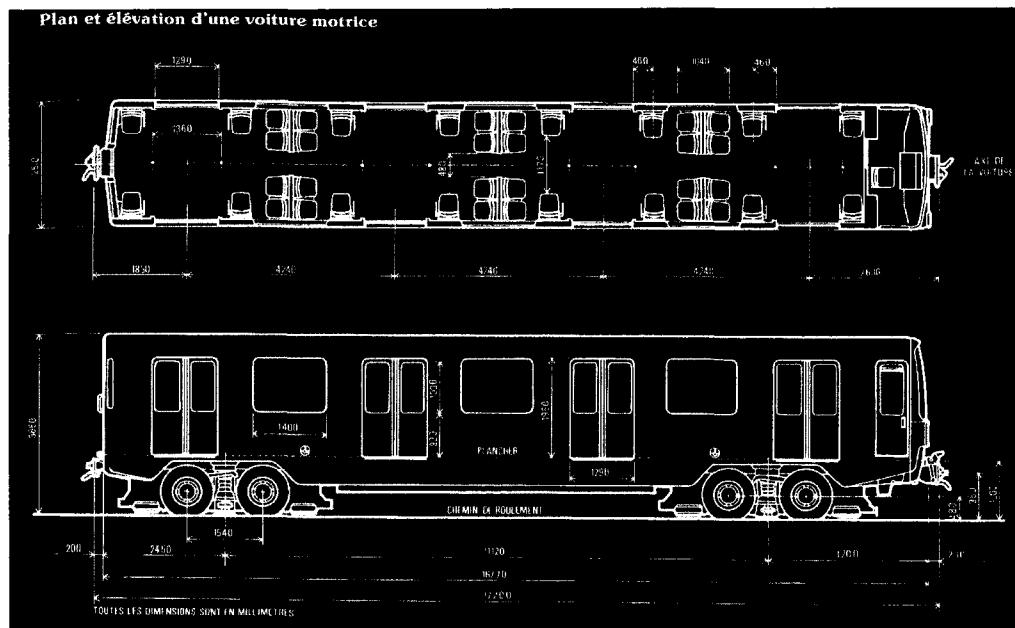


Figure F-7 : Plan et élévation d'une voiture motrice.
Source : (Communauté urbaine de Montréal *et al.*, 1983)

À Montréal, deux types de matériel roulant sont utilisés, soit : les voitures MR-63 de la compagnie Canadian Vickers qui sont en service depuis 1966, utilisées aujourd’hui uniquement sur la « ligne 1 – verte », et les MR-73 de l’entreprise Bombardier Transport en service depuis 1976 et utilisées sur les autres lignes (Anonyme, 2002). Les différences importantes entre ces deux types de voitures, intéressantes pour la recherche, résident dans les systèmes de traction et de freinage. Les voitures MR-63 possèdent un combinateur de démarrage résistif pour la traction et un système de freinage rhéostatique commandé par cran. Les voitures MR-73 sont équipées d’un hacheur de courant à commande continue pour la traction qui libère à petites doses les 750 volts nécessaires pour faire avancer le train. Ce sont ces hacheurs de courant qui produisent les trois notes entendues lors du départ. Ces voitures sont aussi équipées d’un système de freinage par récupération (Allaire *et al.*, 1994). Les deux types de trains possèdent une accélération rapide, l’accélération initiale pour le modèle MR-63 est de $1,33 \text{ m/s}^2$ et de $1,43 \text{ m/s}^2$ pour le modèle MR-73 (Anonyme, 2002).

Typiquement, l'accélération des voitures MR-73 est constante jusqu'à 75% de sa charge à bord maximale. La STM possède 759 voitures de métro qui parcourent environ 65 millions de kilomètres chaque année.

Installations fixes

Les installations fixes du métro sont les infrastructures nécessaires au fonctionnement du métro. Cette section présente l'ensemble des ouvrages qui permettent aux usagers d'emprunter le métro chaque jour de façon régulière, efficace et sécuritaire.

La voie

Le métro de Montréal est totalement souterrain, ce qui lui confère l'avantage d'être à l'abri des intempéries météorologiques. Lors de sa conception, en 1960, il a été déterminé d'adopter un gabarit tunnel plus petit que les gabarits au standard américain. La conception d'un gabarit de 2,5 mètres plutôt que de 3,15 mètres a permis d'implanter le métro plus facilement sous les voies publiques et de produire des ouvrages de moindre importance (Blain *et al.*, 1976). Lorsque cela était possible, le tracé des voies a été implanté sous les domaines publics pour ainsi éviter les expropriations. Puisque le BM était composé en grande partie d'ingénieurs miniers et que l'île de Montréal repose sur du roc qui se retrouve près de la surface, en général de bonne qualité, il a été déterminé de fonder le tunnel dans ce roc. La recherche de ce roc et la préoccupation de l'économie d'énergie ont amené le BM à adopter le profil en cuvette. Le profil en cuvette permet l'économie d'énergie en exploitant l'énergie cinétique développée par le train (voir la figure suivante). Parce que les trains ont une grande masse, beaucoup d'énergie est nécessaire pour briser l'inertie du train à l'arrêt et à l'accélération. Afin d'aider les moteurs électriques dans cette tâche, le profil en cuvette des tunnels permet de donner aux trains une poussée lors du démarrage et de le ralentir lors des arrêts. Cette technique est possible grâce à l'utilisation de matériels roulants sur pneumatique qui possèdent une adhérence accrue, lui permettant de gravir des inclinaisons jusqu'à 6,5 %.

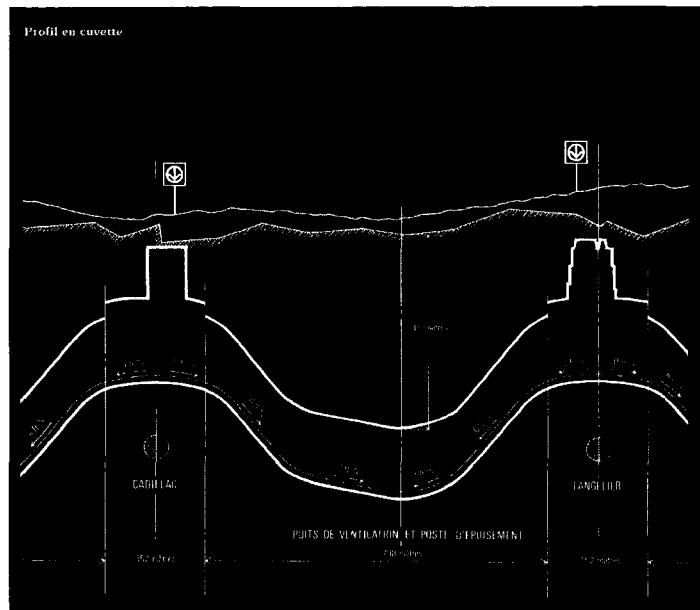


Figure F-8 : Coupe du tunnel montrant le profil en cuvette.
Source : (Communauté urbaine de Montréal *et al.*, 1983)

Les voies du métro de Montréal sont équipées de rails en acier, de pistes de roulement et de barres de guidage. Les rails en aciers permettent la circulation de véhicules ferroviaires classiques. Ces voies sont surtout utilisées par les véhicules d'entretien. Elles permettent aussi le retour du courant traction des véhicules de métro grâce aux patins installés sur les bogies des véhicules. La barre de guidage, en plus de guider le métro, permet à celui-ci de capter le courant traction grâce aux frotteurs installés sur les bogies. Les pistes de roulements, constituées de blocs de béton, parfaitement alignées et nivélées permettent la circulation des trains en offrant un niveau élevé de confort aux usagers.

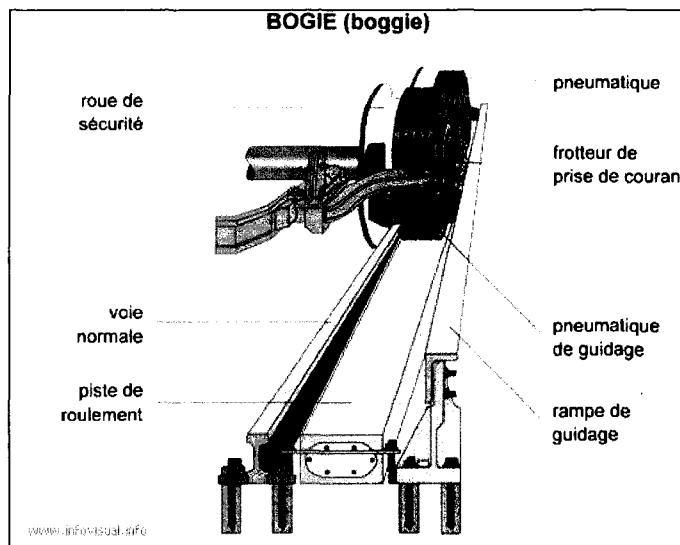


Figure F-9 : Dessin explicatif de la bande de roulement et du bogie.
Source: Site web Visual dictionary. <http://www.infovisual.info/>

L’alimentation traction est distribuée sur les barres de guidage à une tension électrique de 750 volts en courant continu. Cette alimentation est fournie par 59 postes de redressements [PR] de 2 500 kW chacun qui abaissent et redressent la tension reçue des six postes de district [PD] (Allaire *et al.*, 1994). Les PR sont répartis sur l’ensemble des lignes du réseau. Les PD, eux, sont implantés aux endroits critiques sur le réseau en matière de demande énergétique. L’énergie électrique nécessaire au réseau est fournie par six circuits de 12 470 volts d’une capacité individuelle de 12 MW. Ces circuits sont situés dans deux sous-stations indépendantes d’Hydro-Québec aux deux postes de distribution du centre de contrôle. Puisque la barre de guidage, qui assure la continuité électrique le long d’une ligne, est continue, la traction électrique est assurée par plus d’un PD à la fois. La contribution d’un PD à la traction d’un train dépend de la proximité physique de ce train avec un PR et la proximité de ce PR avec un PD. L’illustration suivante schématisse la distribution des PD par rapport aux PR.

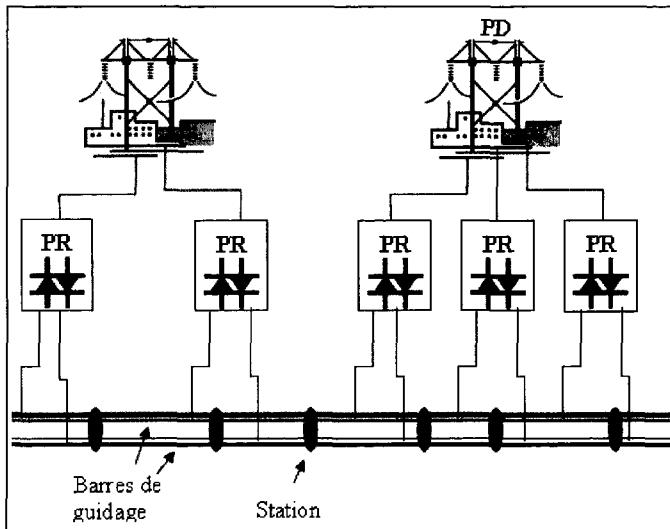


Figure F-10 : Exemple de répartition des postes de redressage et des postes de district sur le réseau de métro.

Le centre de contrôle

Le centre névralgique du fonctionnement du métro de Montréal est situé dans son poste de commandes et de contrôle [PCC]. Le PCC est aussi connu sous l'appellation de centre Providence parce qu'il se situe sur l'ancien terrain des Soeurs de la Providence (STM, 2006). Cependant, l'emplacement exact de ce centre se veut secret pour des raisons de sécurité et c'est pour cette raison que le bâtiment ne possède aucune adresse civique. Le PCC regroupe sous le même toit cinq équipes importantes pour toutes les activités du métro. La première équipe est composée de chefs contrôleurs qui coordonnent l'ensemble des activités d'exploitation. Puis, une équipe de contrôleurs du Centre de communications du métro [CCM] diffuse les messages à la clientèle et intervient en cas d'incident en station. Une autre équipe appelée agents répartiteurs du Centre opérationnel de la surveillance [COS], s'occupe de coordonner la présence des agents du Service de la surveillance dans le métro. Par la suite, une équipe de contrôleurs du Poste de commande et de mesures [PCM] est responsable de la distribution de l'énergie électrique et du fonctionnement des équipements fixes du métro. Enfin, l'équipe des contrôleurs du poste de commande et de contrôle

centralisés, coordonne les déplacements des trains dans le réseau. Afin de soutenir les équipes du PCC dans leur surveillance du réseau, un tableau de contrôle optique [TCO] communique par témoins lumineux tous les mouvements de chacune des rames de métro en temps réel. Pour assister les équipes de surveillance dans cette tâche, un ensemble d'ordinateurs est présent dans le PCC. Ces ordinateurs calculent et supervisent le contrôle des trains automatiquement. Ces machines sont capables de commander la consigne de vitesse de chacun des trains directement à ceux-ci via le pilote automatique. Aussi, sur le terrain, des opérateurs, des chefs de terminus et des chefs d'opérations sont en communication constante avec le PCC. L'image suivante présente une partie du TCO installé au PCC.

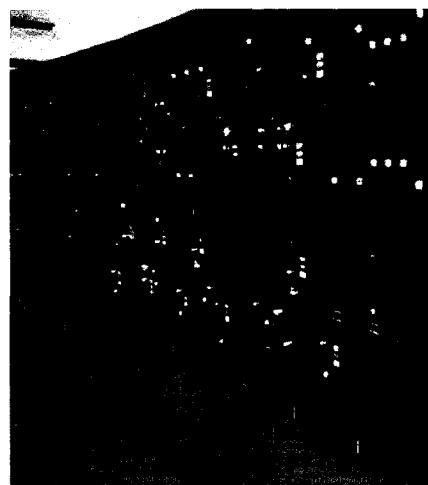


Figure F-11 : Tableau optique du poste de contrôle et de commande Providence.
Source : (STM, 2002b)

Les stations

Dans un esprit d'innovation, chacune des stations du réseau du métro de Montréal possède une architecture artistique unique. En effet, la conception architecturale des stations est l'œuvre d'un artiste différent pour chacune d'entre elles. Bien qu'elles révèlent un cachet unique, il n'en demeure pas moins que les stations ont toutes une structure identique. Effectivement, chacune des stations possède un quai de 152,4 mètres, soit la longueur exacte d'un train de trois éléments, des loges de changeurs, des escaliers et des portes d'entrées de style papillon. Sur l'ensemble du réseau, les

stations se regroupent en trois types spécifiques, à savoir les stations avec mezzanine au niveau du sol, les stations avec mezzanine enterrée et les stations construites dans le roc avec accès en tranchée. Ces trois types spécifiques de construction entraînent trois méthodes différentes d'accès aux stations et aux quais.

Quatre stations de correspondance font partie du réseau actuel. Autant qu'il était possible de le faire, les quais ont été aménagés de façon à ce qu'ils soient superposés pour ainsi faciliter le déplacement des usagers lors des correspondances. En fait, seule la station de correspondance Berri-UQÀM ne possède pas un tel aménagement.

Dans le but de faciliter le déplacement des usagers du métro vers un autre mode de transport, tel que les autobus ou les trains de banlieue, les stations de correspondances bimodales sont aménagées spécialement dans cette optique.

Le réseau compte au total huit terminus, ces stations sont utilisées afin de permettre aux trains de changer de direction. Seul l'opérateur du train peut accéder aux aiguillages qui permettent le changement de voie. Certains terminus abritent les garages où les trains sont stockés, le temps que l'offre de service les requiert de nouveau.

Le réseau actuel (sans le prolongement de la « ligne 2 – orange » vers Laval et avant les réfections du programme Réno-Systèmes) compte 290 escaliers mécaniques, deux trottoirs roulants, 681 tourniquets et 275 distributeurs de correspondances pour les autobus (Sarakinis, 2006). Aussi, sa superficie à partir des airs est de 1200 m² par station. Ce qui lui confère une superficie totale de 78 000 m². Il est intéressant de comparer cette superficie avec celle du territoire du centre-ville de Montréal qui est de 3,67 km² (Tremblay et al., 2001).

L'appellation topographique de chacune des stations peut variée à travers le temps, comme par exemple la station Berri-UQÀM, qui était, à l'époque de sa construction, dénommée Berri-de-Montigny. Afin d'éviter de la confusion et la correction de tous les plans de construction lors des changements, un numéro d'identification unique a été attribuer à chacune des stations et des interstations lors de leur construction. Ces numéros demeureront les mêmes pour toute la durée de vie de la station de métro. Le

tableau suivant présente la nomenclature associée à chacune des stations du réseau du métro de Montréal. Le premier chiffre désigne la ligne et les deux derniers sont un séquentiel suivant l'ordre des stations. La lettre est utilisée afin de distinguer les différentes infrastructures. La lettre « S » est associée à une station, tandis que les autres lettres sont associées aux différentes structures auxiliaires. Ainsi, par exemple, il est possible de retrouver des « R » et des « N », selon que la structure est un poste de redressement ou un poste de ventilation. La parité du séquentiel renseigne aussi sur la localisation de l'infrastructure. En effet, un nombre pair indique que la structure se retrouve en station et un nombre impair indique qu'elle se retrouve en interstation. Il est intéressant de constater qu'il n'existe pas de stations 2S26. Cette omission a été faite volontairement puisque cette interstation possède la propriété d'accueillir une nouvelle station si jamais le quartier obtient la demande requise. Les stations de correspondance possèdent plus d'une nomenclature, selon la ligne, dans ces cas, le nom utilisé est le nom de la ligne qui a été la première construite. Par exemple, la station Jean-Talon est nommée communément 2S72 par les employés de la STM.

Tableau F-1 : Nomenclature des stations

1S18	Angrignon	2S22	Côte-Vérité	5S32	Snowdon
1S20	Monk	2S24	Du Collège	5S34	CDN
1S22	Jolicoeur	2S28	Savane	5S36	UdM
1S24	Verdun	2S30	Namur	5S38	Edouard
1S26	De L'glise	2S32	Plamondon	5S40	Outremont
1S28	Lasalle	2S34	Côte-Ste-Catherine	5S42	Acadie
1S30	Charlevoix	2S36	Snowdon	5S44	Parc
1S32	Lionel-Groulx	2S38	Villa-Maria	5S46	Casteinai
1S34	Atwater	2S42	Vendôme	5S48	Jean-Talon
1S36	Guy	2S44	St-Henri	5S52	Fabre
1S38	Peel	2S46	Lionel-Groulx	5S54	Iberville
1S40	McGill	2S48	Georges-Vanier	5S56	St-Michel
1S42	Place des arts	2S50	Lucien-L'allier		
1S44	St-Laurent	2S52	Bonaventure	4S50	Berri-UQAM
1S46	Berri-UQAM	2S54	Square-Victoria	4S52	Jean-Drapeau
1S48	Beaudry	2S56	Place-D'armes	4S54	Longueuil-UdeS
1S50	Papineau	2S58	Champs-de-mars		
1S52	Frontenac	2S60	Berri-UQAM		
1S54	Préfontaine	2S62	Sherbrooke		
1S56	Joliette	2S64	Mont-Royal		
1S58	Pie 9	2S66	Laurier		
1S60	Viau	2S68	Rosemont		
1S62	Assomption	2S70	Beaubien		
1S64	Cadillac	2S72	Jean-Talon		
1S66	Langeller	2S74	Jarry		
1S68	Radisson	2S76	Crémazie		
1S70	H-Beaugrand	2S78	Sauvé		
		2S80	H-Bourassa		

ANNEXE G - L'ATTRACTIVITÉ DES STATIONS DE MÉTRO

Cette annexe apporte une évaluation du réseau du métro de Montréal sur son attractivité envers les personnes l'utilisant et les usagers potentiels.

Dans son rôle de leader en transport en commun dans la province du Québec, la STM a le souci d'augmenter l'achalandage de son réseau de transport. Afin d'augmenter l'achalandage dans le métro de Montréal, il est nécessaire d'augmenter l'attractivité de ce mode. Dans ce but, il est important de répondre aux besoins des usagers. Les usagers ont besoin de se sentir en sécurité, de s'orienter et d'être informés des heures de passage des prochains véhicules, tout en étant confortables à l'intérieur de ceux-ci. Les stations jouent un rôle primordial pour les usagers d'un transport en commun, tel qu'exprimé dans la citation suivante.

« When traveling by train, the station is the first and last encounter a passenger experiences. Every passenger must access the station before boarding the train and must exit the station upon arrival at the final destination. »

(J. P. Li, 2000)

Cette citation rappelle à quel point les stations ont de l'importance en ce qui concerne les sentiments de sécurité pour l'usager. Dans un métro, le sentiment d'insécurité est grand chez plusieurs personnes malgré le fait que la probabilité de victimisation à l'intérieur de celui-ci soit plus faible qu'à bien d'autres endroits à Montréal, comme démontré dans les prochaines citations.

« [En 1995] La probabilité individuelle d'être la cible d'un vol sur la personne ou d'une agression est 6 et 8 fois plus élevée dans le métro (1,8 par 100 000) que dans les lieux de travail et les foyers domestiques, mais elle est en revanche inférieure à la probabilité équivalente de victimisation personnelle dans les rues de Montréal (2,9 par 100 000), dans les sites de magasinage (3,6 par 100 000) et

ne diffère guère de celle qui prévaut dans les destinations de loisir (1,6 par 100 000). »

« En bref, les risques de victimisation personnelle dans le métro seraient environ 8 fois moins élevés qu'ils pourraient l'être, puisque les occasions de contact sont 38 fois plus élevées et que les risques de victimisation personnelle sont seulement 5 fois plus élevés (38/5 = 7,6). »

(Tremblay et al., 2001)

L'influence de reportages sensationnalistes ou des films présentant des actes violents se déroulant dans un métro, l'affluence de nombreuses personnes, la proximité de celles-ci, la complexité du réseau et l'angoisse de se perdre sont tous des facteurs qui peuvent décourager une personne voulant s'aventurer dans un métro. C'est pourquoi il est important de s'attaquer au problème de perception d'insécurité que plusieurs peuvent avoir, comme l'exprime cette citation :

« On the railways, customer satisfaction surveys have consistently reported that although recorded incidents of crime and nuisance are relatively low, customers perceive their personal risks to be significantly higher, discouraging many from using rail transport. »

(Cozens et al., 2003)

Concrètement, la sécurité, ou la perception de sécurité, peut être améliorée de différentes façons. Une façon efficace mais onéreuse de le faire est d'augmenter la présence des agents de sécurité ou de leur octroyer des pouvoirs légaux plus grands tout en les formant mieux. Une autre méthode, un peu moins coûteuse, est d'augmenter le nombre de caméras de surveillance et de mieux les superviser. Il est aussi possible d'augmenter le sentiment de sécurité simplement grâce à un réaménagement du mobilier à l'intérieur des stations et des couloirs.

L'optimisation de l'espace de déplacement, à l'intérieur des stations, se fait à l'aide de simulations. La réalité virtuelle est un outil efficace de simulation qui permet de mesurer le niveau d'insécurité des gens à l'intérieur de stations ou de couloirs. En effet, cet outil permet aux sujets d'explorer un monde réaliste selon l'angle de vue qu'ils désirent. Cela est tout à fait impossible avec des photographies ou une séquence

vidéo. Ainsi, grâce à cette technique, il est possible de déterminer les aménagements optimaux qui permettent de réduire le sentiment d'insécurité de la plupart des usagers avant même de procéder à des réaménagements onéreux. L'extrait suivant permet de mettre en lumière la problématique du sentiment d'insécurité vis-à-vis l'aménagement des stations.

« [...] it has now clearly been established that there is a link between managing the design of facilities and the reduction of fear of crime. »

(Cozens et al., 2003)

En plus de mesurer le niveau d'inconfort des usagers, les simulations servent à optimiser la répartition des distributrices des titres de transport. Elles servent aussi au niveau de la validation des impacts d'un changement de tarif ou de l'arrivée de nouveaux forfaits. De plus, les simulations permettent de déterminer l'impact de la synchronisation des trains sur la mobilité dans les stations de correspondance. D'ailleurs, l'impact de la maintenance des équipements (pannes ou interruptions de service), l'architecture des stations et, finalement, l'évaluation des stations dans leur capacité à permettre aux usagers d'évacuer de façon urgente lors d'incidents majeurs sont des facteurs qui peuvent être évalués aussi bien par des simulations en réalité virtuelle que par l'utilisation de logiciels de simulation qui modélisent les comportements de foules.

Le temps d'intervention lors d'un incident parmi les usagers est aussi un facteur important dans l'amélioration du sentiment de sécurité de ceux-ci. Aujourd'hui, le développement de la technologie offre des caméras de surveillance de petite taille, mais qui transmettent des images de grande qualité et à faible coût. La surveillance au moyen de ces dispositifs permet une présence dans plusieurs lieux à la fois par un minimum de personnel. Cependant, l'observation, pendant de longues heures, d'écrans de téléviseur peut rendre l'opérateur quelque peu distrait. C'est pourquoi l'étude de Aubert *et al.* (1999) s'appuie sur des techniques d'imagerie numérique, à l'aide d'un algorithme, grâce auxquelles les stationnarités à l'intérieur d'une foule sont détectées. Une fois détectées, ces anomalies sont présentées sur un écran et indiquées afin de

permettre à l'opérateur de prendre une décision quant à la nécessité d'une intervention. Selon cet article, un couloir est une zone de transition, donc une stationnarité est un bon indice d'anomalie.

La formation des agents de sécurité est un autre facteur permettant d'augmenter le sentiment de sécurité des usagers. Ceux-ci sont responsables de l'évacuation des usagers en cas d'incidents majeurs. Ils ont l'importante tâche de donner les instructions à chacun sur les sorties disponibles. Comme l'indique la citation suivante, les gens dans une foule ont tendance à ignorer les indications visuelles.

« People actually tend to leave a building by the route they know best. [...] there is also a tendency to ignore emergency exit points, even when clearly displayed »

(Marsden, 1998)

Les calculateurs de trajets répondent au besoin primaire d'un déplacement qui est de sauver du temps en plus de sécuriser les usagers en leur permettant de visualiser leur trajet. La majorité des grands centres urbains offrent à ses citoyens, via l'Internet, une interface leur permettant de connaître avec exactitude les circuits optimaux à emprunter. La force de ces calculateurs de trajets est leur capacité de gérer les horaires de plusieurs modes de transport (autobus, trains, métro, etc.). L'usager n'a qu'à spécifier l'heure de son déplacement et les points de départ et de destination. Selon l'agence de transport, le résultat du parcours est présenté soit sous forme de tableau alphanumérique, soit sous la forme de tracé sur une carte géoréférencée ou les deux. Par exemple, la Société de Transports de Montréal offre à ses usagers le calculateur de trajets Tous Azimuts sur son site Internet. Ce calculateur de trajets propose un ou plusieurs itinéraires en considérant la journée et l'heure du déplacement, facteurs qui sont spécifiés par l'usager. Cependant, ce calculateur de trajets ne prend pas en compte les temps de marche de l'usager à l'intérieur des stations et le temps de correspondance à l'intérieur du métro. Il en résulte une imprécision dans le calcul du trajet, comme soulevé dans cette citation :

« [...] mais le niveau de résolution du réseau du métro est le noeud station. Il existe, à l'heure actuelle, un trou spatio-temporel dans l'application Tous Azimuts, car le réseau souterrain du métro n'a jamais été codifié. »

(Sarakinis, 2006)

Les calculateurs de trajets d'aujourd'hui devraient tenir compte, non seulement des horaires des modes de transport, mais aussi, des temps de marche pour les correspondances et de la dépense énergétique des usagers afin d'effectuer le parcours. Ce faisant, l'usager pourrait ainsi maximiser son temps d'attente en station afin de se positionner sur le quai à l'emplacement d'attente idéal afin de minimiser son effort de marche à l'arrivée. Pour ce faire, les stations du réseau doivent être codifiées à l'aide d'un ensemble de nœuds et de liens dans un environnement en trois dimensions puisque les stations de métro requièrent souvent l'utilisation d'escalier pour y accéder.

Toujours dans le but d'afficher à l'usager le trajet le plus court, tout en renforçant le sentiment de sécurité, la réalité virtuelle est un outil qui peut être utile. En effet, l'utilisation d'une technique avancée d'imagerie tridimensionnelle permettrait d'aider les usagers dans leur visualisation de l'accès aux véhicules par la modélisation des stations. De plus, l'utilisation du langage de programmation VRML permettrait d'espérer que ces visualisations soit accessibles par le biais de l'Internet et intégrées aux calculateurs de trajets comme Tous Azimuts de la STM. Bien que les calculateurs de trajets pour les citoyens de la grande région métropolitaine soient déjà de bonne qualité, l'ajout d'une telle visualisation permet à tous d'obtenir l'information à un niveau de détail précis et réaliste visuellement. Comme en témoigne cette citation, l'avenir des calculateurs de trajets passe par la réalité virtuelle disponible via l'Internet afin de visualiser les trajets en transport collectif.

« La réalité virtuelle est devenue facilement accessible. Il reste à la domestiquer plus finement afin d'entreprendre la réalisation d'un nouveau médium, à ce moment indéfini, qui permettrait à la fois d'informer et d'éduquer, voire de conditionner l'usager de transport en commun à s'offrir lui-même de meilleurs services de transport par le biais d'une meilleure information. »

(Chapleau et al., 2003)

Tous les usagers ont des exigences bien à eux envers les transports en commun, cependant, il est important de répondre aux exigences générales. En effet, les sentiments de sécurité et de bien-être sont les premières exigences auxquelles une agence de transport doit répondre afin d'espérer augmenter son achalandage. Plusieurs techniques sont envisageables dont, l'ajout de système de surveillance et le réaménagement des stations. Aussi, une représentation juste et précise des trajets et des itinéraires à emprunter grâce à un calculateur de trajets, augmente le niveau de confiance des futurs usagers et contribue ainsi à réduire de possibles sentiments d'insécurité.

Aussi, afin d'améliorer l'offre de service, il est nécessaire de connaître avec justesse l'utilisation qui en est faite par les usagers. Pour ce faire des systèmes de comptage automatique des passagers ont fait leur apparition. Les systèmes de comptage des passagers sont implantés depuis fort longtemps dans les agences de transport. Les données recueillies par ces systèmes de comptage sont archivées pour fin d'étude. Cependant, à l'intérieur de la plupart des agences de transport, ces systèmes sont basés sur le compte manuel qui se fait périodiquement. Peu d'agences de transport ont implanté des systèmes de comptage de passager automatique [APC]. Comme mentionnée au premier chapitre, l'apparition des systèmes AVL permet aux planificateurs de transport d'obtenir des données sur leur flotte dans l'espace et dans le temps. Ces systèmes, associés à un APC, permettent de connaître avec précision la charge à bord tout au long du parcours des véhicules.

Plusieurs technologies sont utilisées dans la conception des systèmes APC, dont des matelas de pression et des capteurs infrarouges. Cependant, ces technologies seules ne

peuvent répondre aux exigences des planificateurs. Elles doivent être couplées à un système de localisation de véhicule automatique dans le but de connaître précisément la charge à bord et ses variations dans le temps. De plus, ces types de capteurs ne permettent pas d'obtenir les habitudes des usagers qui utilisent le réseau puisque l'usager capté demeure anonyme.

Depuis quelques années, un moyen efficace dans la collecte des titres de transport a fait son apparition avec la carte à puce. Ces cartes possèdent une puce informatique qui permet de valider le paiement des voyages de chacun des usagers de façon automatique. L'avantage marketing est clair pour les agences de transport, il leur est dorénavant possible d'ajuster le montant des prélèvements sur la carte, selon les caractéristiques des journées ou de la clientèle, sans en modifier le moyen. Lorsque ce système de perception est implanté dans un réseau où les AVL sont actifs, la combinaison de plusieurs informations, dont l'enregistrement de la transaction, l'heure de celle-ci, le véhicule dans lequel elle a lieu et l'emplacement géographique du véhicule, devient envisageable. En plus de permettre de connaître finement la charge à bord à tout instant et partout sur le réseau, cette technologie permet, suite à un traitement des données, de déterminer les déplacements de chacun des usagers. Comme le présente la citation suivante, la volonté, par les planificateurs, d'ajouter de l'information sur les cartes à puces afin de connaître finement l'usager et ses habitudes, est grande et permet d'aller beaucoup plus loin que la simple planification du transport. Cependant, dans un but de confidentialité, l'information contenue sur une carte à puce demeure restreinte pour l'instant.

« [...] la société de transport de Washington (Washington Metropolitan Area Transit Authority, WMATA) prévoit d'ajouter des données d'identification personnelle sur ses cartes-tickets à puces afin de contrer le terrorisme, mesure qui n'est pas sans poser des problèmes de confidentialité. »

(Trépanier et al., 2005)

Néanmoins, les planificateurs ont l'occasion de combiner les données recueillies à partir des cartes à puce avec les données totalement désagrégées des enquêtes origine-

destination. Ainsi, les profils sociaux-démographiques peuvent être associés aux détenteurs des cartes à puce selon leurs habitudes de déplacement sans ajouter d'informations confidentielles sur les cartes elles-mêmes. La mise en place des systèmes AVL et APC apporte, aux sociétés de transport, une quantité nouvelle et impressionnante de données qui peuvent masquer les informations essentielles à retenir. C'est pourquoi un traitement approprié doit être effectué sur celles-ci avant leur utilisation.