



Optimisation de la régularité du service de transport en commun dans le but d'éviter le groupage d'autobus au Réseau de Transport de la Capitale

Mémoire

Alexandra Lapointe

**Maîtrise en sciences de l'administration - opérations et systèmes de décision -
avec mémoire**

Maître ès sciences (M. Sc.)

Québec, Canada

© Alexandra Lapointe, 2018

**Optimisation de la régularité du service de transport en
commun dans le but d'éviter le groupage d'autobus au
Réseau de Transport de la Capitale**

Mémoire

Alexandra Lapointe

Sous la direction de :

Leandro C. Coelho, directeur de recherche

Résumé

Le projet d'optimisation de la régularité du service de transport en commun a pour but de trouver des solutions au problème de groupage d'autobus au Réseau de Transport de la Capitale. Le phénomène est caractérisé par des intervalles irréguliers entre les passages d'autobus aux arrêts. Ce sont les retards encourus par certains autobus qui sont à l'origine du problème. Les retards relèvent d'événements sporadiques qui sont influencés par les caractéristiques physiques et temporelles d'un parcours. Cette recherche se penche plus particulièrement sur le Métrobus 807, parcours très achalandé et parcourant l'axe entre les pôles ouest et est de la Ville de Québec. L'objectif est de proposer des solutions au problème et de les comparer entre elles afin de faire les recommandations adéquates quant à une potentielle implantation.

Actuellement, des intervalles irréguliers, conséquences du phénomène de groupage d'autobus, sont notés à plusieurs endroits sur le réseau entre autres sur le parcours 807. Cela nuit à l'efficacité du réseau dans son ensemble et cause des frustrations chez les utilisateurs de transport en commun dans la Ville de Québec.

L'éventail des solutions proposées dans le cadre de cette recherche se compose de solutions à la fois appliquées individuellement et de manière combinée. Les solutions proposées agissent sur les sources potentielles de retard et visent à rétablir rapidement les intervalles suite à la détection d'un événement de groupage. Les solutions sont ensuite testées en contexte de simulation à événements discrets afin de prédire leur performance en situation réelle. Le simulateur permet de tester les solutions dans un environnement dynamique où l'on peut préalablement à l'implantation quantifier et qualifier les effets escomptés de chaque solution.

Les recommandations formulées permettent d'améliorer la régularité du service de transport en commun, de maximiser l'utilisation des ressources et d'offrir à l'utilisateur de transport commun un confort et une expérience améliorée.

Summary

The regularity optimization project of the public transit service aims at finding solutions to the bus bunching problem at the Réseau de Transport de la Capitale. The phenomenon is characterized by irregular intervals between the transits of buses at stops. The delays incurred by certain buses are at the origin of the problem. Delays are caused by sporadic events that are influenced by the physical and temporal characteristics of a bus line. This research focuses on the Métrobus 807, a crowded bus route that travels the axis between the West and East poles of Quebec City. The goal is to suggest solutions to the problem and to compare them with each other in order to make the proper recommendations for a potential implementation.

Currently, irregular intervals, consequences of the bus bunching phenomenon, are noted in several places on the network as well as on the 807 bus route. The efficiency of the network as well as the public transit user experience in Quebec City is negatively affected.

The suggested solutions in the present research include solutions applied individually as well as combined with others. The suggested solutions act on the potential sources of delays and are meant to quickly restore the intervals following the detection of a bus bunching event. The solutions are then tested under a discrete event simulation to predict their performance under real circumstances. The simulation allows to test the solutions in a dynamic environment in which it is possible to quantify and qualify the expected results prior to an implementation.

The recommendations made in this research allow to improve the regularity of the public transit service, to maximize the use of resources and to offer to the public transit user a comfortable and enhanced experience.

Table des matières

Résumé	iii
Summary	iv
Table des matières	v
Liste des tableaux	ix
Liste des figures	xi
Remerciements	xii
Chapitre 1	1
Introduction	1
1.1. Mise en contexte	1
1.2. Problématique	5
1.3. Revue de littérature	7
1.4. Objectifs	17
1.5. Méthodologie	17
1.7. Organisation de l'essai	19
Chapitre 2	20
Réseau global du RTC	20
2.1. Caractéristiques principales du réseau	20
2.2. Offre de service	22
2.3. Méthodes de gestion et de planification	23
2.4. Ressources et flux des entités	24
2.5. Le Métrobus 807	26
Chapitre 3	30
Description du problème	30
3.1. Description du problème à résoudre	30
3.1.1. Mesure d'irrégularité	30
3.1.3. Identification des périodes et endroits problématiques	32
3.1.2. Exemples réels d'une situation de groupage d'autobus	36
Chapitre 4	38
Modélisation et structure de la simulation	38

4.1. Types d'événements.....	38
4.2. Structure de la simulation.....	38
4.3. Table d'événements.....	39
4.4. Scénarios	42
4.5. Méthodes d'estimation des données de la simulation	42
4.5.1. Temps d'immobilisation	43
4.5.2. Temps de déplacement.....	46
4.5.3. Descentes.....	49
4.5.4. Montées	52
4.6. Validation du modèle	57
4.6.1. Validation des caractéristiques du parcours	57
4.6.2. Validation des mesures d'irrégularité.....	66
Chapitre 5.....	70
Méthodes de résolution	70
5.1. Types de méthodes de résolution	70
5.2. Choix des méthodes de résolution.....	72
5.3. Seuils de détection.....	72
5.4. Modélisation des solutions uniques.....	73
5.4.1. Saut d'arrêts.....	73
5.4.2. Limite de montées	73
5.4.3. Utilisation des feux de priorité	73
5.4.4. Immobilisation	75
5.5. Modélisation des solutions combinées	76
Chapitre 6.....	80
Outil d'aide à la décision.....	80
6.1. Indicateurs de performance évalués	80
6.2. Forme de l'outil d'aide à la décision.....	82
Chapitre 7.....	84

Résultats	84
7.1. Instances.....	84
7.2. Paramètres de la simulation.....	84
7.3. Résultats de référence.....	84
7.4. Abréviations	87
7.5. Observations générales.....	87
7.5.1. Seuil de détection optimal	87
7.5.2. Performance des différentes limites de capacité	89
7.5.3. Contexte de réussite du saut d'arrêts et de la limite de montées	90
7.6. Analyse des résultats	91
7.6.1. Analyse des solutions uniques.....	91
7.6.2. Analyse des solutions combinées	98
7.7. Recommandations	104
7.8. Implantation	106
Chapitre 8	108
Conclusion.....	108
Bibliographie.....	109
Annexe 1	112
Tracés des parcours offerts par le RTC	112
Annexe 2	113
Réseau de voies réservées pour l'arrondissement Sainte-Foy-Sillery-Cap-Rouge	113
Annexe 3	115
Table de données pour l'évaluation des temps de déplacement par scénario	115
Annexe 4	117
Table de probabilités cumulées de descente par scénario	117
Est – pointe du matin.....	117
Est – pointe du soir.....	120
Ouest – hors pointe.....	124
Annexe 5	128
Table de probabilités cumulées des montées par scénario	128
Annexe 6	129

Résultats de référence.....	129
Est – pointe du matin.....	129
Est – pointe du soir.....	130
Ouest – hors pointe.....	131

Liste des tableaux

Tableau 1 : Résultats du sondage qualité : satisfaction en pourcentage.....	6
Tableau 2 : Sommaire de la revue de littérature.....	16
Tableau 3 : Mesures d'irrégularité (en pourcentage) selon deux méthodes de calcul.....	31
Tableau 4 : Ampleur des mesures d'irrégularité par heure dans chaque direction.....	32
Tableau 5 : Ampleur des mesures d'irrégularité par heure par période de la semaine.....	33
Tableau 6 : Moyenne des mesures d'irrégularité par arrêt (en pourcentage)	34
Tableau 7 : Moyenne des montées par arrêt en situation d'écarts positifs et négatifs	36
Tableau 8 : Comparaison des mesures d'irrégularité (en pourcentage) lors de conditions routières difficiles.....	36
Tableau 9 : Exemple 1 de groupage tiré des données réelles	36
Tableau 10 : Exemple 2 de groupage tiré des données réelles	37
Tableau 11 : Table d'événements.....	40
Tableau 12 : Calcul de la capacité d'un véhicule articulé.....	44
Tableau 13 : Exemples de calcul du temps de déplacement ajusté	47
Tableau 14 : Extrait de la table de probabilités cumulées de descente en Est - pointe du soir	50
Tableau 15 : Total réel et ajusté de descentes pour chacun des arrêts en Ouest - hors pointe	51
Tableau 16 : Extrait de la table de probabilités cumulées des montées en Est - pointe du matin	54
Tableau 17 : Écart des charges, montées et descentes aux arrêts (en personnes) – Est – pointe du matin	58
Tableau 18 : Écart des charges, montées et descentes aux arrêts (en personnes) – Est – pointe du soir	59
Tableau 19 : Écart des charges, montées et descentes aux arrêts (en personnes) – Ouest – hors pointe	61
Tableau 20 : Différence entre les moyennes des temps d'immobilisation de la simulation et de la réalité (en secondes)	64
Tableau 21 : Différence entre les moyennes des temps de déplacement de la simulation et de la réalité (en secondes)	66
Tableau 22 : Force des mesures d'irrégularité (en %) par arrêt pour les trois scénarios.....	67
Tableau 23 : Mesures d'irrégularité pour la simulation et la réalité (en pourcentage).....	69
Tableau 24 : Heures de passage et intervalles (en secondes) aux arrêts en situation de groupage ...	77
Tableau 25 : Heures de passage et intervalles (en secondes) aux arrêts en situation de groupage avec immobilisation comme méthode de résolution	78

Tableau 26 : Heures de passage et intervalles (en secondes) aux arrêts en situation de groupage avec immobilisation et méthode de résolution appliquée à l'autobus retardataire.....	78
Tableau 27 : Temps d'attente perçus et réels selon la période de la journée (en minutes)	81
Tableau 28 : Indicateurs de performance relatifs à l'irrégularité des intervalles pour les scénarios de référence.....	85
Tableau 29 : Indicateurs de performance relatifs au temps de parcours pour les scénarios de référence	85
Tableau 30 : Indicateurs de performance relatifs au temps de parcours et de voyage par passager pour les scénarios de référence	86
Tableau 31 : Indicateurs de performance relatifs à la charge à bord pour les scénarios de référence	86
Tableau 32 : Abréviations pour représenter les solutions	87
Tableau 33 : Comportement des moyennes des mesures d'irrégularité selon le seuil de détection choisi	88
Tableau 34 : Résultats de la limite de montées pour le scénario Est - pointe du soir	89
Tableau 35 : Tableau des résultats des meilleures solutions uniques retenues pour le scénario Est - pointe du matin.....	92
Tableau 36 : Tableau des résultats des meilleures solutions uniques retenues pour le scénario Est - pointe du soir.....	95
Tableau 37 : Tableau des résultats des meilleures solutions uniques retenues pour le scénario Ouest – hors pointe.....	97
Tableau 38: Tableau des résultats des meilleures solutions combinées retenues pour le scénario Est - pointe du matin.....	99
Tableau 39 : Tableau des résultats des meilleures solutions combinées retenues pour le scénario Est - pointe du soir.....	101
Tableau 40 : Tableau des résultats des meilleures solutions combinées retenues pour le scénario Ouest – hors pointe	103
Tableau 41 : Comparaison des temps de parcours des autobus.....	105

Liste des figures

Figure 1 : Population active par moyen de transport pour la Ville de Québec.....	1
Figure 2 : Occupations des utilisateurs du RTC.....	4
Figure 3 : Territoire desservi par le RTC	20
Figure 4 : Emplacements des stationnements incitatifs Parc-O-Bus.....	21
Figure 5 : Parts de déplacements par type de service au RTC	22
Figure 6 : Tracé du parcours 807	28
Figure 7 : Comparaison des intervalles lors de deux situations distinctes	31
Figure 8 : Structure de la simulation	39
Figure 9 : Dynamique des événements	41
Figure 10 : Densité temporelle des arrivées de passagers aux arrêts entre deux passages consécutifs d'autobus pendant la période de pointe du matin	55
Figure 11 : Diagramme en boîtes des temps de parcours – Est – pointe du matin.....	62
Figure 12 : Diagramme en boîtes des temps de parcours – Est – pointe du soir.....	62
Figure 13 : Diagramme en boîtes des temps de parcours – Ouest – hors pointe.....	63
Figure 14 : Chronologie des heures de passage à l'arrêt t en situation de groupage.....	70
Figure 15 : Chronologie des heures de passage à l'arrêt $t+1$ - Solution appliquée à l'autobus retardataire.....	71
Figure 16 : Chronologie des heures de passage à l'arrêt t – Solution appliquée à l'autobus suivant le retardataire.....	71
Figure 17 : Exemple d'extraction de l'outil d'aide à la décision	83

Remerciements

La réalisation de ce projet de recherche a été teintée de tout l'appui fourni au cours des derniers mois par Leandro C. Coelho. Tout d'abord, j'aimerais le remercier de m'avoir présenté ce projet pour lequel mon intérêt est inégalé. La liberté que tu m'accordes au quotidien est pour moi une marque de confiance qui n'a pas d'égal. Cette confiance portée à mon égard m'a permis de me dépasser constamment et de repousser les limites. Les aptitudes en programmation que j'ai développées au fil de la réalisation de ce mémoire sont précieuses et s'avèreront indispensables pour le futur. Cette expérience influencera certainement les décisions que je prendrai et ces aptitudes seront certainement la source de plusieurs opportunités dans les années à venir. Tu as démystifié la nature de la recherche pour moi et je comprends aujourd'hui, grâce à toi, toutes les contributions qui en découlent.

Mon parcours universitaire n'aurait jamais été le même si ce n'avait été de notre rencontre il y a de cela plusieurs années. Les opportunités qui m'ont été offertes académiquement et professionnellement, je les dois entre autres à ta confiance envers mes compétences et ma capacité à relever des défis jamais auparavant relevés. Le temps que tu accordes à tes étudiants et les encouragements fournis à ceux-ci sont très appréciés de tous. Je me considère très chanceuse d'avoir pu compter sur un tel mentor depuis le tout début de mon arrivée à l'Université Laval.

J'aimerais également remercier le Réseau de Transport de la Capitale, particulièrement M. Denis Matarangas et son équipe, pour leur grande disponibilité. Vos réponses à mes questions ainsi que le temps passé à discuter de la réalité quotidienne sur le réseau m'a permis d'élaborer un programme de simulation complet. Vous m'avez également accordé une belle indépendance quant à la proposition de différentes solutions ne limitant pas ma créativité.

Finalement, je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à cet accomplissement duquel je suis immensément fière.

Chapitre 1

Introduction

1.1. Mise en contexte

Au Canada, en 2011, 12% de la population active occupée, nécessitant quotidiennement de se rendre du domicile au lieu de travail, utilisait le transport en commun pour se déplacer (Statistique Canada, 2016). Dans la Ville de Québec plus précisément, ce nombre était de 11,3% lors du recensement de 2011. Bien qu’une augmentation des utilisateurs des services de transport public soit notée, il demeure que la majorité se déplace à l’aide d’une automobile privée soit à titre de conducteur ou de passager. Le transport en commun contribue au développement de milieux urbains durables en cette période où l’on porte une attention particulière à la réduction des émissions de gaz à effets de serre (GES). La Figure 1 présente les proportions pour chacun des moyens de transport utilisés par la population active dans la Ville de Québec lors du recensement de 2006 (Statistique Canada, 2006).

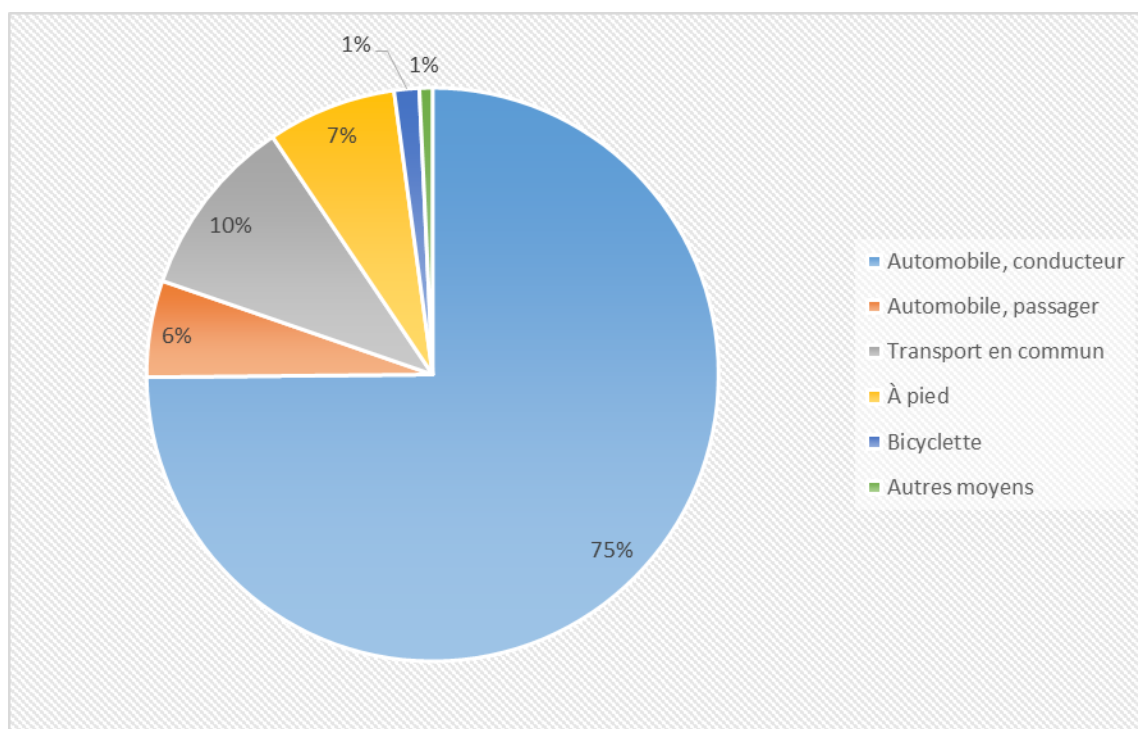


Figure 1 : Population active par moyen de transport pour la Ville de Québec

En effet, ce sujet d’importance entraîne la mise en place de mesures collectives visant la réduction des émissions de GES qui contribuent au réchauffement climatique planétaire. Au Québec, plus

particulièrement, l'objectif visé est de réduire les émissions de 37,5% d'ici 2030 par rapport au niveau de 1990 (Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques, 2015). Cela en fait la cible provinciale la plus élevée au Canada. C'est par l'entremise de plusieurs programmes et mesures que la province espère contrevenir aux impacts du réchauffement climatique. Parmi ces conséquences se trouvent les risques accrus de problèmes de santé, la modification de l'écosystème, la fragilisation des infrastructures par les phénomènes climatiques inhabituels ainsi que les obstacles climatiques liés à certains secteurs économiques tels que l'agriculture, la foresterie ou encore le tourisme hivernal (Gouvernement du Québec, 2015a). Par exemple, le phénomène de gel-dégel s'amplifie de par sa durée et son intensité ce qui a pour effet de grandement fragiliser nos infrastructures telles que les routes sur lesquelles nous circulons. Dans le même ordre d'idées, certaines industries comme les centres de ski alpin souffrent de saison écourtée par le réchauffement climatique. Il en ressort que les émissions de GES et les phénomènes qui en découlent ont des conséquences pour le moins néfastes, et ce, à plusieurs niveaux.

En 2015, 24% des GES émis au Canada provenaient du secteur des transports (Environnement et Changement climatique Canada, 2017). Cela en fait le deuxième secteur le plus polluant derrière le secteur de l'exploitation pétrolière et gazière. Le secteur des transports se subdivise en plusieurs autres catégories telles que le transport de passagers et le transport de marchandises. Pour sa part, le transport de passagers qu'il s'agisse de transport public ou de transport à l'aide d'un véhicule personnel est responsable pour un peu plus de la moitié des émissions annuelles de dioxyde de carbone au Canada liées au secteur des transports (Environnement et Changement climatique Canada, 2017). De ce pourcentage, le transport en commun compte pour 8% des émissions liées au transport de passagers. La même source indiquait qu'entre 1990 et 2015, l'augmentation des émissions de 42% s'explique majoritairement par l'augmentation du nombre de véhicules circulant sur les routes. Bien conscient de l'impact du secteur des transports sur le réchauffement climatique, le gouvernement québécois a lancé de nombreux programmes dont plusieurs touchent plus particulièrement ce secteur. Il existe entre autres le Programme d'aide au développement du transport collectif qui a pour but d'appuyer les organismes de transport dans l'amélioration et l'accroissement de leur offre de service (Gouvernement du Québec, 2015b). Le but ultime d'un tel programme est de bien évidemment réduire le nombre de véhicules sur les routes. La conclusion qui s'en dégage est que le transport collectif est certainement moins polluant que le véhicule privé.

En effet, une étude américaine estime qu'une automobile privée dégage 270 grammes de CO₂, principal responsable de l'effet de serre, par passager par kilomètre parcouru alors qu'un autobus de passagers en émet 180 grammes (WWF-Canada, 2012). Évidemment, l'autobus émet des quantités

beaucoup plus importantes de CO₂ qu'une automobile, mais celui-ci est conçu pour accueillir un plus grand nombre de passagers ce qui en réduit son émission par passager. L'utilisation des autobus de transport en commun demeure donc une option viable tant et aussi longtemps que son nombre de passagers le justifie. L'émission par passager augmente donc considérablement dans le cas d'un autobus dont la charge est insuffisante.

Il n'est pas suffisant de penser qu'un individu changera ses habitudes liées au transport simplement dans le but de réduire son empreinte écologique. Il faut comprendre que l'utilisateur de transport en commun espérera tirer avantage de ce choix puisqu'il n'offre pas la même flexibilité qu'une voiture. Le transport en commun a pour principal avantage de coûter moins cher que le véhicule personnel. Il requiert toutefois du consommateur de devoir se déplacer d'un ou vers un arrêt qui peut être éloigné du lieu de résidence ou de travail, d'ajuster son horaire avec celui de l'autobus dont il est passager, de prévoir un temps d'attente à l'arrêt, de profiter d'un confort limité en période de fort achalandage et d'allonger la durée de ses déplacements. Une récente étude estime que la durée moyenne d'un trajet entre le domicile et le lieu de travail en transport en commun est près du double d'un trajet en véhicule traditionnel (Statistique Canada, 2017). En effet, la même étude a évalué qu'en automobile, camion ou fourgonnette la durée est en moyenne de 23.7 minutes alors que celle en transport en commun par autobus est de 40.4 minutes. Récemment, le président du Réseau de Transport de la Capitale, M. Rémy Normand affirmait en entrevue que le transport en commun demeurerait une option intéressante aux yeux de la population tant et aussi longtemps que la durée du trajet en autobus n'est pas plus de 60% plus longue que le même trajet en automobile (Morin, 2017). Cela explique en partie le choix du navetteur d'utiliser un véhicule personnel aux dépens d'un mode de transport en commun. S'ajoutent ensuite à cela les temps d'attente supplémentaires à l'arrêt. La Victoria Transport Policy Institute (2007) s'est penchée sur la valeur du temps lié au transport. Il a été démontré que les usagers estimaient la valeur du temps d'attente être deux à cinq fois plus grande que celle du temps passé à bord de l'autobus lui-même. La valeur du temps d'attente est donc évaluée être cinq fois plus grande lorsque le temps d'attente est anormalement long et que les conditions liées au confort sont inadéquates. Dans une situation d'attente normale, la valeur est tout de même deux fois plus grande. À la lumière de tous ces éléments qui influencent les décisions liées au choix d'un moyen de transport, il importe donc d'améliorer la qualité de l'offre de service de transport en commun pour inciter le consommateur à modifier ses habitudes liées à ses déplacements afin d'augmenter la proportion des utilisateurs de transport en commun et ainsi réduire les émissions de GES.

Dans l'agglomération de Québec, il s'agit du Réseau de Transport de la Capitale (RTC) qui assure les services reliés au transport en commun par autobus. La société est réputée être la 86^e plus importante entreprise québécoise comptant 1595 employés et possédant 478.88 millions de dollars d'actifs (Les 500 au Québec, 2017). Elle dessert un territoire d'un peu plus d'un demi-million d'habitants dont 97% habitent à moins de 800 mètres d'un arrêt d'autobus (Réseau de Transport de la Capitale, 2017a). Selon son plus récent rapport d'activité, le RTC offre 135 parcours différents qui couvrent 870 kilomètres de réseau. Une cartographie des parcours offerts par le RTC est disponible à l'Annexe 1.

Quatre types de service sont offerts par le RTC. Ceux-ci seront décrits plus en détail au Chapitre 2, mais il importe de savoir qu'ils permettent de répondre à plusieurs catégories d'utilisateurs. Certains parcours se concentrent dans les centres d'intérêt alors que d'autres permettent l'accès aux banlieues et aux quartiers résidentiels. Certains services sont plus forts en heures de pointe alors que d'autres permettent les déplacements à toutes heures de la nuit.

En majorité, les utilisateurs des services de transport en commun dans la Ville de Québec sont des travailleurs et des étudiants ce qui explique en grande partie pourquoi 61% des utilisateurs sont clients plus de 3 jours par semaine. La Figure 2 montre les proportions d'utilisateurs du transport en commun à Québec par occupation (Réseau de Transport de la Capitale, 2017b).

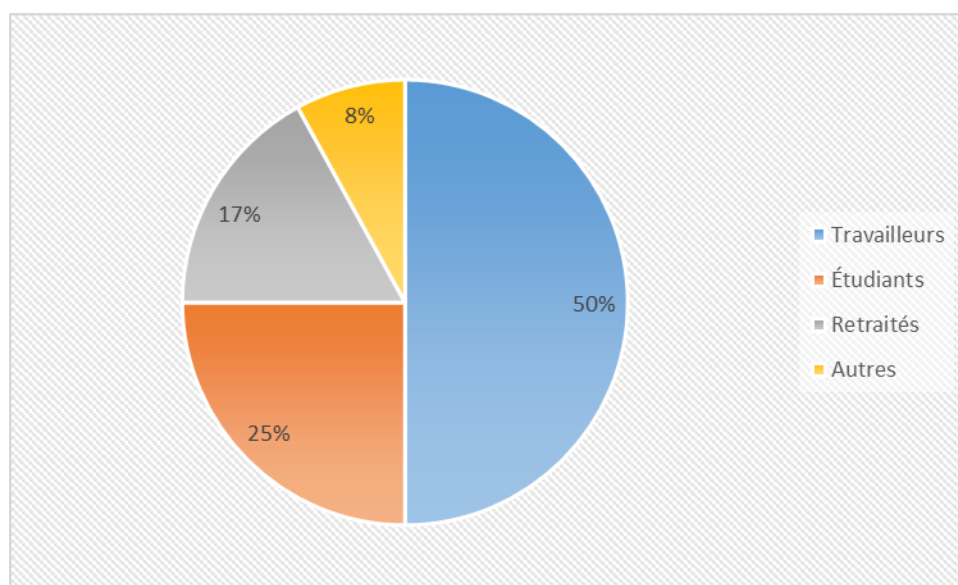


Figure 2 : Occupations des utilisateurs du RTC

L'offre du RTC est très complète de par sa proximité avec les utilisateurs, ses avancées technologiques ainsi que son souci pour le confort du client. À certains arrêts, les utilisateurs profitent d'une station

tempérée, d'un accès gratuit à une connexion Internet sans fil ainsi que d'écrans d'information en temps réel. En 2016, le RTC a également complété le déploiement de Nomade, son système d'aide à l'exploitation et à l'information aux voyageurs dont il sera question davantage au Chapitre 2.

1.2. Problématique

Le plus récent sondage qualité publié par le RTC, réalisé auprès de 654 répondants en 2016, en révèle beaucoup quant aux problématiques actuelles du réseau (Réseau de Transport de la Capitale, 2017b). Parmi tous les critères évalués, deux ont été jugés plus sévèrement par les répondants. Les utilisateurs du réseau se sont montrés insatisfaits de la fréquence de passage des autobus, soit l'intervalle de temps entre chaque arrivée à un arrêt particulier, et du confort lors du trajet, un aspect étroitement lié à la charge à bord lors du parcours. Le Tableau 1 présente les résultats détaillés de ce sondage qualité (Réseau de Transport de la Capitale, 2017b).

Critères qualité	Février 2016	Juillet 2016	Décembre 2016
Clarté de l'information du RTC (dépliants, site internet)	89	83	89
Rapidité à informer des changements à l'horaire ou au parcours	83	77	81
Propreté du réseau (arrêts, abribus et terminus)	83	84	86
Respect des horaires	88	80	85
Fréquence de passage (délai entre chaque passage d'autobus sur le parcours)	67	64	66
Accueil et courtoisie du personnel	96	93	94
Confort lors du déplacement (charge à bord)	68	73	74
Conduite et sécurité routière (voyager en adoptant un comportement sécuritaire)	88	83	85
Propreté des autobus	76	84	86
Fiabilité des autobus (panne, problème mécanique ou d'ouverture de porte, etc.)	97	95	96
Rapidité du parcours	84	79	83

Traitement des commentaires et des plaintes (courtoisie du personnel, cueillette et retour d'information, délai)	75	81	77
Satisfaction globale	84	83	85

Tableau 1 : Résultats du sondage qualité : satisfaction en pourcentage

Il importe de se pencher sur ces deux aspects précédemment mentionnés afin de répondre à la mission du RTC d'offrir un service de transport collectif de qualité, en plus de participer à l'atteinte des objectifs fixés par le Plan métropolitain d'aménagement et de développement (Communauté métropolitaine de Québec, s.d.). L'un de ces principaux objectifs vise à doubler les parts modales du transport en commun, soit la proportion d'utilisation de ce mode de transport, dans la Communauté métropolitaine de Québec (CMQ) en heure de pointe pour atteindre 20%. Malgré la connaissance de l'existence du problème actuel, les sources de perturbation du service qui entraînent des intervalles de temps irréguliers entre les passages et causent des niveaux anormaux de charge à bord sont difficilement identifiables et relèvent d'événements incontrôlables et imprévisibles qui rendent donc impossible l'implantation d'une solution universelle unique qui permettrait de radier définitivement les impondérables.

La variabilité des intervalles ainsi que les charges élevées sont des conséquences directes d'un phénomène aujourd'hui bien connu qu'on appelle le groupage d'autobus ou *bus bunching* en anglais. Le problème fut observé dans un contexte scientifique pour la toute première fois en 1964 par Newell et Potts (1964). Ils ont démontré qu'une légère déviation par rapport à l'horaire d'un autobus s'amplifiait jusqu'à la fin de parcours de ce dernier pour donner lieu à des intervalles de service aux arrêts irréguliers et des charges excessives dans l'autobus en question.

Un phénomène de groupage d'autobus s'orchestre de la manière suivante. Lorsqu'un autobus prend du retard par rapport à l'horaire prévu pour une raison quelconque, cela fait en sorte que les intervalles sont plus grands avec l'autobus qui est passé le premier et plus minces avec celui qui le suit. Le phénomène s'amplifie pour la raison suivante : lorsqu'un autobus prend du retard, cela signifie que plus de passagers seront arrivés au prochain arrêt lors de son passage. En effet, des passagers qui souhaitent au départ embarquer à bord de l'autobus suivant seront passagers de l'autobus accusant un retard. Puisque le temps passé à un arrêt dépend principalement du nombre de passagers qui y montent, alors le temps d'immobilisation de l'autobus déjà en retard sera plus important. Quant à celui qui le suit, il s'immobilisera que très brièvement puisque certains des passagers qui lui étaient destinés sont déjà en route vers leur destination. Le phénomène s'amplifie donc ainsi jusqu'à la fin du parcours.

La problématique abordée dans ce mémoire est donc celle du groupage d'autobus qui a pour conséquence des intervalles de passage irréguliers aux arrêts. Le groupage d'autobus entraîne une perturbation généralisée des parcours de transport en commun qui en sont affectés.

1.3. Revue de littérature

Il existe de nombreux événements qui peuvent mener à la formation du phénomène de groupage d'autobus. Les conditions météorologiques difficiles, la circulation dense en heure de pointe ou lors d'incidents, les habitudes de conduite des chauffeurs et les temps d'immobilisation plus importants à certains arrêts ne sont que quelques exemples des causes du problème. Il faut noter que lors d'une période déterminée ou pour un parcours en particulier de tels événements peuvent survenir plusieurs fois par jour ou même par heure. En plus des intervalles irréguliers et de la charge excessive, le groupage d'autobus a également pour conséquence de rendre les temps de voyage et d'attente aux arrêts plus longs. Conséquemment, cela augmente les coûts d'opération liés entre autres à l'essence, mais également aux temps tampons qui sont actuellement ajoutés aux horaires pour pallier à ses irrégularités et qui nécessitent le déploiement d'autobus supplémentaires sur le réseau.

Le phénomène de groupage d'autobus est répandu et dans plusieurs villes, il a engendré la grogne des utilisateurs et a forcé dans certains cas le déploiement d'efforts remarquables pour tenter de radier le problème. La ville de New York a vu son achalandage dans les autobus diminué de 16% entre 2002 et 2016 tandis que le nombre d'utilisateurs du métro a grimpé de 24,7% (TransitCenter, 2016). Le rapport du TransitCenter indique que cette baisse est expliquée par une fiabilité déficiente. La Metropolitan Transportation Authority, responsable du transport en commun à New York, est forcée de réviser les horaires qu'elle publie afin de refléter des temps de voyage de plus en plus long sur le terrain. Un regroupement, la Bus Turnaround Coalition, se fait le porte-parole de la population afin d'exiger la mise en place de solutions dans la ville de New York. Un site web, mis sur pied par cette même coalition, présente la performance des différents parcours sous la forme d'un bulletin où l'on peut consulter le nombre d'occurrences de groupage d'autobus (Bus Turnaround Coalition, 2017).

Le phénomène a également affecté la ville de Chicago où un investissement de 9 millions de dollars a été nécessaire pour la mise en place d'un système de communication entre les chauffeurs et le centre de contrôle (Hilkevitch, 2015). Il a été reconnu qu'une telle technologie s'avérait obligatoire vu la situation alarmante. Bien entendu, la technologie implantée ne sert qu'à obtenir de l'information en temps réel et à communiquer rapidement avec les gens sur le terrain. Il demeure que les solutions potentielles au problème sont nombreuses et que la technologie n'est qu'un support à la prise de décision en temps réel et au déploiement de stratégies.

Dans une étude publiée en 2011 (Feng et Figgliozzi, 2011), dans un contexte d'autobus à haute fréquence où on offre un service basé sur les horaires, on a conclu qu'il valait mieux implanter un service basé sur les intervalles puisque celui-ci implique une prise de décision dynamique. Leur proposition d'adapter les heures de passage aux arrêts de manière à prendre en considération les positions relatives des autres autobus est la prémisse de plusieurs autres études qui proposent des solutions visant le rééquilibrage continu des intervalles. Cette nouvelle méthode de planification du secteur du transport en commun est particulièrement pertinente pour des trajets offrant des intervalles de service de six minutes ou moins. En effet, lorsque les passages d'autobus sont rapprochés, il a été observé que les passagers tendent à arriver indépendamment des heures prévues à l'horaire (Luethi, Weidmann et Nash, 2006). C'est seulement au-delà de six minutes d'intervalle qu'on commence à noter une tendance à arriver plus près de l'heure prévue. Les auteurs de cette recherche effectuée à Zurich soulignent que les modèles d'arrivée de passagers sont fortement liés à la perception du passager quant à la fiabilité du réseau de sorte que le passager arrivera juste avant l'heure prévue s'il a confiance que l'autobus n'aura pas encouru de retard. Puisque le réseau de transport de Zurich est réputé fiable, les auteurs estiment que les distributions d'arrivées de passagers seraient probablement plus uniformes dans d'autres villes où la fiabilité est moindre pour un même intervalle. La transition d'une planification basée sur les horaires vers un système où uniquement les intervalles sont maintenus n'affecterait pas ou très peu ces parcours à intervalles réduits où les passagers sont déjà indifférents aux horaires.

Lorsque le sujet du groupage d'autobus est abordé, de manière générale, les solutions potentielles se divisent en deux catégories. Elles peuvent être appliquées à l'autobus qui a causé le retard ou bien à celui qui le suit. Plusieurs (Muñoz et al, 2013; Xuan, Argote et Daganzo, 2011 ; Sun et Hickman, 2005) ont proposé des solutions uniques qui s'appliquent à l'un ou l'autre des autobus alors que dans d'autres cas, des combinaisons de deux méthodes ont été étudiées. L'immobilisation qui vise à prolonger le temps d'immobilisation à un arrêt de l'autobus suivant celui qui a causé le retard est une solution très populaire qui a fait l'objet de plusieurs recherches.

Daganzo (2009) suggère l'utilisation de points de contrôle rapprochés pour le calcul des temps d'immobilisation. Ainsi, si les intervalles sont calculés de manière rapprochée alors les temps d'immobilisation pourront être moins importants et avoir tout de même l'effet escompté. Si les points de contrôle sont trop éloignés, alors le problème de groupage pourrait être trop important pour être radié. Dans cette même perspective, une équipe de recherche élargie (Xuan, Argote et Daganzo, 2011) a poursuivi la réflexion et a utilisé une cédule virtuelle permettant la prise de décision proactive. En effet, les intervalles aux points de contrôle sont calculés à rebours en prenant le temps prévu d'arrivée

du prochain autobus selon la cédule virtuelle. Ils ont rapidement prouvé que les temps morts pouvaient être réduits considérablement. Un meilleur contrôle permet donc de réduire significativement le temps ajouté aux horaires pour pallier différentes perturbations. Leurs résultats démontrent également que le calcul à rebours des intervalles est plus efficace que le calcul lors du passage au point de contrôle de l'autobus suivant.

Très récemment, grâce à la disponibilité de l'information en temps réel, des modèles de contrôle dynamiques pouvant être utilisés en temps réel ont été développés. Une équipe de recherche s'est penchée sur la performance de la méthode d'immobilisation dans un contexte hétérogène où les conditions aux arrêts sont différentes quant à l'achalandage par exemple (Luo et al, 2017). En plus de mesurer la qualité des intervalles obtenus, cette équipe s'est également assurée que les charges à bord demeuraient stables. Leur proposition a été implantée sur un parcours de la ville de Chengdu en Chine et une amélioration de la performance à tous niveaux a été observée. En plus de permettre des intervalles davantage stables, les stratégies d'immobilisation avaient aussi pour effet d'augmenter la vitesse commerciale des autobus dans un contexte de recherche similaire (He, 2015).

Bien que les stratégies uniques permettent d'améliorer la performance opérationnelle et la qualité du service, certaines équipes de recherche ont proposé la combinaison de deux solutions simultanées (Delgado, Muñoz, Giesen et Cipriano, 2009; Moreira-Matias, Cats, Gama, Mendes-Moreira et de Sousa, 2016). L'immobilisation combinée à la limitation de capacité, à l'ajustement en temps réel de la vitesse commerciale, à l'utilisation des feux de priorité ou encore au saut d'arrêts sont plusieurs combinaisons potentielles. Toutes autres combinaisons de ces solutions uniques sont également valables. De manière générale, pour une combinaison de deux solutions, chacune des solutions est appliquée sur un autobus différent de façon à réduire les répercussions et répartir les effets sur le système. Ainsi, on assigne des temps d'immobilisation accrus aux autobus suivants ceux qui ont pris du retard et on tente par de quelconques solutions d'augmenter la vitesse de parcours des autobus accusant un retard. Malgré tout, une combinaison de deux solutions visant toutes deux l'accélération de l'autobus en retard est également admissible.

Une méthode ayant fait ses preuves pour accélérer un autobus est la limitation de capacité qui consiste à restreindre le nombre de passagers pouvant embarquer à un arrêt pour limiter le temps d'immobilisation et rétablir un intervalle adéquat avec l'autobus qui suit. Par modélisation mathématique, il a été prouvé que l'immobilisation à elle seule réduisait de 11% le temps total de voyage d'un passager incluant le temps d'attente à l'arrêt et le temps passé à bord du véhicule par rapport à la situation de référence sans mesure de contrôle (Delgado, Munoz, Giesen et Cipriano, 2009). Quant à l'immobilisation bonifiée d'une limite du nombre d'embarquements, elle permet

d'améliorer de 22% l'objectif par rapport à la situation de référence encore une fois. Similairement, les deux mêmes solutions ont été évaluées, mais cette fois dans un contexte de simulation. Les conclusions de cette seconde recherche démontrent que la combinaison de ces solutions présente des résultats particulièrement intéressants lorsque les intervalles sont courts et que l'achalandage est important (Delgado, Munoz et Giesen, 2012). Il est proposé de mettre en place les mesures de limitation des embarquements seulement si la position de l'autobus suivant est assez rapprochée. L'utilisation d'un modèle de simulation permet de prendre ce type de décision en temps réel selon les positions relatives des autobus.

Dans le même but d'augmenter la vitesse de l'autobus à l'avant tout en ralentissant celui qui suit, une récente publication démontre qu'il est également possible de noter des résultats positifs lorsque l'immobilisation est combinée à l'ignorance de certains arrêts (Moreira-Matias et al, 2016). On suggère donc de ne pas s'arrêter à un ou plusieurs arrêts lorsqu'on note un retard. Étonnamment, une réduction des temps d'attente de 5% chez les passagers a été notée, et ce sans augmenter le temps à bord du véhicule. Cela diffère de ce qui avait été proposé par Sun et Hickman (2005) qui ont démontré que, dans certaines situations, il valait mieux s'arrêter à un arrêt qui aurait normalement été sauté si un passager à bord veut y descendre. Bien que cette alternative ne soit pas testée dans la première étude, la contribution de l'équipe de recherche de Moreira-Matias, Gama, Mendes-Moreira et de Sousa (2014) est particulièrement intéressante puisque cette dernière y intègre la notion de prédiction des événements de groupage. De par les principes d'apprentissage statistique (en anglais, *machine learning*), le nombre d'événements de groupage a été réduit de 68% puisqu'en utilisant les données historiques et l'information en temps réel, il était possible de prédire ces événements et ce, avant même que les effets ne se fassent trop ressentir. Selon la notion que plus un événement de groupage est détecté tôt, plus il sera facile de prendre des mesures correctives efficaces, Yu et al. (2016) ont également développé un outil de prédiction qui permet d'identifier plus de 95% des événements de groupage.

Il arrive parfois que le phénomène de groupage d'autobus soit si puissant que deux autobus se trouvent au même arrêt au même moment. Dans cette situation, d'autres solutions sont proposées par Wu, Liu et Jin (2017). En effet, lorsqu'un tel événement se produit, il est suggéré de répartir les passagers qui désirent monter à bord de manière à équilibrer les charges des deux autobus. Cette mesure est suivie d'un changement de position entre les deux autobus. Il est vrai de croire que la charge du premier des deux autobus sera plus importante puisqu'en accusant un retard un nombre plus important de passagers est monté à bord. Ainsi, en plaçant le deuxième en tête, il aura une charge moindre qui lui permettra d'être efficace lors de l'embarquement au prochain arrêt. Celui qui le suit se distancera

légèrement puisque son temps d'immobilisation sera encore important du au grand nombre de personnes qui se trouvent déjà à son bord pour rétablir un intervalle acceptable entre les deux autobus.

Dans certaines villes qui sont maintenant dotées de feux de circulation avec priorité, des mesures qui permettent de donner priorité à un autobus à un feu de circulation lorsque certains critères sont respectés sont maintenant réalisables. Utilisant les données relatives à un parcours achalandé de Barcelone, une équipe de recherche a démontré qu'il était possible de réduire la variation des intervalles de 53% à 78% (Estrada, Mensión, Aymamí et Torres, 2016). Cela était possible grâce à la mise en place d'une stratégie qui permettait de donner priorité à un feu de circulation si cet autobus présentait un intervalle trop grand avec celui qui le précède. Cette priorité était combinée à un ajustement de la vitesse commerciale de l'autobus à l'arrière lorsqu'il était trop rapproché de l'autobus retardataire.

Le Tableau 2 à la page suivante présente un tableau sommaire de la revue de littérature.

Type de mesure	Référence	Pistes de solutions						Objectifs				Commentaires
		Solutions appliquées à l'autobus suivant le retardataire										
			Solutions appliquées à l'autobus retardataire									
		Immobilisation	Ajustement vitesse	Limitation de la capacité	Saut d'arrêts	Équilibre des passagers	Utilisation des feux de priorité	Variabilité des intervalles	Équilibre des passagers	Coûts d'opération	Temps de parcours	
Solutions uniques	Sun et Hickman (2005)				√			√			√	Deux alternatives : accepter les descentes ou forcer les passagers à descendre avant. Si un passager est forcé de descendre, une pénalité est affectée à son temps de parcours.
	Daganzo (2009)		√					√		√		Vise l'ajustement rapide avec des points de contrôle rapprochés. Aucune méthode particulière n'est précisée. On parle plutôt d'ajustement de la vitesse pour accélérer ou ralentir selon la situation. L'objectif lié aux coûts d'opération vise la diminution des temps tampons.

Type de mesure	Référence	Pistes de solutions						Objectifs				Commentaires
		Solutions appliquées à l'autobus suivant le retardataire										
			Solutions appliquées à l'autobus retardataire									
		Immobilisation	Ajustement vitesse	Limitation de la capacité	Saut d'arrêts	Équilibre des passagers	Utilisation des feux de priorité	Variabilité des intervalles	Équilibre des passagers	Coûts d'opération	Temps de parcours	
Solutions uniques	Xuan et al. (2011)		√					√		√	√	Inclut les principes de <i>forward headway</i> (distance par rapport au bus en avant) et de <i>backward headway</i> (distance avec le bus qui suit, avec un temps d'arrivée selon une cédule virtuelle). Méthodes réactive et proactive. Vise diminuer les temps tampons. Le temps d'attente d'un passager est considéré comme étant plus long en perception que le temps de voyage.

Type de mesure	Référence	Pistes de solutions						Objectifs				Commentaires
		Solutions appliquées à l'autobus suivant le retardataire										
			Solutions appliquées à l'autobus retardataire									
		Immobilisation	Ajustement vitesse	Limitation de la capacité	Saut d'arrêts	Équilibre des passagers	Utilisation des feux de priorité	Variabilité des intervalles	Équilibre des passagers	Coûts d'opération	Temps de parcours	
Solutions uniques	Muñoz et al. (2013)	√						√			√	
	Luo et al. (2017)	√						√	√		√	À partir des idées de Xuan et al. (2011), on ajoute la notion d'hétérogénéité afin de rendre le modèle davantage dynamique.
Solutions combinées	Delgado et al.(2009)	√		√				√			√	Même si certaines personnes voient leur temps de parcours allongé, en moyenne ce temps diminue.
	Delgado et al. (2012)	√		√				√			√	

Type de mesure	Référence	Pistes de solutions						Objectifs				Commentaires
		Solutions appliquées à l'autobus suivant le retardataire										
			Solutions appliquées à l'autobus retardataire									
		Immobilisation	Ajustement vitesse	Limitation de la capacité	Saut d'arrêts	Équilibre des passagers	Utilisation des feux de priorité	Variabilité des intervalles	Équilibre des passagers	Coûts d'opération	Temps de parcours	
Solutions combinées	He (2015)	√	√					√		√		En plus de s'intéresser à la variabilité des intervalles, on observe également la capacité à adhérer à un horaire.
	Estrada et al. (2016)		√				√	√		√	√	On allonge certains feux verts momentanément pour permettre aux autobus qui répondent aux critères de circuler plus rapidement.
	Moreira-Matias et al. (2016)	√			√			√			√	Prédiction des événements de groupage d'autobus plusieurs arrêts à l'avance. Le saut d'arrêts est appliqué dans le cas d'intervalles très grands et l'immobilisation lors d'intervalles rapprochés.

Type de mesure	Référence	Pistes de solutions						Objectifs				Commentaires
		Solutions appliquées à l'autobus suivant le retardataire										
			Solutions appliquées à l'autobus retardataire									
		Immobilisation	Ajustement vitesse	Limitation de la capacité	Saut d'arrêts	Équilibre des passagers	Utilisation des feux de priorité	Variabilité des intervalles	Équilibre des passagers	Coûts d'opération	Temps de parcours	
Solutions combinées	Wu et al. (2017)	√				√		√	√		√	
Modèles de prédiction	Moreira-Matias et al. (2014)											Prédiction des événements de groupage plusieurs arrêts à l'avance. La faible précision (52,51%) peut créer des problèmes en tentant de les régler.
	Yu et al. (2016)											Capable de détecter 95% des groupages et détecte les éléments annonceurs. Le but est de détecter le plus tôt possible tout en conservant une bonne précision.

Tableau 2 : Sommaire de la revue de littérature

1.4. Objectifs

Le principal objectif visé est d'assurer la meilleure régularité du service possible. Pour ce faire, le but est de réduire les écarts par rapport à l'intervalle souhaité, soit la fréquence de service qui est promise aux clients du RTC pour ce parcours.

D'autres indicateurs de performance du service sont évalués afin de s'assurer que le passager ait une expérience agréable à tous niveaux. On s'est entre autres intéressé au temps total de parcours perçu par le passager. Ce temps se compose du temps d'attente à l'arrêt et du temps de voyage. L'objectif visé est de réduire le temps total de parcours perçu par le passager.

Un autre élément qui a été considéré est la charge à bord du véhicule. Le but est d'assurer que la charge demeure dans les limites actuelles du parcours. Les solutions appliquées ne doivent donc pas se faire au détriment du confort du passager lors du voyage.

Finalement, le dernier objectif consiste à améliorer la variabilité des temps de parcours totaux des autobus d'une extrémité à l'autre du parcours. Une diminution de l'écart-type relié au temps de parcours se traduit par une meilleure utilisation des ressources puisque les temps tampons pour pallier à cette variabilité ne sont plus aussi nécessaires.

1.5. Méthodologie

Dans le but d'optimiser la régularité du service de transport en commun afin d'éviter le groupage d'autobus au RTC, la première étape consistait à choisir un parcours du réseau qui serait idéal pour la résolution de cette problématique. Pour ce faire, le problème d'irrégularité devait être présent et perturbateur sur le parcours. De plus, la résolution du problème sur le parcours choisi devait avoir une répercussion potentiellement importante sur le réseau. Il fallait donc choisir un parcours achalandé où une amélioration aurait des effets substantiels. Le parcours 807 a été choisi puisqu'il répondait à tous ces critères.

La seconde étape vers la résolution de ce problème a été le traitement des données réelles fournies par le RTC pour le parcours 807. Une ligne de données est générée au RTC pour chacun des passages d'autobus à chacun des arrêts, et ce, pour tous les parcours du réseau. Chacune de ces lignes de données présente de l'information telle que les heures d'arrivée et de départ de l'arrêt grâce à la géolocalisation, le nombre de montées et de descentes ainsi que la charge à bord grâce à des détecteurs de mouvements aux portes. Le traitement de données a permis de déterminer quels étaient les endroits et moments les plus susceptibles de présenter des intervalles de service irréguliers. Les éléments tels

que l'achalandage aux arrêts, la localisation physique sur le parcours, la proximité avec des lieux publics ainsi que le nombre de feux de circulation entre les arrêts ont permis d'identifier des endroits précis sur le parcours où des efforts devaient être déployés. Également, les aspects temporels comme l'heure de la journée et le jour de la semaine ont servi à cette analyse.

Dans le but d'optimiser la régularité du service de transport en commun au RTC, un programme de simulation à événements discrets a ensuite été développé afin de vérifier la performance de diverses solutions et combinaisons de solutions. Trois scénarios, choisis pour leurs caractéristiques physiques et temporelles, ont fait l'objet d'une étude approfondie. Les paramètres du programme de simulation sont tirés directement des données réelles fournies par le RTC pour le parcours 807. Ces paramètres concernent le nombre d'arrêts, les intervalles qui séparent chacun des départs d'autobus du premier arrêt, les temps de déplacement, les temps d'immobilisation ainsi que le nombre de montées et de descentes à chaque arrêt. Il est important de noter que les éléments tels que les temps de déplacement, les temps d'immobilisation et le nombre de montées et de descentes ne sont pas homogènes d'un arrêt à l'autre et donc que la simulation reflète bien la nature dynamique d'un réseau de transport. Des formules d'estimation pour ces trois derniers éléments ont été élaborées afin de répliquer en contexte de simulation au mieux la situation réelle.

La validité de chacun des scénarios de référence a par la suite été prouvée en comparant les résultats en contexte de simulation avec les données réelles obtenues.

Ensuite, une liste de solutions potentielles et réalistes a été déterminée et ces solutions ont été ajoutées au programme de simulation original. Ainsi, chacune des solutions a été appliquée à chacun des contextes pour les trois scénarios choisis.

La méthodologie utilisée se termine par la comparaison des résultats de référence pour ces trois scénarios aux résultats obtenus lors de simulations où diverses solutions sont testées.

Ce qui distingue la présente méthodologie de celles précédemment vues dans la littérature, c'est qu'elle ne compare pas uniquement une solution quelconque avec le scénario de référence, mais que plusieurs solutions uniques et combinées sont analysées simultanément. Le but ici n'est pas uniquement de prouver qu'une solution améliore la situation actuelle puisque des travaux précédents l'ont déjà démontré. L'objectif visé est plutôt de comparer la force de ces mesures et de déterminer lesquelles performant le mieux.

Une des autres caractéristiques de cette recherche est qu'elle permet de mesurer la performance en situation d'incertitude de sorte que les paramètres n'y sont pas déterministes et qu'ils varient d'une réplification à l'autre permettant de tester les solutions en toutes situations. De plus, l'utilisation d'un

programme de simulation permet de tester une prise de décision en temps réel ce qui illustre bien la réalité.

Un autre avantage offert par le programme de simulation c'est qu'il est facilement modifiable afin de tester diverses solutions pour des scénarios différents. Les tables de données utilisées par le simulateur peuvent facilement être modifiées pour refléter les caractéristiques de divers jours de la semaine, heures de la journée ou directions. Le simulateur offre donc également la possibilité de mesurer les effets réels suite à une implantation, en utilisant les données les plus récentes pour alimenter les tables de données, et de tester diverses modifications pour améliorer davantage la situation.

1.7. Organisation de l'essai

Le chapitre suivant se consacre à la structure actuelle du RTC. Son offre de service ainsi que les méthodes de gestion qui y sont utilisées seront discutées. Par la suite, le Chapitre 3 a pour objectif de décrire comment le problème de groupage d'autobus se manifeste plus particulièrement sur le parcours 807 du RTC. Au Chapitre 4, la modélisation du problème ainsi que la structure du programme de simulation sont abordées. La validité de ce dernier fait également l'objet de discussion. Les différentes méthodes de résolution ainsi que la modélisation de celles-ci sont présentées au Chapitre 5. Au Chapitre 6, il est question de la forme de l'outil d'aide à la décision et des indicateurs de performance qui y apparaissent. Cette section précède le chapitre final où les résultats sont présentés et discutés.

Chapitre 2

Réseau global du RTC

Ce chapitre est dédié à la description du réseau du RTC dans son ensemble. Il sera question de ses caractéristiques physiques, de l'offre de service, des méthodes de gestion et de planification, des ressources et des flux. Puisque la présente recherche se penche particulièrement sur le Métrobus 807, cette section sera conclue d'une description détaillée de ce parcours.

2.1. Caractéristiques principales du réseau

Les 870 kilomètres de réseau du RTC couvrent l'agglomération de Québec ainsi que Boischatel. La Figure 3 présente une cartographie du réseau identifiant chacun des secteurs actuellement desservis.

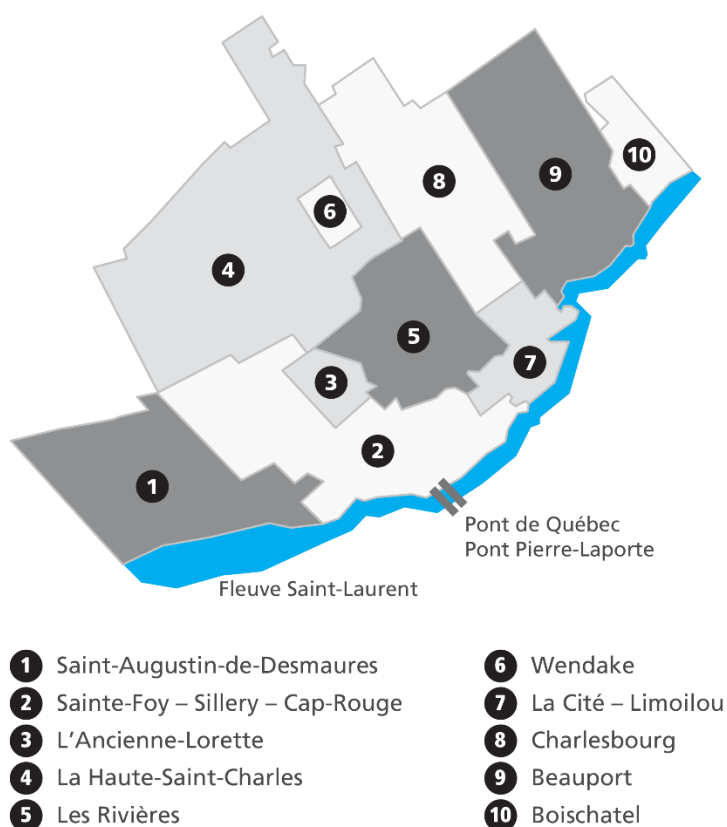


Figure 3 : Territoire desservi par le RTC

Source : Réseau de Transport de la Capitale, 2017b

L'offre d'un service de qualité est facilitée par 65 kilomètres de voies réservées. Ces voies réservées sont exclusives aux autobus, autocars et taxis, et ce, pour les heures effectives. Il est donc possible pour les autobus de circuler assez librement sur ces segments ce qui a pour effet d'accélérer les déplacements surtout en heures de pointe. Les conditions de voies réservées peuvent varier d'un endroit à l'autre de sorte que dans certains cas l'usage exclusif est limité aux heures de pointe alors que dans d'autres cas il peut s'étendre sur une bonne partie de la journée. Une cartographie du réseau de voies réservées pour l'arrondissement Sainte-Foy-Sillery-Cap-Rouge est disponible à l'Annexe 2.

Le réseau compte 4534 arrêts dont 1062 sont des abribus et 20 sont des stations tempérées. Il s'agit donc du quart des arrêts qui sont aménagés pour améliorer le confort des utilisateurs. Afin d'encourager le transport collectif, ce sont 21 Parc-O-Bus que l'on qualifie de stationnements incitatifs qui sont mis à disposition des utilisateurs. Ces stationnements se trouvent à proximité d'arrêts d'autobus et permettent donc aux utilisateurs de se rapprocher des lieux desservis à l'aide de leur véhicule personnel. Ces Parc-O-Bus sont gratuits, mais ils peuvent requérir la présentation d'une carte Opus, carte à puce qui contient des titres nécessaires pour l'embarquement. Huit des 10 territoires desservis sont habités par au moins un stationnement incitatif. La Figure 4 illustre l'emplacement de ces Parc-O-Bus identifiés d'un cercle vert.



Figure 4 : Emplacements des stationnements incitatifs Parc-O-Bus

Source : Réseau de Transport de la Capitale

Un réseau d'une telle taille nécessite deux garages qui servent à la maintenance et au ravitaillement des véhicules. Un premier est situé sur la rue Armand-Viau, appelé le Centre Métrobus puisqu'il n'accueille que des autobus de type articulé. L'autre est voisin des bureaux administratifs sur la rue des Rocailles. Ce dernier héberge uniquement des véhicules de type standard. Ces deux centres sont situés dans l'arrondissement Les Rivières.

2.2. Offre de service

L'offre de service du RTC est très complète grâce à ces 135 parcours qui sillonnent le réseau. La majorité de ces parcours sont offerts dans un sens comme dans l'autre multipliant les destinations accessibles. Il existe 4 types de service qui ont chacun leurs caractéristiques bien particulières ce qui permet de répondre aux différents besoins des citoyens. La Figure 5 présente les parts de déplacements pour chacun de ces types de service.

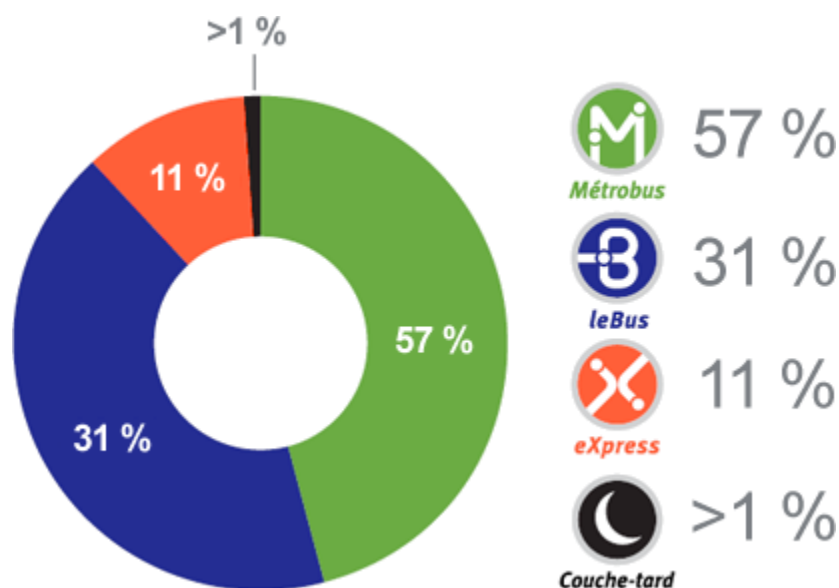


Figure 5 : Parts de déplacements par type de service au RTC

Source : Réseau de Transport de la Capitale, 2017b

Bien que le Métrobus ne compte que six parcours, il représente plus de la moitié des déplacements. Sur les 4362 départs par jour, 57% sont des Métrobus. Cette appellation est utilisée pour désigner les services de haute fréquence avec des passages aux 6 à 15 minutes dépendamment des heures de la journée ou des périodes de la semaine. Des intervalles plus longs sont prévus pour le Métrobus 804 qui présente à certaines périodes des intervalles de 30 minutes.

Les Métrobus opèrent 7 jours sur 7 et peuvent accueillir un très grand nombre de passagers puisque ses autobus sont articulés. Les autobus de ce type peuvent accueillir en heure de pointe 85 passagers à bord selon la norme de planification. Il faut noter toutefois que le Métrobus 803 quant à lui opère à l'aide de véhicules standards qui aux mêmes heures peuvent accueillir 51 passagers.

En plus du Métrobus, le RTC offre le Bus qui représente 60 parcours. Il s'agit d'un service de proximité assurant la liaison entre les quartiers résidentiels et les pôles d'activités. De plus, on compte également le service eXpress qui bonifie l'offre de service entre la banlieue et les principaux lieux de travail et d'étude aux heures de pointe à l'aide de ses 57 parcours. Les autobus eXpress utilisent l'autoroute pour transiger rapidement vers les centres d'intérêt. Afin d'améliorer la rapidité de ce service, il existe des restrictions sur les lieux d'embarquement et de descente. Par exemple, le parcours 273 qui part du Boulevard de L'Ormière vers la Colline Parlementaire n'accepte que des montées sur ces cinquante premiers arrêts. Il n'est donc possible de débarquer qu'aux neuf derniers arrêts. Ces restrictions ainsi que le fait qu'il n'y ait des départs qu'entre 7h et 9h illustre bien l'essence des parcours eXpress.

Finalement, 13 parcours sont qualifiés de Couche-Tard. Comme le nom l'indique bien, il s'agit d'un service de nuit les vendredis et samedis.

L'offre de service diversifiée illustre grandement le désir du RTC de répondre aux différents besoins de la population qu'il dessert. Cela passe également par l'accessibilité du réseau aux personnes ayant des limitations fonctionnelles. C'est sans surprise de constater que 60% des arrêts sur les parcours Métrobus sont accessibles en fauteuil roulant. C'est le Métrobus 803 qui ouvre la marche avec 89% d'arrêts accessibles. Dans ce même ordre d'idées, le RTC offre également un service de transport adapté grâce à un contrat octroyé à la Société de Transport Adapté de la Capitale (STAC) permettant une accessibilité accrue. Ce sont 4 millions de kilomètres qui ont été parcourus par la STAC en 2016.

2.3. Méthodes de gestion et de planification

Tel qu'il a été mentionné plus tôt, il existe deux méthodes de planification distinctes en transport en commun : la méthode basée sur les horaires et la méthode basée sur les intervalles. Le RTC utilise la première de ces méthodes pour la planification de ces services. Cela signifie donc que des horaires sont publiés et qu'il est possible de connaître l'heure de passage d'un autobus à un arrêt quelconque. Au RTC, la publication de ces horaires se fait quatre fois par année. Les horaires ne varient pas nécessairement d'une saison à l'autre, mais dans certains cas des modifications sont apportées. Pour chaque période d'affectation, nom donné pour désigner chacune des saisons, un horaire est publié et on y distingue trois périodes, soit la semaine, le samedi, et le dimanche et jours fériés. Ainsi pour une

même période d'affection, pour un parcours et un arrêt quelconque, l'horaire pourrait être différent selon ces périodes de la semaine. Toutefois, l'horaire sera toujours le même du lundi au vendredi.

Lors de la conception des horaires, la notion de battement fait surface. Le battement est le temps alloué en fin de parcours pour assurer un départ à l'heure prévue en sens contraire. Ce battement permet de pallier à la variabilité des temps de parcours. Il est calculé en soustrayant le 50^e centile du 95^e centile des temps de parcours observés. Ce calcul permet d'établir un battement optimal selon les circonstances puisque ce temps ajouté aux horaires en fin de parcours est synonyme de ressources inutilisées et de perte d'efficacité.

Cette même variabilité qui nécessite l'ajout de battement nuit bien évidemment à la précision des heures de passage publiées. Comme il a été présenté plus tôt, les aléas qui donnent lieu au groupage d'autobus sont de toutes origines. Le battement est aujourd'hui utilisé au RTC afin de mieux gérer la variabilité. Toutefois, puisque cette méthode est appliquée en fin de parcours, elle permet de minimiser les retards dans les autres directions sans permettre de réduire la variabilité des intervalles aux arrêts.

En contrepartie, depuis novembre 2016, le RTC s'est outillé du système Nomade. Ce système offre en temps réel de l'information concernant les perturbations sur le système et les heures de passage prévues grâce à la géolocalisation des autobus. Nomade se voit à la fois une précieuse banque de données pour la planification et l'exploitation des activités, en plus d'être un outil indispensable pour les utilisateurs du réseau. Dans un environnement d'incertitude, Nomade permet à l'utilisateur de combiner l'information fournie par cet outil à celle publiée trimestriellement afin de mieux prévoir ses déplacements. Nomade est disponible sur plusieurs plateformes permettant un accès à l'information à tout moment et à tout endroit : site web, application mobile, bornes d'information aux 37 arrêts les plus achalandés, écrans en stations et dans les autobus, annonces vocales et alertes SMS. En 2016, l'application mobile a été téléchargée plus de 80 000 fois alors que 156 000 requêtes SMS ont été enregistrées. Avec ces avancées technologiques, il va sans dire que les prochaines années réservent une transition vers une méthode de planification basée sur les intervalles puisque l'éloignement des horaires traditionnels se fait de plus en plus ressentir.

2.4. Ressources et flux des entités

Une offre de service aussi complète que celle du RTC nécessite bien évidemment plusieurs ressources, les principales étant le personnel chauffeur et d'entretien et la flotte de véhicules. Le RTC emploie actuellement près de 1600 employés dont 926 chauffeurs et 316 à l'entretien. Les chauffeurs travaillent selon les horaires qu'ils sélectionnent quatre fois l'an soit avant le début de chacune des

périodes d'affectation. À partir des horaires des parcours, des semaines de travail type sont créées et les chauffeurs choisissent selon un ordre de priorité leurs horaires de travail pour la période d'affectation. Ainsi, des horaires de jour comme de soir et de nuit sont disponibles. Les semaines de travail sont sous trois formats, soit quatre journées d'une durée de dix heures, cinq journées d'une durée de huit heures ou trois journées de dix heures combinées à deux journées de cinq heures.

Une journée de travail pour un chauffeur peut se diviser en étapes. On définit une étape comme étant une affectation à un parcours quelconque. Ainsi, un chauffeur peut effectuer une journée de travail se composant d'une ou plusieurs étapes. Le chauffeur pourrait donc être requis sur plusieurs parcours dans une même journée pour des durées quelconques. Un chauffeur peut être déployé sur jusqu'à huit parcours lors d'une même journée.

De par la nature des horaires, il existe deux façons pour un chauffeur de se rendre sur le réseau pour compléter une des étapes à son horaire. Il est possible pour lui d'arriver à bord d'un autobus ou bien d'être reconduit sur le terrain par les navettes du RTC. Dans le premier cas, la majorité du temps, le chauffeur quittera d'un des deux garages avec un véhicule en direction du parcours qui lui a été assigné. Cette situation est beaucoup plus probable en début de période de pointe puisque les effectifs sur le réseau doivent être augmentés. Les véhicules déjà en fonction ne suffisent pas à couvrir la demande et de nouveaux autobus doivent être ajoutés. Les chauffeurs pourraient également arriver à bord d'un autobus, mais cette fois d'un autre parcours et non des garages. Il existe plusieurs raisons qui font de cette stratégie la favorite à l'occasion. Entre autres, puisque l'offre de service est très diversifiée au RTC, les parcours couvrent différentes périodes de la journée. Certains parcours ne sont actifs que pour une très courte période de temps, comme c'est le cas pour le service eXpress. Un autobus de ce parcours pourrait être redirigé ailleurs sur le réseau en fin de service. Dans d'autres situations, un chauffeur pourrait se déplacer sur le réseau à bord d'un autobus pour éviter le battement excédentaire. Il existe une distinction entre le battement discuté plus haut et le battement dit excédentaire. Le battement est un temps nécessaire pour assurer un certain niveau de service alors que le battement excédentaire est ni plus ni moins une inutilisation des ressources disponibles. Par exemple, si le battement calculé est de cinq minutes, mais que l'horaire en sens contraire prévoit un départ quinze minutes après l'arrivée prévue du véhicule au dernier arrêt, l'autobus et son chauffeur seront inutilisés pour une période d'au moins dix minutes. À leur arrivée au dernier arrêt, ils pourraient donc immédiatement être dirigés vers un autre parcours qui nécessiterait leur service immédiatement. Il faut savoir que les parcours au RTC sont qualifiés d'interlinés ce qui signifie qu'ils se croisent et partagent certains arrêts communs. Cette caractéristique physique facilite grandement la réassignation d'un véhicule à un autre parcours dans un court laps de temps.

Lorsque les chauffeurs ne se rendent pas sur un parcours à bord d'un véhicule, ils recourent au service de navette offert par le RTC. Qu'ils arrivent d'un autre parcours ou qu'ils soient en début de quart de travail, une navette pourra les cueillir où qu'ils soient pour les reconduire à l'endroit où ils sont attendus. Il faut savoir que les points de relève, les endroits où un chauffeur en remplacera un autre, peuvent être n'importe où sur un parcours. Le point de relève peut être en début ou fin de parcours comme il peut se situer à un quelconque endroit entre ces deux points. Un point de relève très achalandé comme la Place D'Youville est à la fois le début de certains parcours et l'arrêt intermédiaire de plusieurs autres. Encore une fois, cela rappelle la notion de parcours interligés.

Afin de supporter l'ampleur du réseau et assurer un service de qualité à toute heure de la journée, de nombreux autobus sont nécessaires pour soutenir la demande. La flotte de véhicules est impressionnante et se composait de 575 autobus à l'hiver 2017. De ce nombre, 109 sont des autobus articulés œuvrant sur les parcours Métrobus. Puisque l'accessibilité est d'une grande importance pour le RTC, 40% des véhicules, tous types confondus, sont accessibles aux fauteuils roulants. Cet aspect ajoute à la complexité des déploiements sur le réseau puisqu'il faut s'assurer d'avoir des autobus adaptés sur les parcours qui sont annoncés comme accessibles.

C'est sans surprise de constater que le nombre si important de véhicules permet principalement de supporter le service en heures de pointe ce qui implique une inutilisation de plusieurs ressources en période moins achalandée. En semaine, en après-midi, ce sont en moyenne 473 autobus qui sillonnent le réseau en même temps, soit 387 véhicules standards et 86 véhicules articulés. En avant-midi, le scénario est pratiquement identique. Le weekend, le besoin n'est que le quart de celui en semaine. La moyenne d'autobus sur le réseau la fin de semaine est plutôt de 120.

Le temps de service d'un autobus varie grandement selon les situations. En effet, un véhicule peut rouler pour une période allant de deux heures à vingt-quatre heures avant son retour au garage. Pour une période de service en deçà de vingt-quatre heures, aucun ravitaillement ne sera nécessaire et c'est donc pourquoi celui-ci se fait exclusivement par les employés d'entretien.

2.5. Le Métrobus 807

Il est déjà connu que la série Métrobus représente plus de la moitié des déplacements ce qui ne fait aucun doute sur l'importance de ces six parcours pour le RTC et les citoyens de la Ville de Québec. Le Métrobus 807 à lui seul compte pour environ 5% des voyages en semaine ce qui se traduit par 127 heures de service par semaine. Simultanément, ce sont 12 à 15 véhicules articulés qui sont nécessaires pour assurer le service sur cette ligne. Au total, hebdomadairement, 115 chauffeurs se partagent les heures de service de ce parcours.

Le parcours 807 circule en direction est comme en ouest jour comme nuit assurant un service régulier entre 5h et 1h. En direction est, le nombre d'arrêts s'élève à 42 alors qu'en direction contraire, on compte plutôt 44 arrêts. Le parcours s'étend de l'édifice de Revenu Québec sur la rue de Marly dans l'arrondissement de Saint-Foy-Sillery-Cap-Rouge à la Place D'Youville cette fois dans La Cité-Limoilou. Le Métrobus 807 parcourt principalement la rue Saint-Jean ainsi que le Chemin Sainte-Foy. Comme il est possible de le constater à l'Annexe 2, ce parcours ne bénéficie pas de voies réservées. La Figure 6 illustre le tracé du parcours 807 dans les deux directions.

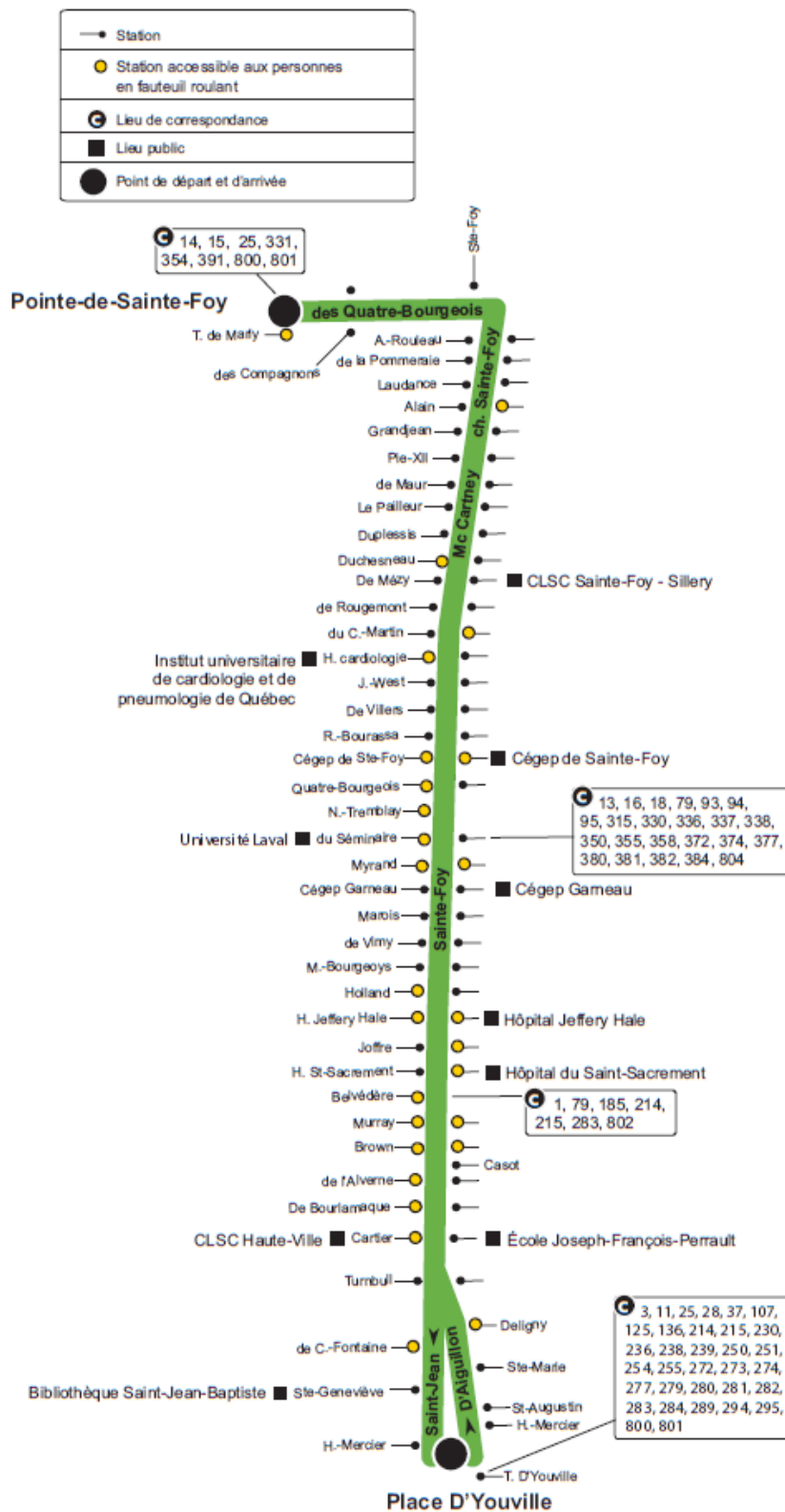


Figure 6 : Tracé du parcours 807

Source : Réseau de Transport de la Capitale, 2017c

De manière générale, il y a un passage aux dix minutes aux arrêts. Très tôt en journée et dès le début de soirée, les passages sont aux quinze minutes puisque la demande est moindre.

Sur le tracé du parcours 807, on compte de nombreux lieux d'intérêt ce qui en fait évidemment un parcours populaire et achalandé. Le Capitole de Québec, l'Hôpital du Saint-Sacrement, le Cégep Garneau ainsi que le Cégep de Sainte-Foy ne sont qu'à quelques minutes de marche d'un arrêt du parcours 807. Le parcours 807 s'arrête également à l'extrémité nord du campus de l'Université Laval tout près du Pavillon de l'éducation physique et des sports (PEPS). Ce sont 60 000 étudiants qui y sont inscrits et environ 10 000 employés qui y travaillent (Université Laval, 2017). Le parcours 807 est également un choix populaire pour les nombreux employés de Revenu Québec puisque très peu de stationnements y sont disponibles pour les automobiles privées.

Le Métrobus 807 est également apprécié pour son accessibilité. En effet, 32% de ses arrêts sont réputés accessibles aux fauteuils roulants.

À la lecture de cette description, le Métrobus 807 s'avérerait un sujet de recherche pertinent pour son nombre d'arrêts important, son intervalle de service assez rapproché ainsi que son achalandage. Il a également été observé dans le passé par le RTC que ce parcours connaissait des problèmes liés au groupage d'autobus et que le service souffrait d'une grande variabilité des intervalles de service. Une amélioration de ce service aurait un réel impact sur les utilisateurs du RTC qui sont nombreux à voyager sur cette ligne.

Chapitre 3

Description du problème

Ce chapitre a pour but de décrire le problème. Il y sera donc question de la manière dont le problème de groupage d'autobus se manifeste dans le contexte actuel du RTC et de l'ampleur de ses conséquences sur le parcours 807.

3.1. Description du problème à résoudre

Le groupage d'autobus dont la principale conséquence est l'irrégularité du service de transport en commun aux arrêts d'autobus a été observé sur le parcours 807 offert par le RTC, ce qui en fait le sujet de cette recherche. Les causes de ce problème qui sont de diverses natures ont des probabilités de réalisation qui varient grandement selon les caractéristiques physiques et temporelles d'un parcours.

Les retards encourus par les autobus qui sont à l'origine des intervalles irréguliers peuvent être causés par une circulation dense, des conditions routières difficiles, des incidents routiers ou encore des temps d'immobilisation plus grands pour permettre aux passagers en fauteuil roulant de monter ou de descendre. Il va donc de soi que certaines périodes, saisons, journées de la semaine, heures du jour ou arrêts particuliers ont une probabilité accrue de présenter des passages d'autobus qui s'éloignent des intervalles souhaités.

3.1.1. Mesure d'irrégularité

Afin de quantifier le groupage d'autobus, la notion d'irrégularité du service sera mesurée comme un pourcentage par rapport à l'intervalle prévu. Cet indicateur sera nommé la mesure d'irrégularité. Ainsi, on calcule la différence entre l'intervalle prévu selon les heures de passage mises à l'horaire et l'intervalle réel soit le temps entre deux arrivées d'autobus à un arrêt. Cette différence qui sera par la suite appelée écart consiste à soustraire l'intervalle réel de l'intervalle prévu. Cet écart est ensuite exprimé comme un pourcentage par rapport à l'intervalle prévu. Par exemple, l'irrégularité du service sera évaluée à 10% si l'intervalle prévu est de 600 secondes et que l'intervalle réel est de 660 secondes. Bien entendu, l'intervalle réel peut être inférieur ou supérieur à l'intervalle souhaité ce qui entraînerait éventuellement des pourcentages négatifs. En présence de la même situation que ci-haut, si l'intervalle réel était de 540 secondes, l'irrégularité du service serait de -10%.

Toutefois, on se rappelle que le principe de groupage d'autobus a deux effets distincts, soit celui de créer un écart plus grand avec l'autobus passé plus tôt et un écart plus petit avec l'autobus qui suit. C'est pourquoi il importe d'apporter une précision quant à la méthode de calcul de la mesure d'irrégularité. Il est possible de comparer deux situations à la Figure 7, l'une présentant une situation idéale et l'autre présentant des irrégularités où le Bus 2 a pris du retard.

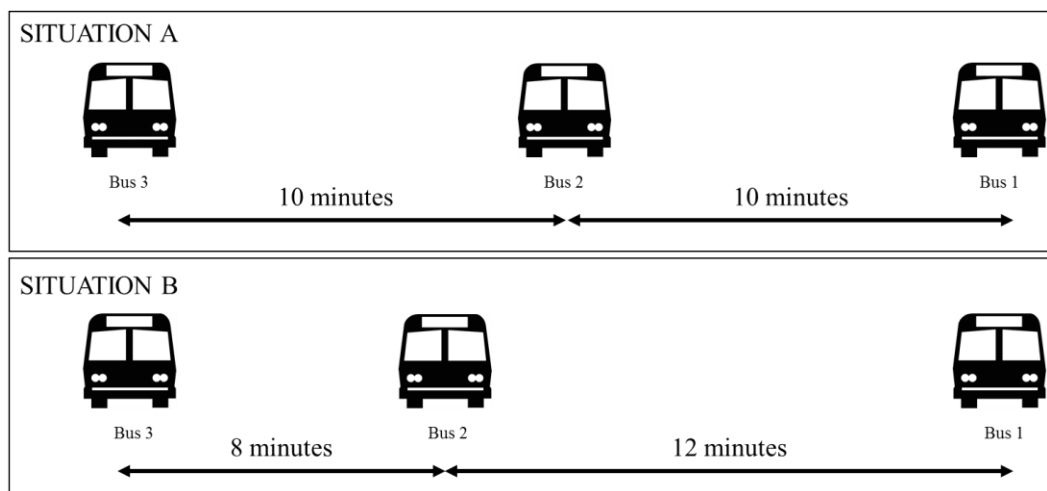


Figure 7 : Comparaison des intervalles lors de deux situations distinctes

La mesure d'irrégularité peut être calculée de deux manières et l'exemple ci-dessus permet de mieux comprendre pourquoi une méthode de calcul a été préférée. Il est possible de calculer la différence entre l'intervalle prévu et l'intervalle réel en utilisant ou pas la notion de valeur absolue. Dans le cas où les valeurs absolues ne sont pas utilisées, la différence sera positive lorsque l'intervalle réel est plus grand que l'intervalle prévu. L'inverse se produira lorsque l'intervalle réel sera plus petit. Le Tableau 3 présente les mesures d'irrégularité et la moyenne qui en découle selon les deux méthodes de calcul.

	Méthode de calcul sans valeur absolue			Méthode de calcul avec valeurs absolues		
	Bus 1 et Bus 2	Bus 2 et Bus 3	Moyenne	Bus 1 et Bus 2	Bus 2 et Bus 3	Moyenne
Situation A	0	0	0	0	0	0
Situation B	20	-20	0	20	20	20

Tableau 3 : Mesures d'irrégularité (en pourcentage) selon deux méthodes de calcul

Ce qu'on constate c'est que les irrégularités s'annulent lorsque les valeurs absolues ne sont pas utilisées. Avec la première méthode de calcul, la moyenne laisse paraître que le système est en contrôle dans la Situation A comme dans la Situation B, tandis que la deuxième méthode de calcul démontre que la Situation B présente des irrégularités. Cette différence provient du fait qu'un écart positif résultera en un écart négatif d'une ampleur similaire lors du calcul de l'intervalle suivant. Afin de bien expliquer l'irrégularité des intervalles, la méthode de calcul utilisant les valeurs absolues sera utilisée.

3.1.3. Identification des périodes et endroits problématiques

Les différentes causes du groupage d'autobus font en sorte que certaines périodes ou endroits sont plus propices à ce type d'événement ce qui en fait des sujets de recherche plus pertinents.

Les aléas reliés à la circulation sont bien entendu la cause de plusieurs situations de groupage d'autobus. Bien que les données fournies par le RTC ne révèlent pas les réelles causes du groupage, plusieurs indices permettent d'identifier ces causes de manière détournée. En effet, le calcul des moyennes des mesures d'irrégularité par heure permet de constater que les plus grandes irrégularités ont lieu aux heures de pointe où évidemment la circulation est bien plus difficile. Sans présenter les valeurs de ses mesures d'irrégularité, le Tableau 4 permet de constater visuellement les périodes de la journée qui présentent des intervalles non souhaités. Les moyennes des mesures d'irrégularité pour tous les arrêts et heures pour la période d'affection du printemps 2017 ont été calculées. Les moyennes ont ensuite été comparées entre elles pour une même direction. Plus la cellule est opaque, plus l'irrégularité à cette heure est forte par rapport aux autres heures de la même direction.

	Heure de la journée											
Direction	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Est												
Ouest												

Tableau 4 : Ampleur des mesures d'irrégularité par heure dans chaque direction

Ce tableau permet de voir rapidement l'effet des heures de la journée sur la régularité du service. En effet, aux heures de pointe du matin et de l'après-midi, il est plus difficile de maintenir des intervalles réguliers puisque la circulation y est plus difficile. On constate également une tendance à la hausse sur l'heure du dîner où l'on retrouve également beaucoup de gens sur les routes.

Il faut savoir que les heures de pointe du matin et de l'après-midi se font sentir dans chacune des directions. Pour un parcours qui fait le lien entre les quartiers résidentiels et les centres d'intérêt, chacune des heures de pointe se fait ressentir dans une direction particulière de manière plus

prononcée. Par exemple, pour un parcours de sud en nord, où les quartiers résidentiels se trouvent au sud, le groupage d'autobus se fera sentir davantage le matin en direction nord et l'après-midi en direction sud. Il en est ainsi puisque les déplacements se font majoritairement vers le nord le matin puisque les gens se déplacent vers les lieux d'enseignement et de travail quittant donc leur foyer pour la journée. En après-midi, à l'inverse, la densité du trafic est plus forte en direction sud alors que tous retournent à la maison.

Le parcours 807 n'a pas cette particularité puisque le parcours au complet sillonne à la fois des universités, d'importants lieux d'emploi, des hôpitaux et des lieux de résidence. De plus, ses extrémités n'ont pas de vocation distincte. C'est donc pourquoi les heures de pointe du matin et de l'après-midi ont une influence dans les deux directions, comme on peut le voir au Tableau 4.

Il est vrai que la période de la journée a une influence sur les mesures d'irrégularité tout comme la période la semaine. Sans surprise, il a été noté que les journées du lundi au vendredi sont plus susceptibles de présenter des intervalles irréguliers que le samedi ou le dimanche. Le Tableau 5 illustre les niveaux d'irrégularité par période de la semaine pour chaque heure. Pour chacune des heures, on compare entre elles les trois périodes de la semaine.

	Heure de la journée											
Période	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Semaine												
Samedi												
Dimanche												

Tableau 5 : Ampleur des mesures d'irrégularité par heure par période de la semaine

Au-delà des caractéristiques temporelles qui font en sorte que certaines périodes sont plus propices au groupage d'autobus que d'autres, l'emplacement physique d'un arrêt sur un parcours peut aussi influencer les probabilités d'observer le phénomène. Il a été précédemment expliqué que le problème de groupage d'autobus en est un qui prend de l'ampleur si non contrôlée. Ainsi, un retard d'une quelconque durée deviendra de plus en plus important si des mesures ne sont pas prises rapidement. Cette dynamique s'observe dans les données réelles fournies par le RTC pour le parcours 807. En effet, les arrêts en fin de parcours présentent des mesures d'irrégularité plus grandes que celles observées en début de parcours. Le Tableau 6 présente la force des mesures d'irrégularité pour une période de deux semaines à l'automne 2016 en direction est. Encore une fois, une cellule plus foncée signifie un plus grand éloignement de l'intervalle souhaité.

Arrêt	Moyenne des mesures d'irrégularité entre 8h et 12h	Arrêt	Moyenne des mesures d'irrégularité entre 8h et 12h
1	11	22	26
2	7	23	27
3	9	24	28
4	9	25	29
5	10	26	29
6	11	27	30
7	11	28	30
8	13	29	31
9	14	30	31
10	14	31	31
11	16	32	32
12	17	33	32
13	18	34	33
14	19	35	34
15	20	36	36
16	20	37	37
17	22	38	37
18	22	39	37
19	23	40	40
20	25	41	39
21	26	42	48

Tableau 6 : Moyenne des mesures d'irrégularité par arrêt (en pourcentage)

L'augmentation des mesures d'irrégularité bien qu'elle soit graduelle est très importante. En effet, pour un intervalle souhaité de dix minutes par exemple, les premiers arrêts présenteraient des écarts d'environ une minute alors qu'au dernier arrêt, ce même écart s'élèverait à cinq minutes. Il a été mentionné plus tôt qu'une des raisons pour lesquelles le problème s'amplifie d'arrêt en arrêt provient du fait qu'un autobus qui accuse du retard devra monter à son bord plus de passagers qu'à l'habitude. Puisque des passagers destinés au prochain passage d'autobus seront déjà présents à l'arrêt lors du passage de l'autobus en retard, le nombre de montées sera plus important augmentant ainsi le temps d'immobilisation nécessaire. Au Tableau 7, on compare la moyenne des montées à un arrêt dans deux situations. La moyenne des montées en situation d'écarts négatifs est calculée à partir des passages d'autobus où l'intervalle réel était de 20% inférieur à l'intervalle souhaité. La moyenne des montées en situation d'écarts positifs est calculée de manière inverse et présente les moyennes en situation de retard. Il est possible de constater que pour tous les arrêts, le nombre de personnes montées à bord est supérieur dans les situations de retard par rapport à l'intervalle souhaité.

Arrêts	Moyenne des montées en situation d'écart négatif	Moyenne des montées en situation d'écart positif	Différence de la moyenne des montées entre les deux situations
1	1,94	2,57	0,63
2	0,43	0,72	0,29
3	0,40	0,78	0,38
4	0,13	0,24	0,12
5	0,39	0,45	0,06
6	0,31	0,58	0,27
7	1,33	1,53	0,20
8	0,80	1,28	0,48
9	0,73	1,13	0,39
10	0,56	0,80	0,24
11	2,76	3,63	0,87
12	1,06	1,39	0,32
13	0,94	1,37	0,43
14	1,48	2,09	0,60
15	1,72	2,42	0,70
16	1,38	1,97	0,59
17	0,53	0,67	0,14
18	0,57	0,74	0,17
19	1,00	1,44	0,44
20	1,85	2,33	0,48
21	1,20	1,76	0,56
22	2,20	3,24	1,04
23	1,56	2,60	1,03
24	0,90	1,30	0,39
25	0,69	1,01	0,32
26	1,51	2,25	0,73
27	0,64	0,88	0,24
28	0,78	1,31	0,53
29	0,65	1,01	0,36
30	0,69	1,17	0,48
31	0,53	0,85	0,32
32	0,31	0,56	0,25
33	0,87	1,46	0,58
34	0,23	0,51	0,28
35	0,16	0,31	0,15
36	0,30	0,53	0,23
37	0,28	0,51	0,24
38	0,18	0,30	0,12

39	0,20	0,34	0,14
40	0,08	0,08	0,00
41	0,03	0,05	0,01
42	0,01	0,02	0,01

Tableau 7 : Moyenne des montées par arrêt en situation d'écarts positifs et négatifs

Les conditions routières étant ce qu'elles sont dans la Ville de Québec, la neige complique à l'occasion les déplacements et accentue le phénomène de groupage d'autobus. Le Tableau 8 compare les mesures d'irrégularité du mercredi 15 mars 2017 où une tempête hivernale a fait rage sur la ville avec les mesures d'irrégularité du mercredi précédent.

	Heure de la journée				
Date	13	14	15	16	17
2017-03-08	36	25	14	11	25
2017-03-15	55	36	26	37	59
Écart	19	10	12	25	34

Tableau 8 : Comparaison des mesures d'irrégularité (en pourcentage) lors de conditions routières difficiles

À la lumière de toutes ces observations, il est évident que certaines périodes ou encore certains arrêts sont plus problématiques et c'est dans des contextes plus complexes que les solutions proposées devront être testées pour s'assurer qu'elles ont les effets escomptés même dans les pires conditions.

3.1.2. Exemples réels d'une situation de groupage d'autobus

Comme il a été mentionné plus tôt, une situation de groupage d'autobus typique présente un écart positif suivi d'un écart négatif qui se régularise par la suite pour se répéter plus tard lorsque de nouveaux aléas se produisent. Le Tableau 9 est tiré des données réelles fournies par le RTC pour le parcours 807 et présente une situation de groupage typique. Les notions de temps et d'heures sont présentées en secondes.

Arrêt	Arrivée prévue	Arrivée réelle	Intervalle réel	Intervalle prévu	Différence absolue	Mesure d'irrégularité (en %)
4	74460	74477	871	900	29	3
4	75360	75537	1060	900	160	18
4	76260	76271	734	900	166	18

Tableau 9 : Exemple 1 de groupage tiré des données réelles

On y voit que le tout premier autobus respectait plutôt bien l'intervalle prévu de 900 secondes puisque sa mesure d'irrégularité n'est que de 3%. Toutefois, il est possible de constater que l'autobus du deuxième passage a pris du retard ce qui a fait en sorte qu'il est arrivé 160 secondes après l'heure de passage souhaitée. Le dernier autobus quant à lui est passé 734 secondes après celui qui avait pris du retard. Ce dernier, bien qu'il soit arrivé à l'heure prévue à l'arrêt, est plus rapproché de l'autobus passé précédemment puisque celui-ci accusait un retard. On est donc en mesure de constater que la mesure d'irrégularité est de 18% pour les deux derniers autobus de l'exemple ce qui illustre parfaitement les effets partagés du groupage d'autobus.

Bien que les effets soient partagés, ils ne sont pas nécessairement immédiats. Le deuxième exemple présenté dans le Tableau 10 illustre une deuxième situation de groupage, mais où l'effet contraire n'est pas instantané.

Arrêt	Arrivée prévue	Arrivée réelle	Intervalle réel	Intervalle prévu	Différence absolue	Mesure d'irrégularité (en %)
5	64260	64251	882	900	18	2
5	65220	65287	1036	960	76	8
5	66240	66331	1044	1020	24	2

Tableau 10 : Exemple 2 de groupage tiré des données réelles

Dans ce deuxième exemple, lors du premier passage, la situation était toujours contrôlée avec une mesure d'irrégularité aussi basse que 2%. Par la suite, un autobus subit du retard et arrive donc plus d'une minute après l'autobus précédent. La mesure d'irrégularité s'éloigne de la valeur cible de 0% et monte à 8%. Dans le premier exemple, on voyait aussitôt l'effet inverse sur le passage suivant. Toutefois, ici, le troisième autobus a aussi subi du retard ce qui a fait en sorte qu'il est arrivé selon l'intervalle souhaité bien malgré lui. Ici, il y a donc deux retards consécutifs qui font en sorte que l'écart négatif ne se fera sentir que lors d'un passage suivant. Il serait également possible de voir l'écart négatif être réparti sur plusieurs passages si chacun des prochains autobus accuse un léger retard jusqu'au rétablissement de la situation.

Chapitre 4

Modélisation et structure de la simulation

Ce chapitre s'intéressera à la structure de la simulation. Une importance particulière sera également accordée à la validité du modèle.

Afin de résoudre le problème à l'étude dans un contexte se rapprochant le plus possible de la réalité vécue sur le parcours 807, la simulation à événements discrets a été choisie. La simulation permet de recréer un environnement reposant sur de nombreuses variables aléatoires à l'origine d'événements causant le groupage d'autobus.

4.1. Types d'événements

On distingue deux types d'événements soit les événements conditionnels et prédéterminés. Les événements conditionnels dépendent de l'état du système pour qu'ils soient traités. Par exemple, pour pouvoir retirer de l'argent au guichet automatique, il faut que le guichet soit libre. Dans ce cas-ci, nous sommes en présence d'un événement conditionnel, soit l'action de retirer de l'argent, et d'un état, soit si oui ou non le guichet est libre. Dès que le guichet est libre, on peut procéder à l'événement.

À l'inverse, il existe également les événements prédéterminés qui ne dépendent pas de conditions et qui se réaliseront à un moment déterminé. L'action de quitter le guichet automatique par exemple n'a rien de conditionnel et se produira à un moment quelconque lorsque la transaction au guichet sera terminée.

4.2. Structure de la simulation

La simulation à événements discrets traite une série d'événements se produisant à différents moments classés dans une liste chronologique. La simulation se structure de la manière suivante : le prochain événement est récupéré, les changements à l'état du système et la création d'autres événements qui y sont associés sont traités, les conditions des événements conditionnels sont vérifiées et ces derniers sont exécutés si les conditions sont remplies. La Figure 8 illustre la structure de la simulation.

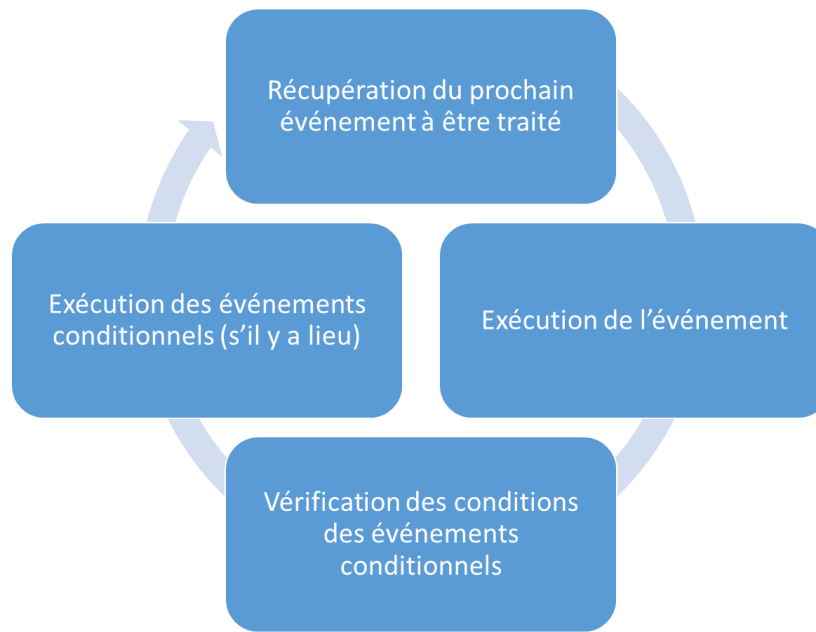


Figure 8 : Structure de la simulation

4.3. Table d'événements

Le Tableau 11 présente de manière détaillée tous les événements conditionnels et prédéterminés de la simulation visant à reproduire le parcours 807 du RTC. Les conditions de réalisation, les changements apportés à l'état du système et les événements à créer sont présentés pour tous les événements lorsqu'applicables. Lorsqu'on parle d'horloge, il s'agit du temps actuel de la simulation au moment de traiter cet événement.

Événements	Type	Conditions	Changements d'état	Événements déclenchés
Arrivée du voyage n sur le parcours	Prédéterminé			Arrivée du voyage $n+1$ sur le parcours Temps : Horloge + Intervalle souhaité Arrivée de l'autobus n à l'arrêt t Temps = Horloge
Arrivée de l'autobus n à l'arrêt t	Prédéterminé		File d'autobus à l'arrêt $t = + 1$	
Début de service de l'autobus n à l'arrêt t	Conditionnel	File d'autobus à l'arrêt $t \geq 1$ État de l'arrêt t = Libre	File d'autobus à l'arrêt $t = - 1$ État de l'arrêt t = En service	Départ de l'autobus n de l'arrêt t Temps = Horloge + Temps d'immobilisation
Départ de l'autobus n de l'arrêt t	Prédéterminé		État de l'arrêt t = Libre	Si $t < \text{Nombre d'arrêts du parcours}$, alors, Arrivée de l'autobus n à l'arrêt $t+1$ Temps = Horloge + Temps de déplacement

Tableau 11 : Table d'événements

Comme le montrait le cycle de la structure de la simulation, chaque tour de roue est débuté par la récupération du prochain événement dans la liste. En début de simulation, on crée donc le premier événement soit l'arrivée sur le parcours du premier autobus au temps zéro. Ce premier événement comme on l'a vu dans le précédent tableau entraîne la création de l'arrivée sur le parcours du deuxième autobus au temps correspondant à l'intervalle. L'arrivée du premier autobus enclenche également l'arrivée de l'autobus au premier arrêt. Ainsi, l'arrivée sur le parcours et l'arrivée au premier arrêt sont traitées de manière séparée dans la simulation, mais le moment auquel ces événements sont exécutés est le même. Une fois la simulation débutée, les trois autres événements se succèdent. À la Figure 9, on illustre la situation lors de chacun de ces événements.

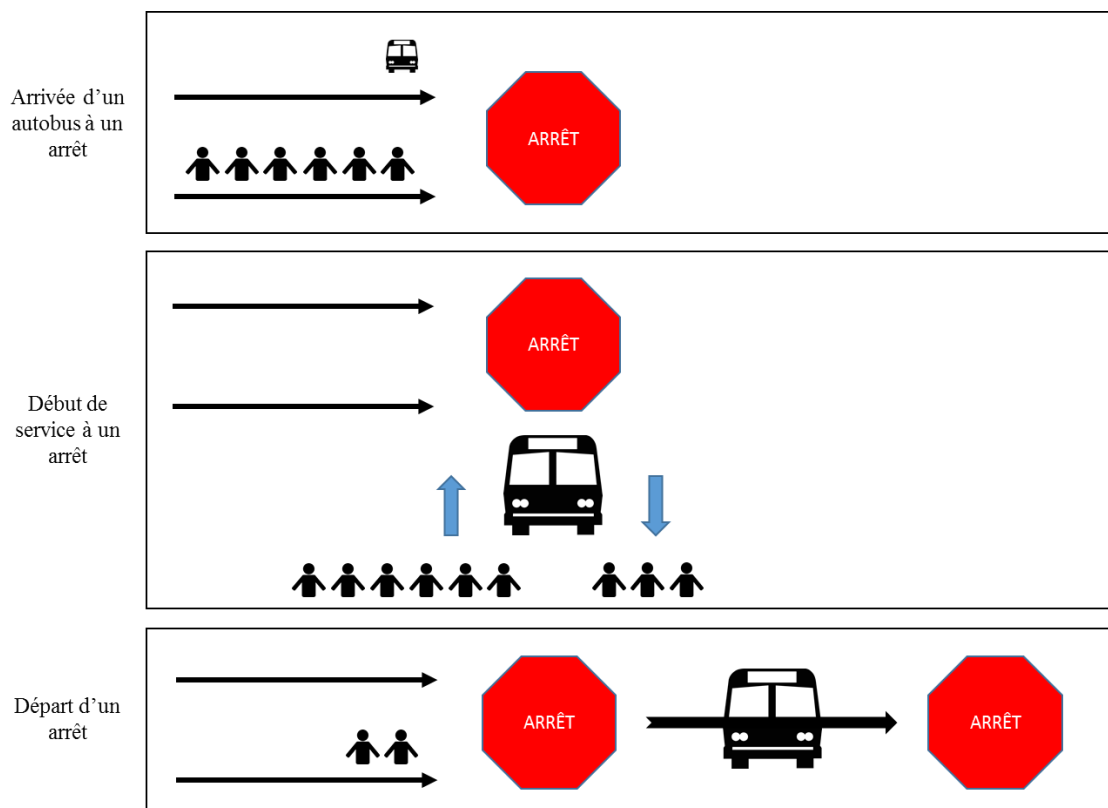


Figure 9 : Dynamique des événements

Dans un premier temps, lorsqu'un autobus arrive à un arrêt, il se positionne dans une file d'attente. Dans la majorité des cas, l'autobus arrivera à l'arrêt, se placera en file et le début de service sera traité immédiatement puisqu'aucun autre autobus se trouvera devant lui dans la file ou sera en train de faire monter et descendre des passagers. La file d'attente d'autobus ne sera utile qu'en situation de groupage d'autobus où l'intervalle entre deux autobus sera tellement mince qu'ils seront à l'arrêt en même temps.

Comme la table d'événements le présentait, un début de service sera traité si à un arrêt quelconque un autobus se trouve en file et l'arrêt est libre, soit aucun autre autobus n'est présent à l'arrêt. Lors d'un début de service, tous les passagers destinés à cet autobus monteront à bord et ceux voulant descendre le feront.

Finalement, lorsque l'autobus se sera immobilisé assez longtemps pour faire monter et descendre les passagers, il quittera vers le prochain arrêt. L'arrivée de cet autobus à ce prochain arrêt sera créée et le cycle recommencera.

4.4. Scénarios

La simulation sera testée sous trois environnements choisis qui se distinguent par leur direction et leurs heures de la journée. Les environnements choisis couvrent les deux directions potentielles du parcours et surtout, ils permettent de tester le modèle en période de pointe et hors pointe. Ces trois scénarios seront utilisés afin de générer des résultats de référence et des résultats associés à des solutions potentielles qui pourront ensuite être comparés.

Le premier contexte choisi pour être testé en environnement de simulation est en direction est pour la période de 7 à 9h le matin. Ce scénario sera subséquemment nommé Est - pointe du matin. Ensuite, la même procédure a été appliquée dans la même direction, mais cette fois aux heures de pointe de l'après-midi soit entre 16h et 18h, ci-après nommé Est – pointe du soir. Finalement, afin de s'assurer que le modèle était pertinent à tout moment, on a également réalisé l'exercice en direction ouest entre 10h et midi, ci-après nommé Ouest – hors pointe. Pour chacun de ces environnements, on fait référence à la période de la semaine du lundi au vendredi.

4.5. Méthodes d'estimation des données de la simulation

Afin de créer un modèle de simulation représentatif du parcours 807 du RTC, des données s'échelonnant sur une période d'un peu plus de 3 mois, de la fin février à la mi-juin 2017, ont été analysées afin d'alimenter la simulation. Des méthodes d'estimation du temps de déplacement entre les arrêts, du temps d'immobilisation aux arrêts ainsi que le nombre de montées et de descentes à chaque arrêt ont dû être développés.

Le RTC, grâce à ces technologies avancées, est en mesure d'enregistrer de nombreuses données. Ainsi, il existe une entrée de données pour tous les passages d'autobus pour tous les arrêts. Chacune de ces entrées de données indique l'heure d'arrivée à l'arrêt ainsi que l'heure de départ. De plus, un système de détection aux portes des autobus permet d'estimer assez précisément le nombre de

personnes qui sont montées à bord et qui sont descendues permettant ainsi de déterminer la charge à tout moment dans l'autobus. C'est à partir de cette base de données que les méthodes d'estimation suivantes ont été développées. Celles-ci sont toujours basées sur les directions et heures de la journée du scénario testé. Ainsi, pour le scénario Est – Pointe du matin, les données utilisées pour développer les formules d'estimation ainsi que les tables de probabilité seront celles en direction est entre 7h et 9h exclusivement.

4.5.1. Temps d'immobilisation

La première méthode d'estimation visait à bâtir une formule qui permettrait d'évaluer le temps d'immobilisation nécessaire à un arrêt compte tenu de divers paramètres. Au cours d'une discussion avec le RTC, il a été mentionné que trois principaux facteurs pouvaient influencer le temps d'immobilisation nécessaire à un arrêt soit le nombre de montées, le nombre de descentes ainsi que la charge à bord. En effet, la charge à bord peut avoir une influence sur le temps d'immobilisation puisque si la charge est très importante, la circulation à bord du véhicule se fait plus difficilement complexifiant les montées et les descentes. Le Tableau 12 montre les charges que peut accueillir un autobus articulé comme celui qui dessert le parcours 807. Pour chacune de ces charges, on décrit le confort qui y est associé pour le passager.

		Niveau de service	
Espace occupé par passager debout (en m ²)	Capacité – Passagers total (Passagers debout)	Point de vue du passager	Point de vue de l'exploitant
> 1.0	< 59 (11)	- Possibilité de se disperser. - La plupart sont assis.	
0.5 - 1.0	59 (11) – 69 (21)	- Confortable debout.	- Circulation facile à l'intérieur du véhicule.
0.4 - 0.49	70 (22) – 74 (26)	- Debout sans contact. - Passagers debout commencent à avoir le même espace que les passagers assis.	- Circulation assez facile à l'intérieur du véhicule.

0.30 - 0.39	75 (27) – 83 (35)	- Contacts occasionnels. - Passagers debout ont moins d'espace que les passagers assis.	- Équilibre entre le confort des passagers et la capacité. - Se déplacer exige un effort qui peut résulter en une perte de temps aux arrêts.
0.2 - 0.29	84 (36) – 101 (53)	- Conditions plutôt inconfortables pour un américain moyen. - Contacts fréquents et difficulté avec les sacs et autres objets.	- Déplacements extrêmement difficiles causant des arrêts plus longs.
< 0.2	> 101 (53)	- Conditions extrêmes.	- Déplacements extrêmement difficiles causant des arrêts plus longs. - Les passagers peuvent se voir refuser le droit de monter à bord. Ralentissement du service.

Tableau 12 : Calcul de la capacité d'un véhicule articulé

Source : Réseau de Transport de la Capitale

Ce tableau a été déterminant dans le choix des variables permettant d'évaluer les temps d'immobilisation puisque, comme le tableau l'indique, certaines charges n'impliquent pas une circulation difficile à bord du véhicule. D'après ce tableau, la charge doit dépasser 75 passagers pour qu'on puisse commencer à voir des temps d'immobilisation plus longs causés par la charge.

Parmi toutes les entrées de données obtenues pour le printemps 2017, la charge à bord n'a dépassé les 75 passagers que dans 0.08% des cas. Compte tenu de la rareté d'un tel événement, il a été décidé d'ignorer cet aspect lors de l'estimation des temps d'immobilisation puisque sa pertinence était négligeable dans le contexte du parcours 807.

Le calcul du temps d'immobilisation consiste donc en une combinaison d'un temps fixe lié à l'immobilisation du véhicule ainsi qu'à la fermeture et l'ouverture des portes et d'un temps variable pour les montées et les descentes. Puisque les montées à la porte avant et les descentes à la porte arrière se font de manière simultanée, ces deux temps variables selon le nombre de montées et de

descentes ne seront bien entendu pas additionnés. En effet, le maximum de ces deux temps sera ajouté au temps fixe. Par exemple, pour un temps par personne de 4 secondes pour les montées et 3 secondes pour les descentes, si 2 personnes montent à bord et 6 personnes descendent, alors on ajoutera 18 secondes au temps fixe ce qui correspond au temps nécessaire pour les descentes.

La formule utilisée pour estimer le temps d'immobilisation est donc la suivante.

$$TI_{nt} = a_s + \max(b_s * D_{nt}, c_s * M_{nt})$$

où TI_{nt} = temps d'immobilisation de l'autobus n à l'arrêt t

M_{nt} = nombre de montées à l'arrêt t lors du passage de l'autobus n

D_{nt} = nombre de descentes à l'arrêt t lors du passage de l'autobus n

a_s = Temps fixe pour le scénario s

b_s = Temps par personne montée pour le scénario s

c_s = Temps par personne descendue pour le scénario s

Les coefficients a_s , b_s et c_s ont été estimés à partir des données du RTC. Comme mentionné plus tôt, grâce à la géolocalisation, les heures d'arrivée et de départ d'un arrêt sont connues. Toutefois, il faut savoir que certains arrêts sont physiquement localisés à quelques mètres d'un feu de circulation. Ainsi, le temps d'immobilisation, calculé à partir des heures d'arrivée et de départ, est surestimé lorsque l'autobus doit demeurer en position à l'arrêt puisque la lumière est rouge. Ainsi, physiquement, l'autobus se situe encore à l'arrêt et les données de géolocalisation n'indiquent toujours pas une heure de départ même si en réalité les montées et descentes de passagers sont complétées.

Ainsi, pour l'estimation d'un temps fixe d'immobilisation, on a calculé la moyenne du temps d'immobilisation pour toutes les entrées de données où les montées ainsi que les descentes étaient nulles. Cette moyenne a été prise uniquement pour les arrêts distancés des feux de circulation pour éviter le biais potentiel discuté ci-haut. On a également retiré le premier arrêt de la moyenne totale puisque celui-ci fait aussi l'objet d'une surestimation. Dans la plupart des cas, l'autobus arrive à l'arrêt à l'avance puisqu'il se prépare pour son départ en sens contraire ce qui a pour effet de rendre les temps d'immobilisation très longs.

Le temps fixe d'immobilisation est donc obtenu en prenant la moyenne des temps d'immobilisation où il n'y avait aucune montée ou descente pour tous les arrêts sauf le premier et ceux étant trop rapprochés d'un feu de circulation.

Au terme de cette première partie de la méthode, il faut estimer un temps par personne qui monte et qui descend. Pour ce faire, le temps fixe d'immobilisation calculé a été soustrait du temps d'immobilisation réel pour chacune des entrées de données qui correspondait à l'un des scénarios suivants : aucune montée et un nombre de descentes positif, et aucune descente et un nombre de montées positif. Pour toutes les entrées de données où le résultat de cette soustraction était négatif, le résultat a été réévalué comme donnant un temps d'immobilisation restant nul.

Dans le premier scénario pour lequel les descentes étaient positives, on a divisé le temps d'immobilisation restant par le nombre de descentes obtenant ainsi un temps par personne descendu. L'inverse a été fait dans le cadre du deuxième scénario. Une fois de plus, on a calculé la moyenne des moyennes des temps d'immobilisation par personne montée et descendue en excluant le premier arrêt et ceux trop rapprochés des feux de circulation.

Au final, les formules d'estimation du temps d'immobilisation sont les suivantes pour les trois scénarios proposés. Le résultat de ces formules en contexte de simulation est toujours arrondi à l'entier le plus proche.

$$TI_{nt} = a_1 + \max(b_1 * D_{nt}, c_1 * M_{nt}) = 7.2 + \max(5.4 * D_{nt}, 3.89 * M_{nt})$$

$$TI_{nt} = a_2 + \max(b_2 * D_{nt}, c_2 * M_{nt}) = 7.69 + \max(5.02 * D_{nt}, 4.02 * M_{nt})$$

$$TI_{nt} = a_3 + \max(b_3 * D_{nt}, c_3 * M_{nt}) = 3.43 + \max(4.61 * D_{nt}, 4.45 * M_{nt})$$

4.5.2. Temps de déplacement

La première méthode d'estimation consistait à évaluer le temps de déplacement entre chacun des arrêts tout en conservant l'aspect dynamique et incertain de ces temps de voyage. Évidemment, une des variables qui influencent grandement les temps de déplacement entre les arrêts est le nombre de feux de circulation qui sépare chacun d'eux. La méthode qui a été choisie afin d'estimer le temps de déplacement tout en considérant le nombre de feux de circulation vers chacun des arrêts consiste à augmenter le temps de déplacement pour chaque feu rouge où l'autobus doit s'arrêter. Afin de calculer le temps de déplacement, trois paramètres provenant des données réelles sont nécessaires, soit le nombre de feux de circulation entre chaque arrêt ainsi que les 10^e et 90^e percentiles des temps de déplacement vers chaque arrêt.

La première étape consistait donc à déterminer le nombre de feux de circulation avant chaque arrêt dans les deux directions étudiées. En ce qui concerne le calcul des temps de déplacement réels, les heures d'arrivée et de départ ont une fois de plus été utilisées. Il est important d'ajouter une précision relative à la méthode de calcul du temps d'immobilisation précédemment expliquée. Pour un arrêt situé tout près d'un feu de circulation, pour un même nombre de montées et de descentes, le temps d'immobilisation calculé en contexte de simulation sera inférieur à celui noté en réalité puisque ce dernier incluait du temps passé à attendre au feu rouge. Bien entendu, pour des entrées de données où la lumière était verte, les temps calculé et réel seront très similaires.

Considérément, un temps de déplacement ajusté a été calculé. Pour chaque entrée de données, le temps d'immobilisation selon la formule présentée à la section précédente a été calculé. On a ensuite calculé la différence entre le temps d'immobilisation réel et le temps d'immobilisation calculé. Cette différence a été ajoutée au temps de déplacement réel pour obtenir un temps de déplacement ajusté. Le Tableau 13 illustre cette méthode de calcul dans deux situations potentielles pour le scénario Est – pointe du matin. Les abréviations TD et TI utilisées dans le Tableau 13 pour simplifier la lecture signifient respectivement *Temps de déplacement* et *Temps d'immobilisation*. Les temps sont tous présentés en secondes.

Arrêt	TD réel	Nombre de montées	Nombre de descentes	TI réel	TI calculée selon la formule	TD ajusté
5	130	5	2	13	27	116
9	65	1	3	25	23	67

Tableau 13 : Exemples de calcul du temps de déplacement ajusté

Le temps de déplacement réel est calculé en soustrayant l'heure de départ à l'arrêt $t-1$ de l'heure d'arrivée à l'arrêt t . Le temps d'immobilisation réel est quant à lui calculé en soustrayant l'heure d'arrivée à l'arrêt t de l'heure de départ à l'arrêt t . La formule utilisée pour le temps d'immobilisation calculé est celle présentée à la section 4.5.1. pour le scénario Est – pointe du matin.

Cette méthode a été utilisée afin de considérer le temps passé à un feu rouge comme du temps de déplacement et non d'immobilisation qui lui dépend d'un nombre de montées et de descentes. Cette façon de faire permet d'améliorer la précision de la méthode d'estimation du temps d'immobilisation et de déplacement.

Une fois les temps de déplacement ajustés obtenus, afin d'éliminer les données aberrantes relevant de situations extrêmes, pour chaque arrêt, on a calculé les 10^e et 90^e percentiles des temps de

déplacement ajustés pour chacun des arrêts. Ces deux valeurs extrêmes deviendront les temps minimal et maximal de déplacement vers l'arrêt correspondant.

Finalement, un dernier élément est nécessaire au processus d'estimation des temps de déplacement soit la probabilité qu'à l'arrivée à un feu de circulation, celui-ci soit rouge. Étant donné que la plupart des intersections du parcours 807 est la rencontre de trois directions, on fait l'hypothèse qu'il y a une chance sur trois que la lumière soit rouge au moment du passage. On établit donc cette probabilité à 35% en arrondissant.

Lorsque le nombre de feux de circulation entre les arrêts, ainsi que les 10^e et 90^e percentiles des temps de déplacement pour chaque arrêt sont connus et que la probabilité de feu rouge a été déterminée, tous les éléments sont en mains pour calculer le temps de déplacement en contexte de simulation. Le processus est le suivant. Pour chacun des feux de circulation qu'un autobus rencontrera vers le prochain arrêt, un nombre aléatoire entre 0 et 1 est tiré. Si ce nombre aléatoire est inférieur ou égal à 0.35, on considère que l'autobus devra s'immobiliser à ce feu de circulation. Selon le nombre total de feux rouges que l'autobus rencontrera, on détermine les temps de déplacement minimal et maximal. On tire ensuite un dernier nombre aléatoire qui déterminera le temps de déplacement final qui se situera entre la limite inférieure et supérieure.

Prenons un exemple où le 10^e percentile est 53 secondes et le 90^e percentile, 137 secondes. Pour l'arrêt dont il est question ici, on compte deux feux de circulation depuis le précédent. On calcule une limite inférieure et supérieure pour chaque possibilité de feux rouges. Dans le cas présent, il y a trois possibilités : l'autobus ne rencontre aucun feu rouge, un seul feu rouge ou deux feux rouges. Ainsi, si toutes les lumières sont vertes, le temps de déplacement sera entre 53 et 81 secondes. Si une seule des lumières est rouge, alors le temps de déplacement sera entre 81 et 109 secondes. Dans le cas où toutes les lumières seraient rouges, alors le temps serait entre 109 et 137 secondes. Les limites inférieures et supérieures sont calculées de la manière suivante.

$$D_t = \frac{TD_{90,t} - TD_{10,t}}{S_t + 1}$$

$$LI_{ti} = TD_{10,t} + (i * D_t)$$

$$LS_{ti} = TD_{10,t} + ((i + 1) * D_t)$$

où D_t = durée séparant chacune des limites inférieures et supérieures à l'arrêt t

$TD_{90,t}$ = 90^e percentile des temps de déplacement vers l'arrêt t

$TD_{10,t}$ = 10e percentile des temps de déplacement vers l'arrêt t

S_t = nombre de feux de circulation avant l'arrêt t

LI_{ti} = limite inférieure à l'arrêt t pour un nombre de feux rouges i (en secondes)

LS_{ti} = limite supérieure à l'arrêt t pour un nombre de feux rouges i (en secondes)

i = nombre de feux rouges rencontrés vers l'arrêt t

Finalement, on évalue cette dernière formule permettant d'obtenir le temps de déplacement.

$$TD_{t,n} = LI_{ti} + (LS_{ti} - LI_{ti}) * NA$$

où $TD_{t,n}$ = temps de déplacement vers l'arrêt t de l'autobus n en secondes

NA = nombre aléatoire entre 0 et 1

À l'Annexe 3, il est possible de consulter pour chacun des scénarios la table utilisée en simulation présentant les 10^e et 90^e percentiles des temps de déplacement ainsi que le nombre de feux de circulation avant chacun des arrêts.

Toujours selon l'exemple précédent, si le nombre de feux rouges rencontrés a été évalué à 1 et que le nombre aléatoire tiré est 0.60 alors le temps de déplacement de l'autobus en question vers cet arrêt sera de 98 secondes comme le démontre la formule suivante. Il est important de noter que de nouveau les résultats sont arrondis à l'entier le plus proche.

$$TD_{t,n} = 81 + (109 - 81) * 0.6 = 98$$

Cette méthode de calcul permet d'ignorer les données extrêmes qui relèvent de situations exceptionnelles dans les données fournies par le RTC en plus de permettre un modèle de simulation dynamique où les temps de déplacement dépendent non seulement du nombre de feux qui sépare chacun des arrêts, mais aussi d'une probabilité que l'autobus soit forcé de s'immobiliser à ces intersections.

4.5.3. Descentes

Un passager montant à bord d'un véhicule pourra descendre à n'importe lequel des arrêts subséquents sur le parcours. Toutefois, les probabilités de descente pour chacun des arrêts ne sont évidemment pas les mêmes. Par exemple, un passager qui monte à bord à l'arrêt t est très peu susceptible de descendre à l'arrêt $t+1$. D'autres arrêts, plus populaires pour leur emplacement sur le parcours, verront quant à eux certainement beaucoup plus de passagers y descendre.

Dans le contexte de simulation, lorsqu'un passager monte à bord d'un véhicule, il importe de lui assigner un arrêt de descente. Une table de probabilités est donc bâtie pour chacun des scénarios testés en simulation selon les hypothèses suivantes. D'abord, un passager ne peut descendre qu'à un arrêt subséquent sur le parcours. Cela implique donc qu'aucune descente ne peut être enregistrée au premier arrêt. On fait également l'hypothèse que le véhicule est vide à la fin du parcours. Cela implique donc que tous les passagers à bord du véhicule lors de l'arrivée au dernier arrêt du parcours devront y descendre. Dans un même ordre d'idées, aucune montée ne peut être enregistrée au dernier arrêt. Pour le scénario Est – pointe du soir, la table de probabilités cumulées prendrait la forme présentée au Tableau 14.

Arrêt de descente	Arrêt de montée			
	1	2		41
2	0.002	0		0
3	0.005	0.003		0
42	1	1		1

Tableau 14 : Extrait de la table de probabilités cumulées de descente en Est - pointe du soir

Afin de déterminer chacune de ces probabilités, la méthode suivante a été utilisée. Pour chaque arrêt, on a additionné le nombre de montées enregistrées sur une période d'un peu plus de trois mois au printemps 2017 pour la direction et les heures choisies pour chacun des scénarios. On a ensuite compté le nombre d'entrées de données pour chacun des arrêts. Pour des raisons d'ordre technologique, il n'existe pas le même nombre de données pour chacun des arrêts. Par exemple, le système de détection du nombre de descentes sur un des autobus à un moment quelconque a pu faire en sorte que certaines données n'ont pas pu être enregistrées. Afin que les probabilités ne soient pas affectées par cet aspect, un nombre total de descentes ajusté a été calculé pour chacun des arrêts. Le Tableau 15 présente les résultats obtenus pour chacun des arrêts pour le scénario Ouest – hors pointe.

Arrêt	Nombre total de descentes	Nombre d'entrées de données	Nombre total de descentes ajustés
1	0	645	0
2	5	574	4
3	11	573	10
4	42	572	37
5	25	572	22

6	61	572	53
7	130	572	114
8	77	574	67
9	62	584	53
10	31	585	26
11	41	585	35
12	87	585	74
13	510	582	438
14	208	580	179
15	611	580	527
16	411	582	353
17	406	581	349
18	369	581	318
19	814	581	701
20	308	582	265
21	485	575	422
22	1199	575	1043
23	1603	575	1394
24	1091	575	949
25	506	572	442
26	173	573	151
27	156	574	136
28	835	573	729
29	413	552	374
30	348	575	303
31	196	373	263
32	398	575	346
33	833	576	723
34	150	569	132
35	162	576	141
36	101	557	91
37	364	556	327
38	134	575	117
39	95	575	83
40	30	575	26
41	53	573	46
42	133	572	116
43	102	566	90
44	19	170	56

Tableau 15 : Total réel et ajusté de descentes pour chacun des arrêts en Ouest - hors pointe

Les résultats ont été ramenés sur la base de 500 entrées de données. Ainsi, le nombre total de descentes ajusté indique le nombre de descentes qui aurait été enregistré si le nombre d'entrées de données avait été de 500.

À partir de ce tableau, on calcule la probabilité cumulée de descente de la manière suivante.

$$PD_{t,v} = \frac{\sum_{i=v+1}^t NDA_i}{\sum_{i=v+1}^{44} NDA_i}$$

où $PD_{t,v}$ = probabilité de descente cumulée à l'arrêt t lors d'une montée à l'arrêt v

NDA_i = nombre de descente ajustée à l'arrêt i

Évidemment, la valeur maximale que pourrait prendre i pour un scénario en direction est serait plutôt 42.

La formule suivante indique le calcul de la probabilité cumulée de descendre à l'arrêt 8 considérant une montée à l'arrêt 4 et ce, pour le scénario Ouest – hors pointe.

$$PD_{8,4} = \frac{\sum_{i=5}^8 NDA}{\sum_{i=5}^{44} NDA} = \frac{22 + 53 + 114 + 67}{12074} = 0.0212$$

Les tables de probabilités cumulées pour chacun des trois scénarios sont disponibles à l'Annexe 4.

À partir de la table de probabilité du scénario choisi en contexte de simulation, il est possible de déterminer l'arrêt de descente d'un passager selon la méthode suivante. Pour chaque passager, on tire un nombre aléatoire en 0 et 1. L'arrêt de descente est celui pour lequel la probabilité cumulée est supérieure au nombre aléatoire et pour lequel la probabilité cumulée de l'arrêt immédiatement avant est inférieure au nombre aléatoire. Dans l'exemple précédent, on a $PD_{8,4} = 0.0212$ et $PD_{9,4} = 0.0255$. Si le nombre aléatoire tiré est 0.023 alors le passager descendra à l'arrêt 9 puisque 0.0255 est plus grand que 0.023 et 0.0212 plus petit.

4.5.4. Montées

La méthode utilisée pour déterminer le nombre de montées diffère considérablement de celles pour les descentes. Le nombre de montées sera influencé par les intervalles séparant les autobus.

Le phénomène de groupage d'autobus a comme caractéristique d'influencer le nombre de personnes qui montent à bord d'un véhicule. En effet, il a été expliqué qu'un autobus accusant du retard ferait monter à son bord plus de passagers puisque certains passagers qui avaient l'intention de monter dans

le véhicule suivant seront déjà arrivés à l'arrêt au moment du passage. La méthode d'estimation des montées est donc basée sur cette hypothèse.

Lors de l'arrivée d'un autobus à un arrêt, une table de probabilités cumulées est utilisée pour déterminer le nombre de passagers arrivés à l'arrêt et prêts à monter à bord. La table de probabilités cumulées à utiliser à chaque passage dépend de la différence de temps entre cet autobus et celui qui l'a précédé à l'arrêt. Dans le contexte de simulation actuel, six tables de probabilités sont créées pour chacun des trois scénarios à tester. Une table est créée pour chaque intervalle de mesures d'irrégularité suivant : $]-\infty, -20\%[$, $[-20\%, -10\%[$, $[-10\%, 0\%[$, $[0\%, 10\%[$, $[10\%, 20\%[$ et $[20\%, \infty[$. Il est important de noter que pour les besoins bien particuliers ici, on n'utilise pas les valeurs absolues des mesures d'irrégularité puisqu'il est important de savoir si l'autobus est en avance ou en retard. Ainsi, une mesure d'irrégularité de -20% indique que l'autobus est en avance et qu'il fera probablement monter à son bord moins de personnes qu'un autobus en retard qui présente une mesure d'irrégularité de 20% .

La formule suivante présente la méthode de calcul utilisée pour calculer les probabilités cumulées dans ce contexte.

$$PM_{t,n,p} = \sum_{i=0}^n O_{i,n,p} / \sum_{i=0}^{\infty} O_{i,n,p}$$

où $PM_{t,n,p} =$

probabilité cumulée qu'à l'arrêt t pour l'intervalle p les montées soient de n personnes ou moins

$O_{i,n,p}$

= nombre d'occurrences à l'arrêt i pour l'intervalle p où le nombre de montées était de n

p = indice de l'intervalle contenant la mesure d'irrégularité du voyage en cours $1 \leq p \leq$

6

$p = 1,] - \infty, -20\%[$

$p = 2, [-20\%, -10\%[$

$p = 3, [-10\%, 0\%[$

$p = 4, [0\%, 10\%[$

$p = 5, [10\%, 20\%[$

$p = 6, [20\%, \infty[$

Les tables de probabilités cumulées reflètent cette méthode de calcul pour chacun des scénarios. Ces tables de probabilités sont présentées à l'Annexe 5. Le Tableau 16 présente un échantillon du format de la table de probabilités cumulées pour le scénario Est – pointe du matin pour l'intervalle $p = 3$.

Nombre de montées	Arrêt de montée			
	1	2		42
0	0.6632	0.8017		0.9861
1	0.7439	0.8994		0.9861
2	0.8526	0.9626		1
9	0.9965	1		1
10	1	1		1

Tableau 16 : Extrait de la table de probabilités cumulées des montées en Est - pointe du matin

Il est important de noter que malgré ce que la table de probabilité indique pour le dernier arrêt, on fait l'hypothèse qu'aucune personne ne peut monter à bord et les montées sont automatiquement mises à zéro.

À partir de la table de probabilités cumulées du scénario choisi pour l'intervalle dans lequel se trouve la mesure d'irrégularité, il est possible de déterminer le nombre de montées à l'arrêt en question. Lors de l'arrivée de l'autobus à l'arrêt en contexte de simulation, on tire un nombre aléatoire entre 0 et 1. Le nombre de montées est celui pour lequel la probabilité cumulée est supérieure au nombre aléatoire et pour lequel la probabilité cumulée du nombre de montées immédiatement inférieur est plus petite que le nombre aléatoire. Selon le Tableau 16 présenté ci-haut, si le nombre aléatoire tiré est 0.8 à l'arrêt 1 alors le nombre de montées enregistré sera de 2.

Pour des fins reliées à la récolte de données en contexte de simulation, il n'est pas suffisant de déterminer le nombre de personnes montées. Il faut également assigner à chacun de ces passagers une heure d'arrivée à l'arrêt. Ces passagers pourraient être arrivés plusieurs minutes ou encore à peine quelques secondes avant l'arrivée de l'autobus. Les heures d'arrivée des passagers qui elles déterminent le temps d'attente à l'arrêt ont une très grande influence sur la performance du système, c'est pourquoi il importe de développer une méthode permettant d'estimer ces heures d'arrivée.

La méthode choisie est basée sur une recherche complétée par Luethi, Weidmann et Nash (2006). Ils ont observé que les modèles d'arrivées varient selon le temps d'intervalle prévu entre deux passages d'autobus. La Figure 10 montre les différents modèles en fonction de l'intervalle prévu.

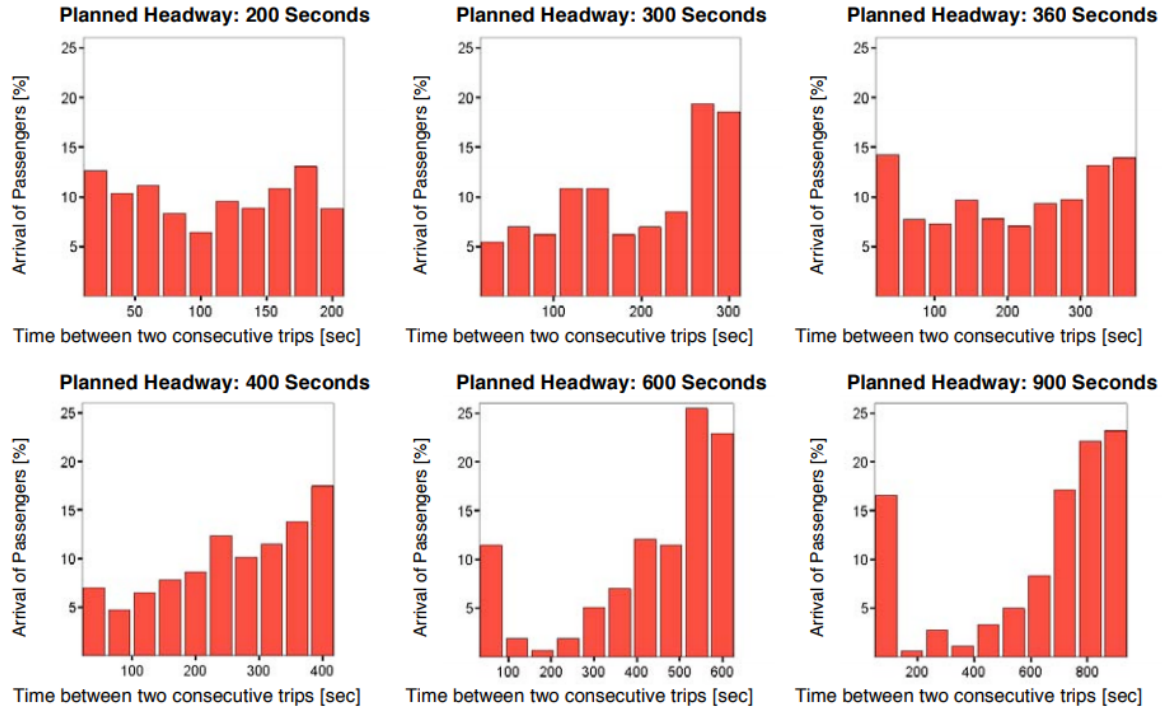


Figure 10 : Densité temporelle des arrivées de passagers aux arrêts entre deux passages consécutifs d'autobus pendant la période de pointe du matin

Source : Luethi, Weidmann et Nash, 2006

Puisque l'intervalle prévu pour les trois scénarios choisis pour être testés en simulation est de dix minutes, alors c'est la fonction de densité correspondante qui a été utilisée. On obtient les probabilités cumulées suivantes : {0.12, 0.14, 0.15, 0.17, 0.22, 0.29, 0.41, 0.52, 0.77, 1}. Chacune de ces probabilités correspond à un intervalle de temps avant le passage de l'autobus.

Puisque des outils d'information en temps réel sont disponibles au grand public pour connaître les heures de passage des autobus, on fait l'hypothèse qu'un passager serait en mesure d'adapter son heure d'arrivée selon l'heure prévue de passage en temps réel. Par exemple, si l'autobus a pris du retard ou de l'avance, le passager aurait les outils nécessaires pour connaître la nouvelle heure de passage prévue. Bien entendu, cela demeure une estimation, mais il demeure que plusieurs passagers adapteront leur comportement en fonction.

C'est pour cette raison que les intervalles de temps associés à la fonction de densité seront calculés selon l'heure de passage réelle et non prévue selon l'intervalle souhaité. Pour chaque passager, on tire un nombre aléatoire entre 0 et 1. Ce nombre permet de déterminer selon la fonction de densité présentée ci-haut l'intervalle de temps pendant lequel le passager fera son arrivée à l'arrêt. On applique ensuite les formules suivantes. Il est important de noter que l'heure d'arrivée du passager

obtenue correspond au milieu de l'intervalle de temps choisi aléatoirement selon la fonction de densité.

$$TI_{nt} = HP_{nt} - HP_{n-1,t}$$

$$HA_{pt} = HP_{n-1,t} + \frac{TI_{nt}}{20} + \left(\frac{TI_{nt}}{10} * I_{p,n,t}\right)$$

où TI_{nt} = temps de l'intervalle en secondes séparant les passages des autobus $n - 1$ et n à l'arrêt t

HP_{nt} = heure de passage de l'autobus n à l'arrêt t

HA_{pt} = heure d'arrivée du passager p à l'arrêt t

$I_{p,n,t}$ = numéro de l'intervalle obtenu à partir du tirage du nombre aléatoire pour le passager p lors du passage de l'autobus n à l'arrêt t

$$I = 1, NA = [0, 0.12]$$

$$I = 2, NA =]0.12, 0.14]$$

$$I = 3, NA =]0.14, 0.15]$$

$$I = 4, NA =]0.15, 0.17]$$

$$I = 5, NA =]0.17, 0.22]$$

$$I = 6, NA =]0.22, 0.29]$$

$$I = 7, NA =]0.29, 0.41]$$

$$I = 8, NA =]0.41, 0.52]$$

$$I = 9, NA =]0.52, 0.77]$$

$$I = 10, NA =]0.77, 1]$$

À titre d'exemple, si le nombre aléatoire tiré pour le passager p est 0.25, alors il se trouvera dans l'intervalle $I = 6$. Pour des passages consécutifs aux 1200^e et 1850^e secondes de simulation, alors le temps d'intervalle serait de 650 secondes. On notera une heure d'arrivée pour le passager en question à la 1818^e seconde. Encore une fois, le résultat est arrondi à l'entier le plus proche.

$$HA_{pt} = 1200 + \frac{650}{20} + \frac{650}{10} * 6 = 1818$$

4.6. Validation du modèle

Dans le but de prouver la validité du modèle proposé, les résultats obtenus en simulation sont comparés aux données tirées du parcours 807 dans le contexte réel. On s'assurera d'abord que les caractéristiques de base du parcours concordent telles que le nombre de montées et de descentes à chaque arrêt, la charge à bord des véhicules ainsi que les temps de déplacement et d'immobilisation. On validera le modèle selon les trois environnements choisis plus tôt.

Pour chacun des environnements, 15 répliques ont été réalisées. Le nombre maximum d'autobus à faire leur arrivée sur le parcours a été fixé à 10 ce qui représente plus ou moins deux heures de simulation pour chacune des répliques. Cela correspond à la durée que couvrent les scénarios choisis. Les tables de probabilités ainsi que les variables servant à l'estimation des temps de déplacement et d'immobilisation sont obtenues selon les périodes de temps et les directions du scénario testé.

4.6.1. Validation des caractéristiques du parcours

Les Tableaux 17, 18 et 19 comparent les résultats de chacune des simulations avec les données réelles en ce qui concerne la moyenne des montées, des descentes et des charges à bord. Pour chacune des colonnes, on calcule la différence des moyennes à l'arrêt entre les résultats de la simulation et ceux des données réelles pour les paramètres correspondant à la même période et la même direction. À noter, les résultats des données réelles sont soustraits des données de la simulation. Une valeur positive indique donc que la moyenne de la simulation était plus élevée que celle des données réelles.

Arrêts	Écart de la charge moyenne à l'arrêt	Écart des montées moyennes à l'arrêt	Écart des descentes moyennes à l'arrêt
1	-0,01	-0,01	0,00
2	-0,02	-0,01	0,00
3	-0,09	-0,08	0,00
4	-0,04	0,05	0,00
5	0,02	0,04	-0,03
6	-0,02	-0,06	-0,01
7	-0,13	-0,12	-0,01
8	-0,12	-0,01	-0,02
9	0,17	0,20	-0,06
10	-0,09	-0,28	-0,02

11	-0,26	-0,32	-0,14
12	-0,06	0,14	-0,06
13	-0,19	-0,01	-0,03
14	0,05	0,08	-0,08
15	-0,20	-0,32	-0,06
16	0,03	-0,11	-0,33
17	0,02	-0,05	-0,04
18	0,07	0,03	-0,03
19	0,30	-0,08	-0,27
20	0,96	-0,21	-0,87
21	1,59	0,05	-0,58
22	1,61	-0,13	-0,15
23	1,02	-0,46	-0,07
24	1,35	0,12	-0,13
25	1,55	0,02	-0,18
26	1,27	-0,29	-0,03
27	0,91	-0,27	0,06
28	0,71	-0,24	-0,04
29	0,84	0,00	-0,01
30	0,79	0,00	0,05
31	0,11	-0,27	0,23
32	-0,03	-0,01	0,13
33	-1,05	-0,28	0,77
34	-1,27	-0,13	0,11
35	-1,39	0,00	0,13
36	-1,55	-0,07	0,10
37	-2,14	0,04	0,62
38	-2,79	0,05	0,70
39	-3,11	0,05	0,38
40	-4,38	0,00	0,98
41	-5,68	-0,01	1,39
42	0,00	0,00	1,19

Tableau 17 : Écart des charges, montées et descentes aux arrêts (en personnes) – Est – pointe du matin

Arrêts	Écart de la charge moyenne à l'arrêt	Écart des montées moyennes à l'arrêt	Écart des descentes moyennes à l'arrêt
1	0,75	0,75	0,00
2	1,18	0,29	-0,09
3	1,25	-0,01	-0,11
4	1,29	-0,01	-0,05
5	1,66	0,17	-0,19

6	1,79	-0,02	-0,18
7	1,99	-0,11	-0,29
8	2,16	-0,09	-0,26
9	2,48	-0,11	-0,37
10	2,67	-0,06	-0,23
11	2,68	-0,69	-0,69
12	2,75	-0,24	-0,33
13	3,07	-0,07	-0,19
14	3,40	-0,04	-0,27
15	3,70	-0,08	-0,37
16	4,62	0,48	-0,39
17	4,77	-0,05	-0,20
18	4,88	-0,10	-0,21
19	5,47	0,07	-0,37
20	5,18	-0,65	-0,31
21	5,66	-0,37	-0,82
22	5,68	-0,27	-0,21
23	5,39	-0,37	-0,09
24	5,83	-0,07	-0,51
25	5,68	-0,19	-0,03
26	6,10	0,41	-0,03
27	5,61	-0,31	0,12
28	5,83	0,12	0,14
29	5,45	-0,32	0,02
30	5,07	-0,25	0,11
31	5,15	0,23	0,15
32	4,98	0,10	0,30
33	3,29	-0,25	1,40
34	2,97	-0,01	0,39
35	2,47	0,08	0,56
36	1,89	-0,05	0,55
37	1,42	0,06	0,55
38	-0,12	0,06	1,55
39	-1,35	0,00	1,32
40	-3,11	0,01	1,74
41	-4,86	-0,02	1,52
42	0,00	0,00	2,07

Tableau 18 : Écart des charges, montées et descentes aux arrêts (en personnes) – Est – pointe du soir

Arrêts	Écart de la charge moyenne à l'arrêt	Écart des montées moyennes à l'arrêt	Écart des descentes moyennes à l'arrêt
1	0,63	0,63	0,00
2	0,31	-0,16	-0,01
3	0,29	-0,04	-0,01
4	0,40	0,06	-0,06
5	0,26	-0,18	-0,04
6	0,32	-0,02	-0,08
7	0,49	0,02	-0,15
8	0,38	-0,17	-0,08
9	0,37	-0,17	-0,06
10	0,33	-0,07	-0,04
11	0,30	-0,05	-0,03
12	0,48	0,11	-0,08
13	0,67	-0,48	-0,59
14	0,67	-0,19	-0,15
15	1,00	-0,11	-0,43
16	1,23	-0,06	-0,33
17	1,26	-0,25	-0,30
18	1,65	0,04	-0,35
19	1,39	-0,65	-0,39
20	1,71	0,06	-0,25
21	1,77	-0,22	-0,07
22	2,02	-0,10	-0,35
23	1,64	-0,62	-0,24
24	1,61	-0,17	-0,13
25	1,35	-0,15	0,13
26	1,14	-0,09	0,09
27	1,06	0,00	0,07
28	0,73	-0,10	0,21
29	0,22	-0,04	0,31
30	0,50	-0,01	0,36
31	0,45	0,01	0,31
32	-0,31	-0,05	0,20
33	-0,91	-0,04	0,50
34	-1,08	-0,03	0,14
35	-1,26	-0,03	0,13
36	-1,43	-0,02	0,05
37	-1,83	0,02	0,37
38	-1,92	-0,04	0,12

39	-2,07	0,03	0,17
40	-2,14	-0,02	0,05
41	-2,20	-0,01	0,03
42	-2,34	0,07	0,21
43	-2,57	-0,01	0,23
44	0,00	0,00	0,13

Tableau 19 : Écart des charges, montées et descentes aux arrêts (en personnes) – Ouest – hors pointe

Il est possible de constater que les écarts sont très minces en ce qui concerne la moyenne des montées et des descentes. Dans la majorité des cas, les écarts ne représentent même pas une personne. Toutefois, ce sont la somme de ces petits écarts qui une fois additionné explique les écarts plus importants au niveau des moyennes des charges. Toutefois, on constate que le plus grand écart au niveau de la moyenne des charges n'est pas assez important pour avoir une réelle implication. Le plus grand écart se trouve au niveau du scénario Est – pointe du soir et est de 6 personnes. Les charges ainsi que leurs effets sur les temps d'immobilisation ont été discutés plus tôt et cette différence au niveau de la charge maintient la simulation dans les limites permises. Pour ce même arrêt où la charge en simulation était plus grande de 6 personnes qu'en réalité, la charge moyenne est de 26 personnes. Ce nombre est bien loin de la limite de 59 personnes qui assure un confort maximal pour le passager. Les temps d'immobilisation ne sont pas affectés par cette charge légèrement plus élevée puisque la circulation à bord du véhicule n'est pas plus difficile.

Les temps de parcours ont également été comparés pour chacun des environnements de simulation avec les temps de parcours dans le contexte réel. Le temps de parcours est calculé de l'arrivée d'un autobus sur le parcours jusqu'à la fin de service de ce même autobus au dernier arrêt. Les Figures 11, 12 et 13 présentent les diagrammes en boîtes permettant d'observer la dispersion des temps de parcours en secondes observés en simulation et dans les données réelles.

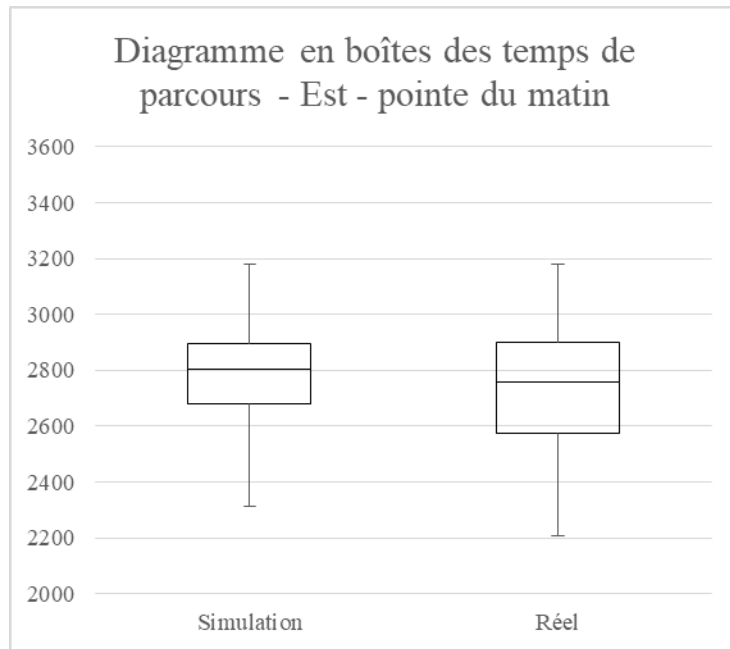


Figure 11 : Diagramme en boîtes des temps de parcours – Est – pointe du matin

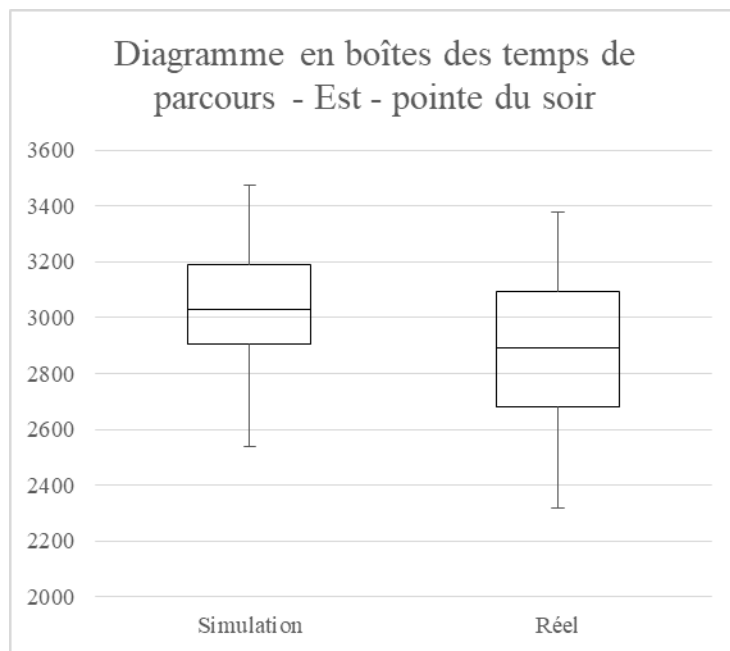


Figure 12 : Diagramme en boîtes des temps de parcours – Est – pointe du soir

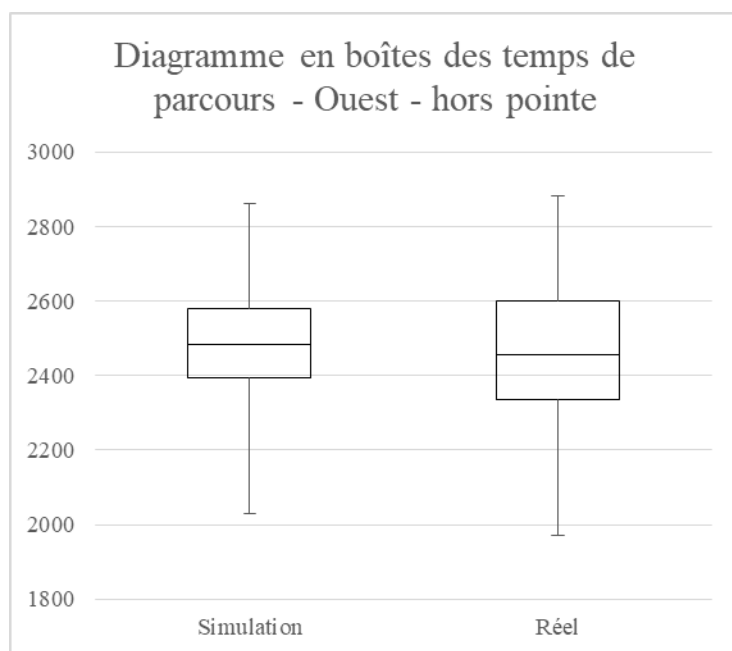


Figure 13 : Diagramme en boîtes des temps de parcours – Ouest – hors pointe

On y voit que les médianes sont très rapprochées. D'ailleurs, un écart d'à peine 30 secondes sépare les médianes pour le scénario Ouest – hors pointe et de 47 secondes pour le scénario Est – pointe du matin. Les écarts les plus notables se trouvent en direction Est – pointe du soir. Toutefois, l'écart entre les deux médianes de ce scénario est d'environ 140 secondes ce qui représente un peu plus de 2 minutes. Considérant que la durée médiane du parcours dans cette direction est de 45 minutes, l'écart ne représente que 5% de la durée totale de parcours.

Les temps d'immobilisation ainsi que les temps de déplacement ont également été validés puisque c'est la combinaison de ces deux temps distincts qui donne le temps de parcours total. Le Tableau 20 présente la différence entre les moyennes des temps d'immobilisation en secondes en contexte de simulation et dans la réalité. Cette différence est obtenue en soustrayant la moyenne du temps d'immobilisation en contexte réel de celle en simulation.

Arrêt	Est – pointe du matin	Est – pointe du soir	Ouest – hors pointe
1	0	3	3
2	0	1	-1
3	6	7	2
4	7	7	1
5	6	8	0
6	6	7	0
7	0	-1	0
8	0	-1	-1

9	1	-1	0
10	4	4	1
11	3	2	0
12	5	4	0
13	6	6	-2
14	5	6	-1
15	3	5	-1
16	-1	2	-1
17	5	6	-1
18	5	5	0
19	0	0	-2
20	7	5	1
21	-2	-1	0
22	0	0	-1
23	-10	4	4
24	1	-1	3
25	-1	0	2
26	0	2	2
27	0	0	2
28	3	8	2
29	0	0	1
30	1	0	3
31	-6	-9	7
32	4	7	1
33	5	7	2
34	0	2	2
35	3	7	2
36	4	5	2
37	4	4	2
38	1	4	2
39	2	7	3
40	12	18	3
41	13	16	2
42	7	10	3
43	N/D	N/D	1
44	N/D	N/D	3

**Tableau 20 : Différence entre les moyennes des temps d'immobilisation de la simulation et de la réalité
(en secondes)**

Les résultats démontrent qu'il y a très peu de différence entre les temps d'immobilisation de la simulation et de ceux obtenus à partir des données réelles du parcours. Il s'agit que de quelques

secondes ce qui n'affecte pas la validité du modèle. Les écarts les plus importants sont aux arrêts en fin de parcours pour les scénarios en direction est et le plus grand écart des moyennes est de 18 secondes.

Le Tableau 21 présente à son tour les mêmes résultats, mais cette fois pour les moyennes des temps de déplacement à partir de l'arrêt précédent. Évidemment, le temps de déplacement vers le premier arrêt est de 0.

Arrêt	Est – pointe du matin	Est – pointe du soir	Ouest – hors pointe
1	0	0	0
2	4	-2	-3
3	-1	-2	0
4	1	1	-1
5	1	-1	0
6	-1	-1	-1
7	0	-1	-4
8	-2	-3	-2
9	-3	-4	3
10	0	-1	0
11	-6	-8	0
12	-2	-3	1
13	-1	-1	-7
14	-1	0	-3
15	-9	-4	-3
16	-4	-5	-4
17	4	2	-3
18	4	0	-8
19	-4	-1	0
20	-17	-8	-6
21	9	6	-10
22	-13	-10	-2
23	-1	1	-1
24	-3	0	0
25	7	-3	-12
26	-4	-6	-2
27	0	2	1
28	5	1	-4
29	0	-13	2
30	-3	0	-4
31	3	-2	-6
32	0	-3	-1

33	-11	-7	2
34	4	-3	5
35	3	0	-2
36	0	0	0
37	-15	-7	-1
38	6	6	-2
39	-15	-12	0
40	-4	-3	0
41	3	-9	0
42	-7	17	1
43	N/D	N/D	-2
44	N/D	N/D	0

Tableau 21 : Différence entre les moyennes des temps de déplacement de la simulation et de la réalité (en secondes)

Au Tableau 20, on constatait des écarts majoritairement positifs alors qu'en ce qui concerne les temps de déplacement, les écarts sont davantage négatifs. Ces écarts s'annulent éventuellement et c'est pourquoi les temps de parcours sont très près de la réalité.

4.6.2. Validation des mesures d'irrégularité

Dans un deuxième temps, nous avons vérifié que les événements de groupage d'autobus se produisaient de la même manière que dans le contexte réel. Les endroits où le problème a été observé de manière plus proéminente ainsi que l'ampleur des événements de manière générale ont été comparés avec les dynamiques du parcours selon les mêmes scénarios présentés plus tôt.

Le Tableau 22 présente à l'aide de couleurs la force des moyennes des mesures d'irrégularité par arrêt. Les moyennes des arrêts d'un même scénario sont comparées entre elles. Une cellule plus opaque signifie que les écarts par rapport à l'intervalle prévu sont plus grands en comparaison avec ceux des autres arrêts pour le même scénario.

Arrêts	Est – pointe du matin	Est – pointe du soir	Ouest – hors pointe
1	0	0	0
2	5	4	5
3	6	5	6
4	6	6	6
5	6	6	6
6	6	6	6
7	7	7	8
8	8	8	10
9	8	8	10

10	8	9	10
11	10	9	11
12	11	10	11
13	11	10	13
14	11	11	14
15	13	11	14
16	13	12	14
17	14	13	15
18	14	14	15
19	15	15	15
20	15	16	16
21	17	16	18
22	18	17	19
23	18	18	20
24	19	18	21
25	20	19	21
26	22	19	22
27	22	21	22
28	23	21	23
29	24	23	23
30	25	24	24
31	25	24	25
32	25	25	25
33	26	25	25
34	28	26	26
35	28	27	26
36	28	27	26
37	28	28	26
38	29	29	27
39	30	30	27
40	31	31	27
41	33	32	27
42	33	34	28
43			28
44			28

Tableau 22 : Force des mesures d'irrégularité (en %) par arrêt pour les trois scénarios

On constate que la force des événements de groupage se fait toujours sentir de manière plus importante plus on avance sur le parcours même en contexte de simulation. On se rappelle que cette dynamique avait également été observée sur la base des données réelles. On voit donc que le groupage

d'autobus en situation de simulation agit de la même manière et prend de plus en plus d'ampleur d'arrêts en arrêts.

En ce qui concerne la force des mesures d'irrégularité, elles ont également été comparées entre elles. Afin d'être cohérent avec les décisions prises pour l'estimation des temps de déplacements, pour chacun des arrêts, certaines valeurs ont été omises dans le calcul en ce qui concerne les données réelles. 20% des mesures d'irrégularité pour chacun des arrêts ont été retirées de la moyenne. 10% des valeurs les plus élevées et 10% des valeurs les plus petites ont donc été enlevées afin de refléter la méthodologie appliquée pour les temps de déplacement où l'on utilisait les 10^e et 90^e percentiles. Le Tableau 23 présente les mesures d'irrégularité pour le parcours dans son contexte actuel et pour la simulation pour les trois scénarios choisis.

Arrêts	Scénarios					
	Est – pointe du matin		Est – pointe du soir		Ouest – hors pointe	
	Simulation	Réel	Simulation	Réel	Simulation	Réel
1	0	0	0	0	0	0
2	4	9	5	5	7	10
3	5	12	6	9	8	10
4	5	13	6	9	8	10
5	5	14	6	10	8	11
6	5	15	6	11	9	11
7	6	15	7	11	9	11
8	6	18	8	12	10	13
9	7	20	8	13	11	14
10	7	21	8	13	11	15
11	8	22	9	14	11	15
12	10	24	10	15	11	16
13	10	25	11	15	13	16
14	10	26	11	15	14	14
15	11	27	12	17	14	15
16	11	29	13	17	15	16
17	11	31	15	18	16	17
18	11	32	15	18	17	18
19	12	33	17	19	17	18
20	12	34	18	20	18	19
21	14	34	19	21	19	21
22	15	34	20	20	20	22
23	16	34	21	21	20	23
24	16	28	21	21	21	23
25	18	29	22	24	22	23

26	19	30	23	25	24	24
27	19	31	24	26	24	24
28	19	32	25	26	24	24
29	20	33	27	27	25	24
30	20	34	28	28	26	24
31	21	36	28	29	26	24
32	22	36	29	30	26	26
33	23	38	30	32	26	27
34	25	39	31	31	27	28
35	25	40	31	32	27	28
36	25	41	32	32	27	28
37	25	43	33	32	27	28
38	26	42	33	33	28	29
39	27	43	35	34	28	29
40	27	46	36	36	28	30
41	29	44	37	37	28	30
42	32	39	41	38	28	30
43	N/D	N/D	N/D	N/D	28	31
44	N/D	N/D	N/D	N/D	28	32

Tableau 23 : Mesures d'irrégularité pour la simulation et la réalité (en pourcentage)

Le Tableau 23 permet de constater que dans tous les scénarios les mesures d'irrégularité sont plus grandes pour ce qui est de la situation réelle. Il faut se rappeler que dans l'estimation des temps de déplacement, c'est la notion de feux de circulation uniquement qui détermine les temps de déplacement. Ainsi, une probabilité de tomber sur un feu rouge a été déterminée et c'est cela qui détermine la durée des trajets. Toutefois, en réalité, il existe d'autres événements au-delà des feux de circulation comme les conditions météorologiques et les accidents de la route qui sont des événements sporadiques qui font augmenter les mesures d'irrégularité, mais qui ne sont pas pris en compte dans cette simulation. C'est pourquoi on note des mesures d'irrégularité légèrement plus faibles en contexte de simulation.

Chapitre 5

Méthodes de résolution

Selon la méthodologie choisie, des résultats de référence seront obtenus à partir de la simulation pour les trois scénarios choisis et seront comparés avec les résultats tirés de l'application de diverses solutions. Ce chapitre a pour but de décrire chacune des méthodes de résolution qui seront testées et de discuter de la manière dont elles sont modélisées dans le programme de simulation.

5.1. Types de méthodes de résolution

La revue de littérature a démontré qu'il était possible de diviser les méthodes de résolution en deux catégories. En effet, lors d'un événement de groupage d'autobus, pour rétablir la régularité du service, deux types de solutions s'offrent à nous. La Figure 14 montre les heures de passage à un arrêt quelconque pour un intervalle souhaité de 600 secondes. On constate que le deuxième autobus a pris 30 secondes de retard.

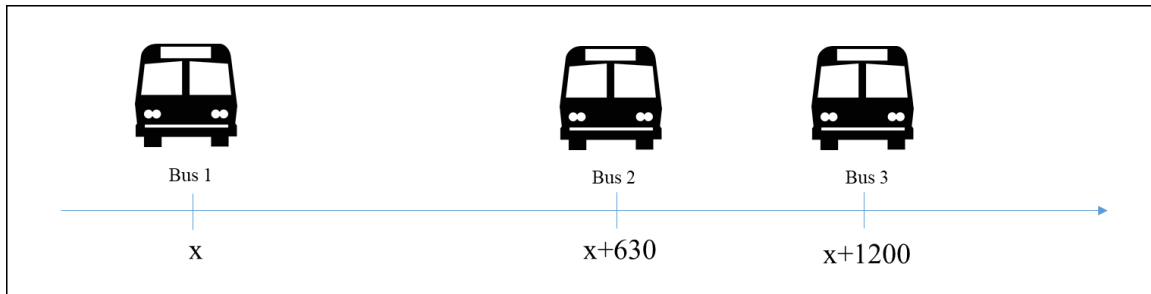


Figure 14 : Chronologie des heures de passage à l'arrêt t en situation de groupage

En présence de cette situation, il existe deux types de solutions pour rétablir la régularité. Toutefois, il faut convenir du fait que la situation de groupage ne sera détectée que lors du passage du deuxième autobus à l'arrêt. À ce moment, il est possible d'appliquer une solution qui fera en sorte que le temps de déplacement vers le prochain arrêt du deuxième autobus sera accéléré. La Figure 15 illustre le résultat espéré de ce type de solution. On fait l'hypothèse que sans l'application de solutions, le temps de déplacement vers l'arrêt $t+1$ est fixe et de 60 secondes.

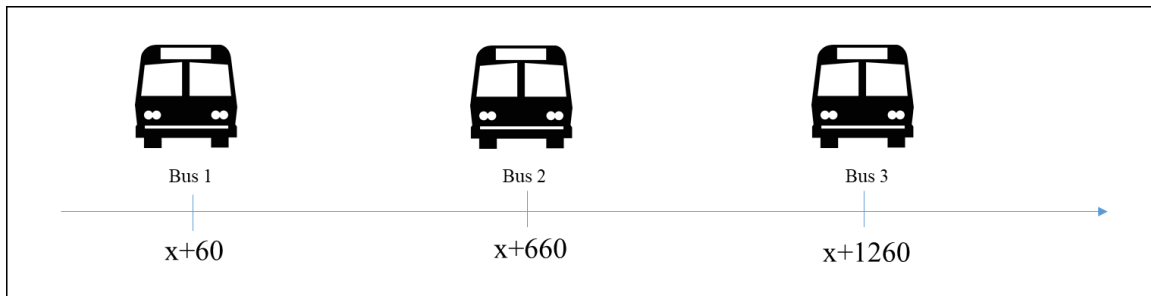


Figure 15 : Chronologie des heures de passage à l'arrêt $t+1$ - Solution appliquée à l'autobus retardataire

Les solutions appliquées sur l'autobus retardataire visent donc l'accélération de ce dernier vers l'arrêt suivant. Sans l'application d'une solution d'accélération, le deuxième autobus serait passé à l'arrêt $t+1$ au temps $x+690$. L'intervalle ne serait donc pas de 600 secondes comme souhaité. Le résultat espéré de ce type de solution est d'accélérer assez pour compenser le retard déjà encouru.

À l'inverse, le deuxième type de solutions a pour but de ralentir l'autobus suivant le retardataire de la durée du retard encouru. Lors de la détection d'un événement de groupage à l'arrêt t , ce type de méthode de résolution vise à ralentir l'autobus qui suit en amont de l'arrêt t pour assurer qu'à ce même arrêt l'intervalle sera celui souhaité. La Figure 16 illustre le résultat attendu de ce type de solutions.

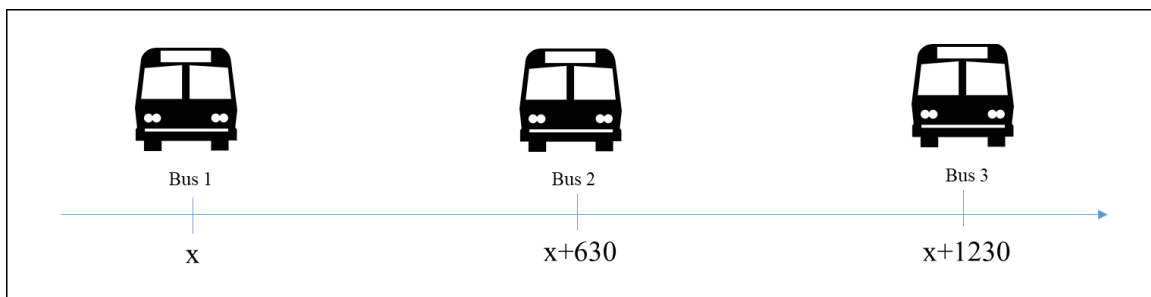


Figure 16 : Chronologie des heures de passage à l'arrêt t – Solution appliquée à l'autobus suivant le retardataire

Dans cette deuxième situation, la régularité est rétablie à l'arrêt t plutôt qu'à l'arrêt $t+1$ comme c'était le cas dans la situation précédente. Le but est de ralentir l'autobus suivant le retardataire du temps de retard encouru par ce dernier en amont de l'arrêt où la situation de groupage a été détectée.

5.2. Choix des méthodes de résolution

Dans le cadre de cette recherche, quatre solutions ont été choisies afin d'être appliquées individuellement pour tenter d'améliorer la régularité du système. Dans la littérature, chacune de ses solutions, lorsque comparées à une situation de référence a présenté des améliorations en termes de régularité du service. Il est important de souligner que ce qui distingue cette présente recherche de ce qui a précédemment été fait est que ces solutions seront non seulement comparées avec un modèle de référence, mais également entre elles afin de déterminer laquelle présente les plus importantes améliorations.

Les trois premières méthodes de résolution choisies se trouvent dans la catégorie des solutions appliquées à l'autobus retardataire. Il s'agit du saut d'arrêts, de la limite de montées et de l'utilisation des feux de priorité. La dernière solution individuelle est l'immobilisation et elle fait quant à elle partie de la catégorie des solutions appliquées à l'autobus suivant le retardataire.

Ces quatre premières solutions seront désormais qualifiées de solutions uniques. Une solution unique implique qu'elle sera appliquée elle seule pour voir son effet unique sur la régularité. Les solutions uniques seront ensuite appliquées en paires. Ces combinaisons seront appelées solutions combinées.

Les solutions combinées qui seront évaluées dans cette recherche sont les suivantes : le saut d'arrêts et l'immobilisation, la limite de montées et l'immobilisation, l'utilisation des feux de priorité et l'immobilisation, le saut d'arrêts et l'utilisation des feux de priorité ainsi que la limite de montées et l'utilisation des feux de priorité.

5.3. Seuils de détection

L'application de ces diverses méthodes de résolution ne doit se faire que lorsque la situation le requiert. Ainsi, à chaque passage d'autobus à un arrêt, l'intervalle de temps séparant cet autobus de celui qui l'a précédé est calculé et comparé avec l'intervalle souhaité. C'est alors que la notion de seuils de détection prend toute son importance. En effet, il n'est pas souhaitable d'appliquer une solution aussitôt que l'intervalle enregistré n'est pas précisément celui souhaité. Ainsi, le programme de simulation conçu compte trois seuils de détection exprimés en pourcentages : soit 5%, 7.5% et 10%. À chaque passage, la mesure d'irrégularité est calculée et comparée au seuil choisi. Ainsi, une solution ne sera appliquée que si la mesure d'irrégularité est plus grande que le seuil. Pour un intervalle souhaité de 600 secondes et un seuil de détection de 5%, une situation de groupage ne sera détectée que si le retard est de plus de 30 secondes.

Il faut mentionner qu'il est important dans cette situation de distinguer les situations de retard et c'est pour cette raison que ce n'est pas la valeur absolue de l'écart à l'intervalle souhaité qui sera utilisée lors du calcul puisque les méthodes de résolution ne sont appliquées qu'en situation de retard.

5.4. Modélisation des solutions uniques

5.4.1. Saut d'arrêts

Le saut d'arrêts consiste à demander à l'autobus retardataire de ne faire monter aucun passager à l'arrêt où le groupage a été détecté. Cela a pour effet de limiter le temps d'immobilisation à ce même arrêt et ainsi d'augmenter les chances de respecter l'intervalle souhaité au prochain arrêt.

En simulation, cette méthode de résolution s'applique de la manière suivante. Lors d'un début de service à un arrêt, si un événement de groupage est détecté, on demande à l'autobus de ne faire monter aucun passager. Ainsi, le nombre de montées à cet arrêt est automatiquement forcé d'être zéro. Cela implique que tous les passagers qui voulaient monter à bord de cet autobus seront réaffectés au suivant. Ils verront donc évidemment leur temps d'attente considérablement augmenté. On fait toutefois l'hypothèse que l'autobus peut faire descendre les passagers qui le désirent. Ainsi, si aucun passager ne désire descendre, l'autobus ne s'immobilisera que pour la durée correspondant au temps fixe donné par la formule du temps d'immobilisation présentée au Chapitre 4.

5.4.2. Limite de montées

La limite de montées s'apparente beaucoup au saut d'arrêts, mais elle permet de faire monter un certain nombre de passagers. Dans la simulation conçue, il existe trois limites qui peuvent être appliquées soit 1, 3 ou 5 montées.

L'application de cette solution est très similaire à celle du saut d'arrêts. Toutefois, la réaffectation à un prochain passage n'est nécessaire que pour les passagers qui se trouvent au-delà de la limite permise. Ainsi, si la limite choisie est de 3 montées et que 4 passagers désirent monter à bord, seul le quatrième se verra refuser l'accès et être réaffecté à un autre autobus. À l'inverse, si le nombre de passagers qui désirent monter est inférieur à la limite permise, alors la solution n'aura aucun effet et le temps d'immobilisation ne sera pas réduit.

5.4.3. Utilisation des feux de priorité

Une autre solution choisie consiste à implanter à certaines intersections un système de feux de priorité, aussi appelé feu blanc. Les feux de priorité qui prennent la forme d'une ligne blanche donne la permission aux autobus de traverser une intersection même si la lumière y est rouge. Cette ligne

blanche qui s'allume lorsque la lumière est rouge pour les autres automobilistes à l'intersection permet à l'autobus de circuler plus rapidement ou même de faire des changements de voies plus facilement. Pour qu'un feu de priorité soit réellement utile, une voie réservée doit être disponible. Autrement, si d'autres véhicules peuvent se trouver devant l'autobus à l'intersection, l'autobus ne pourra pas quitter et cette méthode n'aura pas l'effet escompté. Il faut savoir que le Métrobus 807 est le parcours qui compte actuellement le moins de voies réservées de tous les Métrobus. Toutefois, malgré qu'il y ait peu de voies réservées, il y a quand même certains segments qui bénéficient de deux voies dans une même direction ce qui rend l'application d'une telle solution possible sans nécessiter des changements à même l'infrastructure.

Dans le cadre de la simulation, un segment a été sélectionné en direction est et en direction ouest. Ces endroits correspondent à un segment entre deux arrêts où les retards étaient plus importants. Afin de choisir ces segments, l'écart à l'intervalle souhaité supplémentaire encouru entre un arrêt et son suivant a été calculé. L'écart supplémentaire est calculé de manière à connaître l'effet sur la régularité du segment à lui seul. On sait que les mesures d'irrégularité prennent de l'ampleur lors du parcours et il ne suffit donc pas d'observer les mesures d'irrégularité pour choisir les endroits où les feux de priorité devraient se trouver. La méthode de calcul choisie implique que si l'autobus avait déjà 60 secondes de retard au dernier arrêt et que l'écart à l'intervalle souhaité est maintenant de 90 secondes, alors le dernier segment n'est redevable que pour 30 secondes du retard.

En plus d'observer les endroits où les écarts supplémentaires à l'intervalle souhaité étaient les plus importants et de vérifier que le segment choisi bénéficiait de deux voies, l'emplacement physique des arrêts sur le parcours devait être considéré. En effet, une solution appliquée à l'avant-dernier arrêt ne permettrait pas d'améliorer le système dans son ensemble puisque l'application d'une solution se fait trop tardivement sur le parcours.

Le choix des segments s'est fait en considérant tous les éléments précédemment mentionnés. En direction est, le segment choisi est celui qui sépare le 18^e et 19^e arrêt. Il s'agit du segment de l'arrêt M.-Bourgeois à Holland. Sur ce segment, on compte un feu de circulation. En direction contraire, c'est le segment entre les arrêts de Vimy et Marois qui comporte aussi un feu.

En simulation, la méthode de résolution s'applique de la manière suivante. Encore une fois, la solution n'est implantée que si un retard au-delà du seuil de détection est observé. Comparativement aux deux autres solutions précédentes où l'application des méthodes de résolution se faisait lors du début de service d'un autobus à un arrêt, ici, c'est lors du départ de l'autobus de l'arrêt qu'une action est nécessaire. Lors de l'application de la formule du temps de déplacement vers l'arrêt suivant, le

nombre de feux rouges rencontrés est automatiquement mis à zéro. Cela est bien évidemment le cas uniquement si le déplacement se fait sur l'un des segments identifiés plus tôt. Les formules relatives aux limites inférieure et supérieure du temps de déplacement prendront donc la forme suivante.

$$LI_{t0} = TD_{10,t} + (0 * D_t)$$

$$LS_{t0} = TD_{10,t} + ((0 + 1) * D_t)$$

La méthode de résolution d'utilisation des feux de priorité se résume donc à assurer que l'autobus ne rencontrera aucun feu rouge lors de son déplacement vers l'arrêt suivant. Cela reflète une situation dans la réalité où les feux de priorité seraient allumés sous condition. Ici, il s'agirait d'avoir noté un retard au-delà du seuil de détection.

5.4.4. Immobilisation

Lors de la détection d'un retard à l'arrêt t pour l'autobus n , l'immobilisation demande à l'autobus $n+1$ de s'arrêter à l'arrêt $t-1$ pour un temps déterminé selon différents critères. Une demande d'immobilisation est d'abord déclenchée par le retard de l'autobus n à l'arrêt t . Ce retard est détecté en calculant l'intervalle qui sépare l'autobus n et $n-1$ à l'arrêt t . Pour un intervalle souhaité de 600 secondes, supposons que 665 secondes séparent les deux passages d'autobus. Pour un seuil de détection de 5%, ce retard serait assez important pour être qualifié de groupage d'autobus et une solution serait implantée.

En simulation, c'est à ce moment précis qu'on gardera en mémoire d'immobiliser l'autobus $n+1$ lors de son passage à l'arrêt $t-1$. Pour l'instant, le temps pour lequel l'autobus devra s'immobiliser n'est pas encore connu puisqu'il dépendra de l'évolution de cet autobus sur le parcours jusqu'à l'arrêt en question.

À chacun des débuts de service à un arrêt, on vérifie si une immobilisation a été demandée auparavant pour pallier un événement de groupage. Si tel est le cas, alors le temps de cette immobilisation doit être déterminé. On part de la prémisse suivante : en conditions normales et sans perturbations, l'autobus $n+1$ devrait s'immobiliser pour un temps total égal au retard calculé pour l'autobus n à l'arrêt t . Dans ce cas-ci, le retard est de 65 secondes.

Afin d'établir un temps d'immobilisation demandé, la première étape consiste à déterminer si on a déjà demandé à ce même autobus de s'immobiliser à un arrêt précédent pour pallier un autre retard. Si par exemple, l'autobus n présentait également à l'arrêt $t-1$ un intervalle plus grand que souhaité, alors on aurait déjà demandé à l'autobus $n+1$ de s'immobiliser à l'arrêt $t-2$. On comprend donc que le retard de 65 secondes n'est pas entièrement redevable au segment entre l'arrêt $t-1$ et t . Si le retard

était déjà de 30 secondes à l'arrêt précédent, alors le dernier segment n'explique que 35 secondes du retard total. On soustrait donc tous les temps réels d'immobilisation supplémentaires précédents les 65 secondes. Le temps suggéré d'immobilisation est donc de 35 secondes.

Ensuite, il existe trois scénarios possibles. La première situation se produit si l'intervalle calculé à l'arrêt $t-1$ pour l'autobus $n+1$ est inférieur à l'intervalle souhaité. Par exemple, si l'intervalle est de 540 secondes, cela signifie que l'autobus aurait été de 20 secondes plus rapide que la situation espérée. Dans une telle situation, on ajoute ce temps au temps suggéré d'immobilisation. Le temps d'immobilisation serait alors de 55 secondes. 35 secondes ne seraient pas suffisantes pour rétablir l'intervalle à l'arrêt t .

Les deux autres scénarios se manifestent lorsque l'intervalle réel est plus grand que l'intervalle souhaité. Dans un premier temps, si l'intervalle est de 645 secondes alors on constate que l'autobus $n+1$ a déjà 45 secondes de retard. Dans un tel cas, on ne prescrit pas de temps d'immobilisation supplémentaire puisque cela aurait pour effet de beaucoup trop éloigner cet autobus de celui qui le précédait, soit le retardataire. Le temps d'immobilisation sera donc celui nécessaire pour faire monter et descendre les passagers.

Finalement, il se pourrait que l'intervalle réel soit de 620 secondes par exemple. Puisque l'autobus a déjà accusé un certain retard sans toutefois permettre de répondre entièrement au temps d'immobilisation suggéré, l'autobus s'immobilisera pour un temps d'immobilisation égal à 15 secondes. Il faut garder en tête que lors de l'immobilisation à l'arrêt $t-1$ ce qui se produira sur le segment entre cet arrêt et le prochain n'est pas encore connu.

Il est très important de noter que dans n'importe lequel des scénarios présentés ci-haut, si le temps requis pour faire monter et descendre les passagers est plus important que le temps d'immobilisation suggéré alors c'est le temps nécessaire pour servir les passagers qui prévaut.

5.5. Modélisation des solutions combinées

Il est possible de constater que le saut d'arrêts et la limite de montées ne sont jamais combinés dans le cadre de cette recherche. Puisque le saut d'arrêts est en fait une forme de limite de montées, ces deux solutions seraient contradictoires. Le saut d'arrêts impose une limite de montées à zéro et donc ce dernier aurait toujours pour effet d'annuler la limite de montées. C'est donc pourquoi cette combinaison n'est pas admissible puisqu'elle est équivalente au saut d'arrêts appliqué individuellement.

En simulation, les solutions combinées s'appliquent de la même façon que lors de l'application des solutions uniques. De par sa nature, l'immobilisation, qui vise à ralentir l'autobus suivant le retardataire, dépendra grandement de l'efficacité des solutions visant à reprendre le temps perdu par le retardataire. Pour un retard quelconque, les méthodes de résolution appliquées à l'autobus retardataire seront toujours mises en application plus tôt dans le temps que l'immobilisation. Il se pourrait donc que l'immobilisation ne soit plus requise. Pour mieux comprendre la dynamique des solutions combinées, le Tableau 24 présente les heures de passage de cinq autobus sans qu'aucune méthode de résolution ne soit appliquée.

	Arrêts					
	$t-1$		t		$t+1$	
Autobus	Heure de passage	Intervalle avec le précédent	Heure de passage	Intervalle avec le précédent	Heure de passage	Intervalle avec le précédent
$n-1$	240		300		360	
n	840	600	920	620	980	620
$n+1$	1440	600	1500	580	1560	580
$n+2$	2040	600	2100	600	2160	600
$n+3$	2640	600	2700	600	2760	600

Tableau 24 : Heures de passage et intervalles (en secondes) aux arrêts en situation de groupage

On constate au Tableau 24 qu'un retard est noté à l'arrêt t pour l'autobus n . Dans le cas où uniquement l'immobilisation est utilisée pour rétablir la situation, on obtiendrait le résultat présenté au Tableau 25.

	Arrêts					
	$t-1$		t		$t+1$	
Autobus	Heure de passage	Intervalle avec le précédent	Heure de passage	Intervalle avec le précédent	Heure de passage	Intervalle avec le précédent
$n-1$	240		300		360	
n	840	600	920	620	980	620
$n+1$	1440	600	1520	600	1580	600
$n+2$	2040	600	2100	580	2160	580
$n+3$	2640	600	2700	600	2760	600

Tableau 25 : Heures de passage et intervalles (en secondes) aux arrêts en situation de groupage avec immobilisation comme méthode de résolution

Ce qu'on observe au Tableau 25 c'est que la régularité est rétablie lors du passage de l'autobus $n+1$ à l'arrêt t , mais en situation où les temps d'immobilisation et de déplacement sont fixes, l'irrégularité ne serait que repoussée au prochain passage. Puisqu'aucun retard n'est noté à l'arrêt t lors du passage de l'autobus $n+1$ alors la mesure d'immobilisation n'est pas enclenchée et l'intervalle n'est pas celui souhaité lors du passage de l'autobus $n+2$. Ainsi, on noterait un intervalle de 580 secondes entre l'autobus $n+1$ et $n+2$ jusqu'à la fin du parcours si aucun retard supplémentaire n'est encouru et en situation où les temps de déplacement et d'immobilisation sont fixes.

Une solution combinée a pour avantage de répartir les effets. Le Tableau 26 présente les heures de passage et les intervalles lorsque l'immobilisation est combinée à une méthode de résolution d'accélération.

	Arrêts					
	$t-1$		t		$t+1$	
	Heure de passage	Intervalle avec le précédent	Heure de passage	Intervalle avec le précédent	Heure de passage	Intervalle avec le précédent
$n-1$	240		300		360	
n	840	600	920	620	960	600
$n+1$	1440	600	1520	600	1560	600
$n+2$	2040	600	2100	580	2160	600
$n+3$	2640	600	2700	600	2760	600

Tableau 26 : Heures de passage et intervalles (en secondes) aux arrêts en situation de groupage avec immobilisation et méthode de résolution appliquée à l'autobus retardataire

Dans ce dernier exemple, non seulement l'autobus $n+1$ s'immobilise à l'arrêt $t-1$ pour rétablir l'intervalle à l'arrêt t , mais l'autobus n accélère par une quelconque méthode sur le segment allant de l'arrêt t à $t+1$ ce qui fait en sorte que l'intervalle est également régularisé lors du passage de cet autobus à l'arrêt $t+1$. La combinaison de solution fait en sorte qu'à l'arrêt $t+1$ aucun événement de groupage n'est observé. On diminue ainsi considérablement les événements de groupage en situation où les paramètres de temps sont fixes.

Évidemment, il est également possible de combiner deux solutions qui sont destinées à être appliquées à l'autobus retardataire. Cela devient particulièrement intéressant dans le cas où une seule méthode

ne permet pas de gagner l'entièreté du retard encouru. Dans l'exemple précédent, si le saut d'arrêts ne permet pas de gagner 20 secondes sur le segment allant de l'arrêt t à $t+1$, mais qu'il ne peut accélérer le temps que de 10 secondes alors il devient intéressant de combiner cette solution à l'utilisation des feux de priorité si elle permet de gagner les 10 secondes manquantes.

Chapitre 6

Outil d'aide à la décision

La simulation à elle seule permet de tester dans un contexte se rapprochant grandement de la réalité différentes solutions afin de contrer le problème de groupage d'autobus et diminuer l'irrégularité qui en résulte. Au final, le but étant de comparer les solutions entre elles et avec la situation actuelle, la simulation doit devenir un outil d'aide à la décision dans lequel certains indicateurs sont comparés entre eux afin de choisir la solution produisant les meilleurs résultats pour une éventuelle implantation.

Ce chapitre passera en revue les indicateurs qui ont été choisis afin d'évaluer la performance des solutions en plus de présenter la forme de l'extraction servant d'outil d'aide à la décision.

6.1. Indicateurs de performance évalués

Sans surprise, le premier indicateur de performance est la mesure d'irrégularité. On se rappelle qu'elle est calculée en exprimant la différence absolue entre l'intervalle souhaité et l'intervalle réel comme un pourcentage de l'intervalle souhaité. Un service régulier serait caractérisé par des intervalles non seulement d'une même durée, mais également se rapprochant le plus possible de l'intervalle souhaité qui est partagé au public. Ainsi, plus la mesure d'irrégularité se trouve près de 0%, plus le service pourra être qualifié de régulier. L'objectif au niveau des mesures d'irrégularité sera donc de les minimiser.

On s'intéressera également à la stabilité et la variabilité du temps de parcours d'un autobus du moment qu'il arrive sur le parcours jusqu'à sa fin de service au dernier arrêt. La notion de battement a été discutée et il a été expliqué qu'il s'agit d'un temps tampon ajouté en fin de parcours pour assurer un départ en temps dans le sens contraire. Il est calculé en soustrayant le 50^e centile du 95^e centile des temps de parcours observés. On comprend évidemment que si les temps de parcours étaient beaucoup moins variables, le battement calculé serait moins important. Le temps passé au dernier arrêt à attendre le départ en sens contraire a pour résultat d'immobiliser certaines ressources. C'est pourquoi une variabilité réduite des temps de parcours permettrait d'utiliser les chauffeurs et les autobus de manière plus efficace. Afin de vérifier cet aspect, on s'intéressera à l'écart-type des temps de parcours et on calculera le battement selon la méthode du RTC. L'objectif est de réduire l'écart-type ainsi que le battement calculé.

La performance d'une solution proposée devra également être évaluée selon la perspective du passager pour qui le temps de parcours est une combinaison du temps d'attente à l'arrêt et du temps passé à bord du véhicule jusqu'à son arrêt de descente. À plusieurs reprises dans la littérature (Estrada, M., Mensión, J., Aymamí, J.M. & Torres, L., 2016; Xuan, Y., Argote, J. & Daganzo, C.F., 2011; Yu, B., Yao, J.B. & Yang, Z.Z., 2010), il a été suggéré que le temps d'attente à l'arrêt était perçu par le passager comme étant plus long que le temps réel d'attente. Récemment, suite à un sondage réalisé à Athènes, en Grèce, une équipe de la National Technical University of Athens (Psarros, Kepaptsoglou & Karlaftis, 2011) a pu évaluer le ratio du temps perçu par rapport au temps d'attente réel. Le Tableau 27 présente les résultats obtenus par cette équipe de recherche.

Périodes de la journée	Moyenne du temps d'attente perçu	Moyenne du temps d'attente réel	Ratio Moyenne du temps perçu / Moyenne du temps réel
Avant-midi	6.18	3.56	1.74
Après-midi	6.48	4.58	1.41
Soirée	6.25	3.83	1.63

Tableau 27 : Temps d'attente perçus et réels selon la période de la journée (en minutes)

Source : Psarros, Kepaptsoglou, et Karlaftis, 2011

Pour les besoins actuels, et puisque les ratios varient que très peu d'une période à l'autre, la moyenne de ces trois ratios sera calculée. Le ratio utilisé pour calculer le temps perçu dans l'outil d'aide à la décision sera donc 1.6.

Il est également possible dans le cas où le saut d'arrêts ou la limite de montées est la solution appliquée que le passager ne puisse pas monter à bord du premier véhicule à passer à l'arrêt. Évidemment, cela peut être très fâcheux pour le passager qui attend déjà depuis un moment et il n'est pas faux de supposer que le ratio du temps d'attente perçu par rapport au temps réel sera plus grand pour le temps d'attente qui s'ajoutera après le passage de l'autobus. Le ratio utilisé dans cette situation sera de 2.5.

La formule suivante sera donc utilisée afin de calculer le temps de parcours perçu pour un passager. L'objectif est de minimiser le temps de parcours perçu par le passager.

$$TPP_p = 1.6 TA_p + 2.5 TAS_p + TV_p$$

où TPP_p = temps de parcours perçu par le passager p

TA_p = temps d'attente du passager p

TAS_p = temps d'attente supplémentaire du passager p

TV_p = temps de voyage du passager p

Le temps d'attente correspond au temps entre l'arrivée du passager p et l'arrivée de l'autobus duquel il sera ou devait être passager. Le temps d'attente supplémentaire coïncide toutefois avec le temps entre l'arrivée de l'autobus duquel il devait initialement être passager et l'arrivée de celui duquel il sera finalement passager dans les cas où il y a réaffectation. Finalement, le temps de voyage est le temps passé à bord du véhicule jusqu'à l'arrêt où le passager descendra.

Finalement, un dernier indicateur de performance sera évalué. Celui-ci a pour but d'assurer que le confort des passagers est maintenu selon les normes actuelles. On sait qu'actuellement le nombre de passagers moyen est de moins de 59 passagers. Cela signifie que le confort est à son meilleur selon la grille présentée au Tableau 12. On s'assurera donc que les solutions proposées permettent de demeurer sous cette limite offrant ainsi un confort maximal au passager. L'objectif visé est donc de rester sous la barre des 59 passagers et d'ainsi offrir au passager un confort inégalé.

6.2. Forme de l'outil d'aide à la décision

Pour tous les scénarios et solutions testées, une extraction qui servira d'outil d'aide à la décision sera produite et analysée. Bien que des recommandations soient formulées dans ce présent document au Chapitre 7 à la suite de l'analyse de ces extractions, elles seront également fournies au RTC pour leur propre évaluation. Cette section a pour but de décrire l'outil d'aide à la décision pour en faire une bonne lecture. La Figure 17 présente un exemple d'extraction à la suite de 15 répliques.

Outil d'aide à la décision

Paramètres de simulation		Solution(s) implantée(s)			
Nombre de réplifications	15	Saut d'arrêts			
Nombre d'autobus	10	Limite de capacité	x	Limite du nombre de montées (si applicable)	5
Nombre d'arrêts	42	Immobilisation			
Intervalle (en secondes)	600	Feux de priorité			
Seuil de détection des événements (en secondes)	60				
Nombre d'événements détectés en moyenne/réplication	110				
Scénario	2				
Nombre de mesures appliquées en moyenne/réplication	6				
Charge à bord		Temps de parcours perçu par le passager			
Maximum	60	Moyenne des temps de parcours (en secondes)		1447	
Moyenne	15	Moyenne des temps de voyage (en secondes)		1067	
		Moyenne de temps supplémentaire (en secondes)		22	
Temps de parcours					
Écart-type (en secondes)	174				
Battement suggéré (en secondes)	294				
Mesures d'irrégularité					
	Arrêts	Moyenne			
	1	0%			
	2	4%			
	3	6%			
	4	6%			
	5	6%			
	6	6%			
	7	6%			
	8	7%			
	9	7%			
	10	7%			
	11	8%			
	12	9%			
	13	9%			
	14	10%			
	15	10%			
	16	11%			
	17	12%			
	18	12%			
	19	13%			
	20	14%			
	21	15%			
	22	15%			
	23	16%			
	24	17%			
	25	18%			
	26	18%			
	27	19%			
	28	19%			
	29	22%			
	30	22%			
	31	23%			
	32	23%			
	33	23%			
	34	24%			
	35	25%			
	36	25%			
	37	25%			
	38	26%			
	39	27%			
	40	28%			
	41	29%			
	42	30%			

Figure 17 : Exemple d'extraction de l'outil d'aide à la décision

Chapitre 7

Résultats

Le présent chapitre a pour but de présenter pour chacun des scénarios choisis les résultats obtenus en situation de référence et lors de l'application des diverses solutions présentées au Chapitre 5. Ces solutions seront comparées entre elles et avec les situations actuelles afin de faire les recommandations adéquates quant à l'implantation potentielle d'une solution au RTC. Les indicateurs de performance seront évalués et les avantages et inconvénients de chacune des solutions seront discutés.

7.1. Instances

Comme il a été présenté plus tôt, le programme de simulation tire les paramètres relatifs au temps de déplacement, au temps d'immobilisation ainsi qu'au nombre de montées et de descentes de trois scénarios différents, soit Est – pointe du matin, Est – pointe du soir et Ouest – hors pointe. Une feuille de résultats comme celle présentée à la Figure 17 du Chapitre 6 sera produite pour chacun des scénarios en situation où aucune solution n'est implantée. Ces résultats serviront de référence. Ensuite, pour chacun des scénarios, une feuille de résultats par solution potentielle sera également générée.

7.2. Paramètres de la simulation

Une feuille de résultats consiste en une expérimentation qui correspond à 15 réplifications du programme de simulation. Chacune des réplifications permet de lancer sur le parcours 10 autobus ce qui représente environ deux heures en temps réel du départ du premier autobus jusqu'à l'arrivée au dernier arrêt du 10^e autobus. Le nombre d'autobus a été choisi de sorte que le temps total de simulation en temps réel soit équivalent à la période que couvre chacun des scénarios. Par exemple, le scénario Est – pointe du matin tire ses données entre 7h et 9h ce qui correspond à une période de deux heures.

L'intervalle de temps qui sépare chacun des départs d'autobus est de 600 secondes. Il s'agit de l'intervalle moyen pour les périodes que couvre chacun des scénarios.

7.3. Résultats de référence

Les Tableaux 28, 29, 30 et 31 présentent les informations relatives aux différents indicateurs de performance évalués pour les trois scénarios de référence. Ces résultats sont tirés de l'outil d'aide à

la décision présentée au Chapitre 6. Ces feuilles de résultat dans leur intégralité sont présentées à l'Annexe 6.

Le Tableau 28 présente les résultats directement liés à l'irrégularité qui découle du problème de groupage. On y présente entre autres le nombre moyen d'événements de groupage détectés par simulation. Il faut savoir que pour chacune des répliques on calcule 420 mesures d'irrégularité en est et 440 en ouest, soit une pour chaque passage d'autobus à un arrêt. Le seuil de détection utilisé en situation de référence est de 5% ce qui correspond à 30 secondes. La moyenne des mesures d'irrégularité est calculée en excluant le premier autobus ainsi que le premier arrêt du calcul.

Scénario	Nombre moyen d'événements de groupage détectés par réplique	Moyenne des mesures d'irrégularité pour tous les arrêts (en %)
Est – pointe du matin	156	20.06
Est – pointe du soir	144	19.27
Ouest – hors pointe	150	20.39

Tableau 28 : Indicateurs de performance relatifs à l'irrégularité des intervalles pour les scénarios de référence

On peut conclure qu'un écart à l'intervalle souhaité de plus de 30 secondes est noté un peu plus d'une fois sur trois et ce, pour chacun des scénarios présentés. Les moyennes des mesures d'irrégularité pour tous les arrêts sont très similaires d'un scénario à l'autre. On rappelle que la situation idéale correspond à une mesure d'irrégularité se rapprochant de 0%. C'est pourquoi l'objectif attendu des solutions proposées est de diminuer les mesures d'irrégularité présentées au Tableau 28.

Précédemment, on a aussi mentionné vouloir améliorer l'écart-type des temps de parcours et le battement suggéré. Le Tableau 29 présente les indicateurs mesurant ces aspects. Lorsqu'on parle de temps de parcours, il s'agit du temps qu'un autobus prendra pour compléter le trajet du premier au dernier arrêt de la ligne. Il est important de se rappeler que le battement suggéré est calculé en soustrayant le 50^e percentile des temps de parcours du 95^e.

Scénario	Écart-type des temps de parcours (en secondes)	Battement suggéré (en secondes)
Est – pointe du matin	186	309
Est – pointe du soir	186	286
Ouest – hors pointe	147	280

Tableau 29 : Indicateurs de performance relatifs au temps de parcours pour les scénarios de référence

Puisque la performance du système repose également sur l'expérience du passager, les prochains tableaux se concentrent sur la perspective de ce dernier par rapport à son parcours. Le Tableau 30 présente les résultats par rapport aux temps de parcours et de voyage perçus moyens. Le temps de parcours perçu comprend à la fois le temps de voyage passé à bord de l'autobus et le temps d'attente à l'arrêt. Il est important de se rappeler que le temps d'attente est celui perçu par le passager et qu'il est donc multiplié par un coefficient.

Scénario	Temps de parcours perçu moyen par passager (en secondes)	Temps de voyage perçu moyen par passager (en secondes)
Est – pointe du matin	1392	1068
Est – pointe du soir	1402	1075
Ouest – hors pointe	1155	823

Tableau 30 : Indicateurs de performance relatifs au temps de parcours et de voyage par passager pour les scénarios de référence

Finalement, le Tableau 31 présente les résultats en lien avec le nombre de passagers à bord du véhicule. On utilise 59 passagers comme limite puisqu'il s'agit du nombre maximal de personnes pour demeurer dans le même intervalle de confort actuel. Le pourcentage des charges au-delà de 59 passagers est calculé en comparant le nombre de fois que la charge est plus grande que ce niveau et le nombre d'enregistrements de charges. En direction est, pour 15 répliques, on note 6300 enregistrements de charge et en direction ouest, 6600. Une charge à bord est enregistrée pour chaque passage d'autobus à un arrêt.

Scénario	Nombre de passagers moyen	Charge à bord maximale	Pourcentage des charges au-delà de 59 passagers (en %)
Est – pointe du matin	16	59	0.00
Est – pointe du soir	15	61	0.03
Ouest – hors pointe	7	42	0.00

Tableau 31 : Indicateurs de performance relatifs à la charge à bord pour les scénarios de référence

On constate que les normes de confort demeurent sous la barre des 59 passagers. C'est une limite que l'on espère respectée dans les solutions proposées.

7.4. Abréviations

Afin d'alléger les prochaines sections, certaines abréviations seront utilisées afin de représenter les solutions uniques et combinées. Le Tableau 32 énumère ces abréviations.

Type de solutions	Solution	Abréviation
Uniques	Saut d'arrêts	SA
	Limite de montées	LM(x)
	Immobilisation	IM
	Feux de priorité	FP
Combinées	Saut d'arrêts/Immobilisation	SA/IM
	Saut d'arrêts/Feux de priorité	SA/FP
	Limite de montées/Immobilisation	LM(x)/IM
	Limite de montées/Feux de priorité	LM(x)/FP
	Immobilisation/Feux de priorité	IM/FP

Tableau 32 : Abréviations pour représenter les solutions

Lorsqu'une solution implique une limite de montées, on ajoute entre parenthèses le nombre de personnes maximal que la limite permet de faire monter. Par exemple, si la limite de montées est de 3 montées, alors la solution serait identifiée de la manière suivante : LM(3).

7.5. Observations générales

7.5.1. Seuil de détection optimal

Dans le cadre de la simulation, trois seuils de détection existent pour qualifier un retard d'événement de groupage. Puisque les départs d'autobus se font à un intervalle de 600 secondes, les seuils de détection possibles sont 30, 45 et 60 secondes.

Ce qu'on constate à la vue des résultats, c'est que de façon générale le seuil de détection de 30 secondes présente de meilleurs résultats en termes de régularité. En effet, la moyenne des mesures d'irrégularité est inférieure lorsque le seuil est de 5% par rapport aux deux autres options offertes pour une même solution et un même scénario.

Cela s'explique par le fait que les événements de groupage sont détectés plus rapidement et qu'il est donc possible d'agir immédiatement pour rétablir les intervalles. Un seuil de détection plus contraignant peut demander d'appliquer des mesures plus rapidement donc plusieurs arrêts avant l'endroit où on aurait noté un écart de 10% à l'intervalle souhaité par exemple.

Le Tableau 33 présente les résultats obtenus lors de l'application de différentes solutions pour différents scénarios. Le but est d'illustrer le comportement des mesures d'irrégularité selon le seuil de détection choisi.

Scénario	Solution	Seuil de détection (en secondes)	Moyenne des mesures d'irrégularité pour tous les arrêts (en %)
Est – pointe du matin	SA/IM	30	10.11
		45	11.77
		60	13.16
Est – pointe du soir	LM(1)/IM	30	11.84
		45	12.66
		60	13.80
	SA	30	11.71
		45	14.29
		60	13.57
Ouest – hors pointe	LM(3)/FP	30	15.22
		45	17.09
		60	16.61

Tableau 33 : Comportement des moyennes des mesures d'irrégularité selon le seuil de détection choisi

On constate que pour les solutions présentées ci-haut, le seuil de détection de 30 secondes fonctionne toujours mieux. C'est une tendance remarquée de façon générale, mais il existe bien entendu des exceptions selon les solutions et les scénarios.

Il est important de noter qu'on parle ici seulement de l'aspect régularité et qu'un seuil de détection plus sévère ne présente pas toujours des résultats favorables pour les autres éléments évalués. Évidemment, un seuil de détection de 30 secondes implique que l'on réagit plus souvent et donc on peut voir le nombre de mesures à appliquer doublé dans certains cas.

7.5.2. Performance des différentes limites de capacité

Lors de l'implantation d'une mesure impliquant une limite de montées, trois options s'offrent. Il est possible de limiter le nombre de montées à 1, 3 ou 5 personnes dans le contexte de simulation actuel. La limite de montées vise une accélération du temps passé à l'arrêt pour permettre à l'autobus de rattraper son retard. Le gain de temps se fait lorsque le nombre de montées prévues est supérieur à la limite de montées imposée. Pour toutes les situations où l'inverse se produit, alors c'est l'équivalent de n'implanter aucune mesure. Ainsi, on serait en présence d'un système tel quel où aucune mesure n'est appliquée pour réduire le groupage. L'effet escompté n'est donc pas observé.

Cette dynamique se reflète parfaitement dans les résultats enregistrés lors de l'application de la limite de montées en simulation avec différentes limites de montées. En effet, on constate qu'avec une limite de montées à 5 personnes, le nombre de fois que la limite est réellement appliquée est faible et on note une très faible amélioration des mesures d'irrégularité par rapport à la situation de référence. Cela est cohérent puisqu'on ne peut pas espérer améliorer grandement la situation si la mesure n'est que très rarement appliquée.

Le Tableau 34 présente les résultats obtenus lors de l'application de la limite de montées pour le scénario Est – pointe du soir. Le nombre de mesures appliquées ainsi que la moyenne des mesures d'irrégularité au dernier arrêt sont présentés pour chacun des dérivés potentiels de cette solution.

Solution	Seuil de détection (en %)	Nombre de mesures appliquées en moyenne par réplication	Moyenne des mesures d'irrégularité pour tous les arrêts (en %)
LM(1)	30	41	13.50
LM(3)	30	19	14.09
LM(5)	30	7	14.96
LM(1)	45	34	14.09
LM(2)	45	17	15.66
LM(3)	45	7	17.66
LM(1)	60	30	14.95
LM(3)	60	17	18.15
LM(5)	60	6	17.69

Tableau 34 : Résultats de la limite de montées pour le scénario Est - pointe du soir

La dynamique précédemment discutée est facilement observable au Tableau 34. On constate une diminution du nombre de mesures plus la limite de montées est grande. De plus, on voit également que l'irrégularité demeure beaucoup plus près des résultats de référence pour ces limites plus élevées. La moyenne des mesures d'irrégularité était de 19.27% pour le scénario Est – pointe du soir en situation de référence. Il est également important de souligner que c'est pour ce scénario que le nombre de passagers est le plus important. En effet, on note une charge à bord moyenne de 15 personnes. On peut donc conclure que le nombre d'interventions devrait être encore plus faible pour les deux autres scénarios. C'est effectivement ce qui a été observé dans les résultats de simulation. Pour le scénario Ouest – hors pointe qui est le moins achalandé, le nombre moyen de mesures par réplication pour LM(5) avec un seuil de tolérance de 60 secondes n'est que de 2.

7.5.3. Contexte de réussite du saut d'arrêts et de la limite de montées

Pour faire suite à la discussion précédemment entamée, il semble exister de prime abord un contexte bien particulier dans lequel on peut espérer de meilleurs résultats du saut d'arrêts et de la limite de montées. La performance de ces deux mesures sur la régularité est intimement reliée au nombre de personnes circulant sur le parcours. On se rappelle que le saut d'arrêts n'est en fait qu'une limite de montées fixée à 0. Comme mentionné à la section précédente, on ne peut espérer un gain par rapport à la situation de référence que si l'opportunité d'appliquer la mesure se présente.

On a d'abord comparé les résultats pour le scénario Est – pointe du soir puisque c'est dans ce dernier que circulent le plus de passagers. La moyenne des mesures d'irrégularité pour la situation de référence de ce scénario est de 19.27%. Le meilleur des dérivés du saut d'arrêts, soit avec un seuil de détection de 30 secondes, présente une moyenne de 11.71%. L'irrégularité est réduite de 39% par rapport à la référence. Le meilleur des dérivés de la limite de montées, soit LM(1) avec un seuil de détection de 30 secondes, permet d'atteindre une moyenne des mesures d'irrégularité de 13.50%. Cela résulte en une amélioration de 30%.

Étonnamment, des améliorations très semblables ont été observées pour les deux autres scénarios avec ces deux mêmes solutions. On constate donc qu'il existe un phénomène de proportionnalité. Il est donc vrai que moins de mesures sont appliquées pour les scénarios Est – pointe du matin et Ouest – hors pointe puisque le nombre de passagers est moindre. Toutefois, on peut atteindre les mêmes niveaux d'amélioration en appliquant moins de mesures puisque les causes de retard sont étroitement liées au nombre de passagers sur le parcours.

7.6. Analyse des résultats

7.6.1. Analyse des solutions uniques

La section suivante vise à comparer les différentes solutions uniques entre elles afin de déterminer lesquelles offrent le meilleur potentiel selon les trois scénarios choisis. Pour chacun des scénarios, ce sont 18 solutions potentielles qui ont été testées. Ceci est le nombre de mesures que l'on obtient en comptant les différents seuils de détection et les différentes limites de montées pour les quatre solutions uniques de base. Ces 18 feuilles de résultats ont été analysées pour chacun des scénarios et les meilleures ont été sélectionnées pour être présentées et discutées dans cette section. On présente au moins une instance par solution et parfois plus d'une lorsque les résultats sont intéressants. Les Tableaux 35, 36 et 37 présentent donc les résultats obtenus pour les solutions uniques présélectionnées pour chacun des scénarios.

Solution	Seuil de détection (s)	Nombre d'événements de groupage détectés moyen par réplication	Nombre de mesures appliquées moyen par réplication	Moyenne des mesures d'irrégularité pour tous les arrêts (%)	Écart-type des temps de parcours (s)	Battement suggéré (en secondes)	Temps de parcours perçu moyen par passager (s)	Temps de voyage perçu moyen par passager (s)
Référence	30	156		20.06	186	309	1392	1068
FP	30	131	3	14.90	156	270	1336	1014
LM(1)	30	130	36	11.59	137	223	1777	1024
LM(1)	60	92	21	12.84	133	220	1514	1003
SA	45	113	113	12.08	146	246	1914	1021
SA	60	94	94	12.73	151	256	1735	1021
IM	30	129	129	11.99	151	190	1378	1048

Tableau 35 : Tableau des résultats des meilleures solutions uniques retenues pour le scénario Est - pointe du matin

L'objectif principal étant de réduire la variabilité des intervalles, on constate rapidement que l'utilisation des feux de priorité performe nettement moins bien que les autres solutions proposées. Les autres solutions permettent toutes de réduire de plus ou moins 40% la moyenne des mesures d'irrégularité alors que l'amélioration n'est que de 26% en ce qui concerne les feux de priorité. Lorsqu'on consulte la feuille de résultats pour cette même solution ce qu'on constate c'est que le système ne peut être amélioré qu'à partir du 29^e arrêt. Cela en est ainsi puisque c'est le segment précédent cet arrêt qui a été choisi comme endroit pour implanter le feu de priorité. Avant le 29^e arrêt, on est donc en présence d'un système non contrôlé comme celui du scénario de référence. Cela explique la faible performance de cette solution. Toutefois, il est important de noter que le temps perçu de parcours moyen par passager est inférieur au temps de parcours du modèle de référence. L'irrégularité n'est pas améliorée significativement, mais le passager passe en moyenne 1 minute de moins sur le parcours.

En ce qui concerne les autres solutions, puisqu'elles présentent des mesures d'irrégularité très similaires, on se penchera sur les autres indicateurs de performance pour analyser leur performance. La différence notée dans les irrégularités n'est pas assez importante pour justifier le choix d'une solution aux dépens d'une autre.

D'abord on constate que la limite de montées demande l'application de moins de mesures pour des intervalles similaires. Cela implique donc un effort moindre sur le parcours, lorsqu'implanté. On réduit ainsi de plus de la moitié les communications potentielles avec le chauffeur pour lui indiquer les actions à prendre. Ce dernier se verra donc moins sollicité et pourra se concentrer sur son travail principal. Bien que la limite de montées requière moins de prises d'action, le refus d'un passager est une activité très désagréable pour le chauffeur. Chaque fois qu'il doit refuser qu'un passager monte à bord, il sera la source du mécontentement des passagers et il en découle une moins bonne qualité de vie au travail. Strictement en termes de régularité, pour une même mesure, un chauffeur serait beaucoup plus tenté par la limite de montées, car il aura à refuser des passagers à bord 3 fois moins souvent comparativement au saut d'arrêts. On limite donc le nombre d'interventions nécessaires et les sources d'irritation chez les passagers pour un même résultat final. De plus, lorsque la solution est LM(1) avec un seuil de détection de 60 secondes, le temps de parcours perçu en moyenne par le passager est de 200 secondes moins élevé en comparaison avec SA pour le même seuil. SA avec un seuil de 45 ou 60 secondes et LM(1) avec un seuil de 30 secondes impliquent que plus de personnes se verront refuser l'accès. Cela a pour conséquence d'augmenter le temps d'attente du passager considérablement ce qui se reflète sur le temps de parcours perçu total. Ce qu'on conclut c'est que le fait de refuser plus de passagers n'a pas d'effets supplémentaires sur les mesures d'irrégularité, mais

augmente le temps de parcours des passagers ce qui n'est pas souhaitable. Le très léger gain en termes de régularité coûte conséquemment très cher au passager.

De manière générale, lorsque tous les indicateurs sont simultanément observés, c'est l'immobilisation qui offre les meilleurs résultats. En effet, l'application de cette mesure permet de conserver la durée moyenne de parcours par passager en réduisant la mesure d'irrégularité à 11.99% au dernier arrêt. LM(1) avec un seuil de 30 secondes présente un résultat meilleur au niveau de la moyenne des mesures d'irrégularité, mais le temps de parcours perçu par le passager est beaucoup trop augmenté par rapport à la situation de référence. Même si l'immobilisation implique que le temps passé à certains arrêts est plus important, les temps de parcours globaux sont maintenus. On sait qu'une des raisons qui causent le groupage d'autobus est que les passagers montent à bord de véhicules qu'ils n'avaient pas l'intention de prendre. Un autobus qui accuse du retard fera monter à son bord des passagers qui croyaient monter à bord du suivant. Lorsque le prochain passera à l'arrêt, moins de passagers y seront et l'autobus quittera plus rapidement l'arrêt augmentant l'écart avec celui qui le suit. Les intervalles non souhaités continueront de se propager sur les autobus subséquents. L'immobilisation permet d'éviter que l'autobus soit trop rapide à l'arrêt vu le nombre de personnes moins important à faire monter. On neutralise donc l'effet en chaîne. Au final, même si quelques passagers voient leur temps de parcours allongé, de manière générale, en moyenne, les temps de parcours diminuent.

L'immobilisation présente également des résultats forts intéressants en termes de variabilité des temps de parcours enregistrés pour les autobus. L'écart type des temps de parcours est très similaire à celui des autres solutions. Toutefois, c'est au niveau du battement suggéré que les gains sont remarquables. En effet, le battement suggéré est de 190 secondes ce qui représente une réduction de 119 secondes, soit 2 minutes. Cela veut donc dire que les temps de parcours seraient assez stables pour réduire le temps tampon ajouté en fin de parcours de 5 à 3 minutes. Sur une simulation d'une durée de deux heures au cours de laquelle 10 autobus sont déployés, ce sont 20 minutes qui pourraient être sauvées. Cela implique donc une meilleure utilisation des ressources au final. Finalement, il faut tout de même noter que IM est la solution qui demande le plus d'interventions.

On sait que c'est dans le scénario Est – pointe du soir que circulent le plus de passagers. Le Tableau 36 présente les résultats des solutions retenues pour ce deuxième scénario et démontre de quelle façon le nombre de passagers peut avoir de l'influence sur la performance des solutions.

Solution	Seuil de détection (s)	Nombre d'événements de groupage détectés moyen par réplication	Nombre de mesures appliquées moyen par réplication	Moyenne des mesures d'irrégularité pour tous les arrêts (%)	Écart-type des temps de parcours (s)	Battement suggéré (en secondes)	Temps de parcours perçu moyen par passager (s)	Temps de voyage perçu moyen par passager (s)
Référence	30	144		19.27	186	286	1402	1075
FP	45	113	3	16.44	168	304	1361	1039
LM(1)	30	145	41	13.50	167	273	1812	1096
SA	30	145	145	11.71	170	295	2050	1102
IM	45	111	111	14.13	176	210	1435	1109

Tableau 36 : Tableau des résultats des meilleures solutions uniques retenues pour le scénario Est - pointe du soir

Des conclusions très similaires à celles du scénario Est – pointe du matin sont tirées dans ce deuxième scénario. D’abord, on constate que l’utilisation des feux de priorité est toujours la solution qui permet le moins bien de rétablir la régularité. Il faut se rappeler que la solution FP implique l’utilisation d’un seul feu de priorité. Il a été décidé de ne mettre en place qu’un seul feu de priorité puisqu’on considèrerait que l’effort d’implantation était davantage semblable à celui des autres solutions ainsi ce qui n’aurait pas été le cas si la solution impliquait l’implantation de plusieurs feux. Toutefois, elle a l’avantage de réduire le temps de parcours perçu par le passager ce qui n’est tout de même pas négligeable.

Encore une fois, les résultats des autres solutions en termes de régularité sont très similaires. Les moyennes des mesures d’irrégularité sont très semblables et cela en est de même pour les écart-types des temps de parcours. Une fois de plus, c’est l’immobilisation qui se révèle la plus performante par rapport aux indicateurs choisis. Le battement suggéré est réduit d’un peu plus d’une minute pour un seuil de détection de 45 secondes et la moyenne des temps de parcours perçus par le passager est nettement inférieure à celles de LM(1) et SA qui elles demandent d’augmenter les temps d’attente de certains passagers. Comparativement aux résultats du premier scénario, le nombre d’interventions nécessaires est moins élevé que pour le saut d’arrêts.

Sans surprise, les résultats pour le scénario Ouest – hors pointe conservent les mêmes caractéristiques. Le Tableau 37 en fait la preuve.

Solution	Seuil de détection (s)	Nombre d'événements de groupage détectés moyen par réplication	Nombre de mesures appliquées moyen par réplication	Moyenne des mesures d'irrégularité pour tous les arrêts (%)	Écart-type des temps de parcours (s)	Battement suggéré (en secondes)	Temps de parcours perçu moyen par passager (s)	Temps de voyage perçu moyen par passager (s)
Référence	30	150		20.39	145	272	1155	823
FP	60	120	2	17.42	129	218	1129	808
LM(3)	45	124	5	14.70	116	160	1277	821
SA	30	139	139	12.94	120	200	1564	831
SA	60	118	118	15.29	120	218	1628	831
IM	30	134	134	12.84	149	227	1191	867
IM	60	107	107	14.09	142	228	1165	835

Tableau 37 : Tableau des résultats des meilleures solutions uniques retenues pour le scénario Ouest – hors pointe

Bien qu'une fois de plus l'utilisation des feux de priorité ne soit pas la meilleure solution, il demeure que très peu d'efforts sont nécessaires une fois le système mis en place. Le chauffeur n'a pas à réagir à des signaux quelconques pour s'immobiliser plus longtemps à un arrêt ou refuser des passagers à bord. Il n'a qu'à suivre les feux de circulation comme il le ferait normalement. Bien que l'amélioration ne soit pas exceptionnelle, il y a tout de même un gain avec cette solution. De plus, le passager peut compléter son parcours en moins de temps que le modèle de référence.

Lorsque c'est le saut d'arrêts qui est implanté, c'est une toute autre expérience pour le passager. En moyenne, un passager devra attendre environ 3 minutes supplémentaires avant de monter à bord d'un véhicule. Cela résulte en des temps de parcours perçus très élevés.

Pour des mesures d'irrégularité très similaires, LM(3) et IM offrent des temps de parcours par passager beaucoup plus intéressants. Bien que les solutions d'immobilisation, peu importe le seuil de détection, présentent des mesures d'irrégularité plus faibles par rapport à LM(3), cette dernière solution s'avère très satisfaisante en termes de battement suggéré. En effet, ce sont tout près de 2 minutes qui peuvent être sauvées en fin de parcours sur les temps tampons minimums ajoutés.

Pour toutes les solutions présentées aux Tableaux 35, 36 et 37, les charges à bord moyennes sont maintenues au même niveau que pour les scénarios de référence. Pour les scénarios Est – pointe du matin et Ouest – hors pointe, la limite de 59 passagers pour préserver le confort est respectée. En ce qui concerne le scénario Est – pointe du soir, c'est la solution IM avec un seuil de 30 secondes qui présente le plus de charges au-delà de 59 passagers et ce n'est que 4 enregistrements de charge sur une possibilité de 6300. C'est pourquoi on considère que toutes ces solutions permettent de préserver le confort actuel des passagers.

7.6.2. Analyse des solutions combinées

En plus des solutions uniques qui de toute évidence permettent en effet d'améliorer la régularité du système, on s'intéresse également aux combinaisons de ces diverses solutions dans le but d'obtenir des résultats encore plus satisfaisants. Les Tableaux 38, 39 et 40 présentent les meilleurs résultats obtenus pour chacune des combinaisons possibles, et ce, pour chacun des scénarios.

Solution	Seuil de détection (s)	Nombre d'événements de groupage détectés moyen par réplication	Nombre de mesures appliquées moyen par réplication	Moyenne des mesures d'irrégularité pour tous les arrêts (%)	Écart-type des temps de parcours (s)	Battement suggéré (en secondes)	Temps de parcours perçu moyen par passager (s)	Temps de voyage perçu moyen par passager (s)
Référence	30	156		20.06	186	309	1392	1068
SA/IM	30	141	282	10.11	175	281	2182	1080
SA/IM	45	112	224	11.77	177	281	1948	1060
SA/FP	30	137	142	11.87	149	226	2031	1035
LM(3)/FP	30	140	9	13.25	118	179	1268	814
LM(1)/FP	45	133	20	11.68	120	213	1414	815
IM/FP	30	134	138	11.89	167	220	1392	1065
IM/FP	60	81	84	11.40	152	234	1334	1012
LM(5)/IM	30	130	134	11.75	164	233	1395	1025
LM(3)/IM	45	107	117	11.81	146	186	1512	1029
LM(3)/IM	60	86	93	11.57	150	244	1455	1053

Tableau 38: Tableau des résultats des meilleures solutions combinées retenues pour le scénario Est - pointe du matin

On note premièrement que les moyennes des mesures d'irrégularité sont très similaires. Cette mesure varie de 10.11% à 13.25%. On remarque que les pires performances en termes de temps de parcours perçus reviennent au saut d'arrêts combiné à l'immobilisation ou à l'utilisation des feux de priorité. En effet, le temps de parcours moyen est jusqu'à 1.5 fois plus long que le temps de parcours moyen actuel. Cette même tendance avait également été notée dans les résultats des solutions uniques. La même conclusion s'en dégage donc. D'autres solutions performant beaucoup mieux au niveau des temps de parcours perçus en plus d'offrir des résultats similaires en termes de régularité et de nécessiter tout autant ou même moins d'interventions.

Si l'on s'attarde à la combinaison de l'immobilisation avec l'utilisation des feux de priorité, on constate qu'il n'y a pas de réels gains à combiner ces deux solutions. En effet, l'immobilisation à elle seule permet d'atteindre des résultats pratiquement identiques à ceux de la méthode combinée et nécessite beaucoup moins d'effort de déploiement. Face au choix entre ces deux propositions, il est sans aucun doute plus avantageux de choisir la méthode unique.

Une des meilleures performances revient à la limite de montées fixée à 5 montées combinée à l'immobilisation avec un seuil de tolérance de 30 secondes. Le temps de parcours perçu est maintenu par rapport à la situation de référence et le battement suggéré est réduit considérablement. Il l'est d'autant plus dans le cas de la limite de montées fixée à 3 montées combinée à l'immobilisation avec un seuil de tolérance de 45 secondes puisque le battement suggéré y est de 186 secondes. Toutefois, cela coûte cher au passager qui voit son temps de parcours augmenté de 200 secondes. LM(5)/IM permet d'atteindre une moyenne des mesures d'irrégularité au dernier arrêt de 11.75%. Cependant, cette solution demande l'application de plusieurs mesures. Cette dernière fonctionne tout de même mieux que chacune des solutions appliquées individuellement. En fixant la limite de montées à 5 personnes, on améliore encore un peu plus la performance de l'immobilisation appliquée individuellement tout en ne générant pas trop d'effets négatifs sur le système. La limite n'est appliquée que 4 fois ce qui n'affecte que quelques passagers et fait en sorte que la moyenne des temps de parcours perçus demeure à sa durée normale.

LM(3)/FP présente des résultats remarquables considérant le peu de mesures que cela demande. En effet, bien que 140 événements soient détectés, seulement 9 mesures sont nécessaires pour améliorer la régularité du système. La moyenne des mesures d'irrégularité n'est pas la meilleure, mais elle est tout de même très intéressante considérant l'effort requis. De plus, le temps de parcours moyen perçu par le passager est réduit de 2 minutes.

Au Tableau 39, on peut voir les résultats associés au scénario Est – pointe du soir.

Solution	Seuil de détection (s)	Nombre d'événements de groupage détectés moyen par réplication	Nombre de mesures appliquées moyen par réplication	Moyenne des mesures d'irrégularité au dernier arrêt (%)	Écart-type des temps de parcours (s)	Battement suggéré (en secondes)	Temps de parcours perçu moyen par passager (s)	Temps de voyage perçu moyen par passager (s)
Référence	30	144		19.27	186	286	1402	1075
SA/IM	30	155	310	11.91	238	348	2400	1122
SA/FP	45	112	115	12.37	169	322	1909	1094
LM(1)/FP	30	132	40	12.23	155	265	1762	1074
LM(1)/FP	60	100	30	14.32	167	285	1631	1072
IM/FP	30	142	146	13.01	193	252	1428	1100
LM(1)/IM	30	140	149	11.84	182	257	1504	1099

Tableau 39 : Tableau des résultats des meilleures solutions combinées retenues pour le scénario Est - pointe du soir

Bien que certaines particularités puissent être perçues, les conclusions d'ordre général sont très similaires à celles du scénario précédent. En effet, on constate entre autres que les moyennes des mesures d'irrégularité des solutions proposées sont très similaires et permettent nettement d'améliorer la situation initiale. On peut aussi voir que l'application d'une deuxième mesure peut améliorer la situation d'une solution unique, mais les gains sont tout de même limités. Il faut donc en comprendre que le double de mesures ne permet pas de réduire les mesures d'irrégularité deux fois plus.

Le temps de parcours perçu par le passager se rapprochant le plus de la durée initiale est celui pour la solution IM/FP. Le parcours y est perçu comme étant que 26 secondes plus long ce qui est très négligeable. Toutefois, le gain en termes de régularité est moindre par rapport à LM(1)/IM par exemple. Cette dernière solution combinée offre un temps de parcours perçu de 1504 secondes ce qui se rapproche grandement du temps actuel. Cependant, la moyenne des mesures d'irrégularité est de 11.84% ce qui représente une amélioration remarquable. De plus, le battement suggéré est le deuxième plus petit parmi les suggestions. On remarque que comparativement à la solution pour le scénario Est – pointe du matin où les résultats les plus satisfaisants appartenaient à LM(5)/IM, ici, une limite de montées plus sévère est nécessaire. Cela est très cohérent avec l'achalandage du parcours. Afin de rétablir le mieux possible la régularité, une limite plus conservatrice présente de meilleurs résultats comparativement à la même solution, mais avec d'autres limites. On n'applique la limite que 9 fois ce qui ne pénalise pas significativement l'expérience du client au niveau des temps d'attente. Toutefois, ces quelques fois sont suffisantes pour réduire de 16% la moyenne des mesures d'irrégularité comparativement avec l'immobilisation appliquée seule. Évidemment le temps de parcours perçu est légèrement supérieur à ce qui avait été observé pour la solution unique puisqu'une limite de montées est ajoutée.

La Tableau 40 présente les résultats obtenus lors des expérimentations de solutions combinées pour le scénario Ouest – hors pointe.

Solution	Seuil de détection (s)	Nombre d'événements de groupage détectés moyen par réplication	Nombre de mesures appliquées moyen par réplication	Moyenne des mesures d'irrégularité au dernier arrêt (%)	Écart-type des temps de parcours (s)	Battement suggéré (en secondes)	Temps de parcours perçu moyen par passager (s)	Temps de voyage perçu moyen par passager (s)
Référence	30	150		28	145	272	1155	823
SA/IM	30	150	300	11.82	168	304	1893	853
SA/FP	60	107	109	13.65	110	190	1492	822
LM(1)/FP	45	133	20	14.01	120	213	1414	815
IM/FP	30	143	146	13.85	147	170	1180	852
IM/FP	60	100	103	13.04	130	235	1134	817
LM(3)/IM	30	143	151	12.85	142	150	1346	838
LM(5)/IM	45	120	123	11.80	119	150	1208	826

Tableau 40 : Tableau des résultats des meilleures solutions combinées retenues pour le scénario Ouest – hors pointe

Lors de l'application des solutions individuelles, c'est l'immobilisation qui offrait les résultats les plus satisfaisants en termes de régularité et de battement suggéré avec un temps de parcours perçu par le passager plus que raisonnable. Au Tableau 40, on constate rapidement que ce sont les combinaisons avec l'immobilisation qui fonctionnent le mieux. Entre autres, IM/FP permet d'améliorer légèrement les temps de parcours perçus grâce à l'accélération causée par l'utilisation des feux de priorité. La moyenne des mesures d'irrégularité est très similaire à ce qui avait été obtenu pour l'immobilisation seule puisque, comme on le sait maintenant, l'utilisation des feux de priorité est la méthode qui apporte le moins de gains au niveau des mesures d'irrégularité. Le battement suggéré pour un seuil de 30 secondes passe quant à lui de 227 secondes à 170 secondes ce qui représente une réduction de près d'une minute. Pour le seuil de 60 secondes, le battement suggéré demeure inchangé.

Comme c'était le cas en direction est, c'est la combinaison entre la limite de montées et l'immobilisation qui démontre une meilleure performance globale au niveau des indicateurs choisis. La moyenne des mesures d'irrégularité au dernier arrêt pour LM(5)/IM atteint 11.80% ce qui est une amélioration considérable par rapport aux résultats obtenus pour les solutions individuelles. LM(5) avec un seuil de détection de 45 secondes présentait une moyenne des mesures d'irrégularité plutôt décevante qui ne figure même pas au Tableau 37 pour cette raison. La limite n'étant appliquée que 3 fois, les gains étaient très limités. Toutefois, lorsque combinée à l'immobilisation, son activation très rare permet tout de même d'améliorer la performance. Le battement suggéré est le meilleur observé atteignant 150 secondes. Cela représente une amélioration de 2 minutes par rapport au scénario de référence.

Pour toutes les solutions combinées présentées aux Tableaux 38, 39 et 40, la limite de confort fixée à 59 passagers est dépassée que dans le cas de cinq solutions. C'est pour SA/FP pour le scénario Est – pointe du soir que la limite est la plus souvent non respectée. On note une charge à bord supérieure à cette limite 20 fois sur 6300 charges enregistrées. Cela ne représente que 0.32% des enregistrements et on considère donc que la limite est respectée pour toutes les solutions proposées.

7.7. Recommandations

À la lumière de ces différents résultats, nous sommes en mesure de faire les recommandations adéquates pour le choix d'une solution.

Si le RTC tient à n'appliquer qu'une seule solution, alors c'est l'immobilisation qui serait recommandée. En effet, cette méthode permet d'atteindre des résultats remarquables en tout point. Elle permet non seulement de réduire considérablement les moyennes des mesures d'irrégularité en

plus d'améliorer la valeur du battement suggéré et de maintenir les temps de parcours perçus actuels. L'amélioration au niveau de la moyenne des mesures d'irrégularité est de 40% pour les scénarios Est – pointe du matin et Ouest – hors pointe. Cette même amélioration est plutôt de 25% pour le scénario Est – pointe du soir. Bien que d'autres solutions performaient mieux au niveau de la régularité, elles étaient très pénalisantes sur d'autres aspects.

Il est fort intéressant de constater que les moyennes des temps de parcours des autobus, soit le temps qu'un autobus prend du premier au dernier arrêt, sont pratiquement inchangées lorsqu'on compare les scénarios de référence aux meilleures solutions. Le Tableau 41 démontre ce phénomène.

Scénario	Instance	Temps de parcours moyen des autobus (s)	Écart type des temps de parcours des autobus (s)
Est – pointe du matin	Référence	3042.78	186
	LM(5)/IM Seuil : 30 secondes	2964.80	164
Est – pointe du soir	Référence	3057.32	186
	LM(1)/IM Seuil : 30 secondes	3185.17	182
Ouest – hors pointe	Référence	2486.84	147
	LM(5)/IM Seuil : 45 secondes	2480.37	119

Tableau 41 : Comparaison des temps de parcours des autobus

Le Tableau 41 démontre parfaitement l'atteinte de l'objectif principal, soit de régulariser le système. On y voit que les moyennes des temps de parcours des autobus ne changent pratiquement pas alors que les écarts types eux diminuent. On comprend donc que les solutions proposées permettent en effet de stabiliser les temps de parcours.

Cette mesure a prouvé son efficacité dans tous les scénarios. Nous sommes donc en mesure de croire que cette solution aurait les résultats escomptés dans différents contextes. De plus, pour une implantation plus simple, il serait évidemment préférable d'affecter une même solution pour tous les parcours et heures de la journée puisque cela simplifie grandement les opérations. Ainsi, on recommande l'application d'une solution unique ou combinée universelle qui performe bien dans plusieurs contextes.

Il est vrai que les solutions combinées demandent dans la plupart des cas d'augmenter considérablement le nombre de mesures pour en retirer que de légères améliorations. Si l'on regarde les combinaisons avec l'immobilisation, qui elle performait la mieux individuellement, SA/IM double le nombre d'interventions pour des résultats très similaires. Il existe toutefois quelques exceptions à cette règle. En effet, IM/FP et LM/IM n'augmentent le nombre de mesures que de très peu et permettent d'améliorer les résultats de l'immobilisation appliquée individuellement. L'utilisation des feux de priorités demande énormément d'effort en termes de déploiement aux préalables puisqu'on doit aménager les voies réservées en plus d'apporter les modifications nécessaires aux feux de circulation. Pour cette raison, la limite de montées devrait être préférée puisqu'elle requiert beaucoup moins d'efforts d'implantation et n'augmente pas grandement le nombre de mesures à appliquer au quotidien.

C'est la combinaison LM/IM qui offre le meilleur potentiel en ce qui concerne l'éventail des solutions combinées proposées. Elle permet d'améliorer les résultats de l'immobilisation à elle seule pour un nombre d'interventions peu augmenté. Le peu de fois où des passagers sont refusés à bord du véhicule n'est pas suffisant pour causer des désagréments à la qualité de travail des chauffeurs.

7.8. Implantation

Bien que la solution combinée LM/IM soit plus performante, elle demande plus d'efforts d'implantation que l'immobilisation à elle seule. On recommande donc que l'implantation de la solution combinée se fasse en deux phases. La première phase du déploiement consisterait à implanter l'immobilisation comme solution unique jusqu'à ce que le processus soit bien rôdé et adopté par les chauffeurs. Dans un deuxième temps, la limite de montées pourra être ajoutée à la solution unique. Le programme de simulation pourrait même être utilisé entre les deux phases pour valider les paramètres à utiliser lors de la mise en œuvre de la deuxième phase.

Comme on a pu le voir dans les tableaux de résultats, d'un scénario à l'autre, les seuils de détection et les limites de montées les plus efficaces peuvent varier. C'est pour cette raison que l'outil d'aide à la décision présenté au Chapitre 6 doit être utilisé pour déterminer ces variables. Pour pouvoir implanter la solution proposée à différents parcours, jours de la semaine ou heures de la journée, il est nécessaire de procéder à une expérimentation avec différents seuils de détection et limites de montées afin de choisir les variables les plus efficaces selon les scénarios. En analysant les feuilles de résultats obtenus comme présentées à la Figure 17, on peut prendre les décisions adéquates.

Au quotidien, on recommande d'implanter la solution en limitant les communications verbales avec les chauffeurs étant donné que plusieurs mesures peuvent être nécessaires pendant des périodes de

fort groupage d'autobus. Ainsi, un système d'alertes sonores ou visuelles pourrait être utilisé pour indiquer aux chauffeurs les mesures à prendre. Par exemple, un signal sonore pourrait être émis au moment où le chauffeur peut quitter l'arrêt après son immobilisation. On ne peut pas envisager devoir demander au chauffeur de s'immobiliser pour une période d'une durée bien précise et remettre en ses mains la responsabilité de savoir à quel moment il pourra quitter.

Chapitre 8

Conclusion

En bonne connaissance des causes et des conséquences du phénomène de groupage d'autobus sur le parcours 807 du RTC, il a été possible de tester diverses solutions dans différents contextes à l'aide d'un programme de simulation à événements discrets.

Bien que l'objectif principal était d'améliorer la régularité des intervalles séparant les autobus lors des passages aux arrêts, d'autres indicateurs de performance ont été ajoutés à la liste, tels que le nombre d'interventions nécessaires, le battement suggéré ainsi que le temps de parcours perçu par les passagers, afin d'assurer la performance du système de façon globale et d'offrir une expérience entièrement satisfaisante aux passagers.

Les résultats obtenus ont démontré que l'immobilisation était la solution offrant le meilleur potentiel lorsqu'appliquée seule, et ce pour tous les scénarios considérés. En ce qui concerne les solutions combinées, l'ajout d'une limite de montées à l'immobilisation a prouvé être très prometteur. Bien que cette solution fonctionne très bien pour tous les scénarios étudiés, il a été noté que les paramètres tels que le seuil de détection et la limite à appliquer doivent être adaptés à chacun des contextes. Ces contextes se distinguent selon leur direction, la période de la journée ou encore le jour de la semaine puisque ces éléments affectent entre autres l'achalandage ainsi que la densité de la circulation.

Selon les enjeux inhérents au RTC, l'organisme est désormais en mesure de tester et retenir une ou plusieurs des solutions d'implantation proposées. Les solutions proposées assurent pour les scénarios choisis une amélioration de la régularité des intervalles aux arrêts ainsi qu'une diminution ou un maintien des temps de parcours perçus par les passagers. De telles caractéristiques sont annonciatrices d'une augmentation de l'utilisation du transport en commun puisqu'elles participent à l'amélioration de l'expérience client. De plus, en stabilisant les temps de parcours des autobus, les temps tampons ajoutés aux horaires qui servent à pallier aux irrégularités seront réduits. Il en résulte une utilisation beaucoup plus efficiente des ressources à la disposition du RTC.

Bibliographie

Bus Turnaround Coalition (2017). *About*. Repéré à : <http://busturnaround.nyc/#23>

Communauté métropolitaine de Québec. (s.d). *Objectifs du PMAD en matière de mobilité durable*. Repéré à : <http://www.cmquebec.qc.ca/transport-mobilite/objectifs-pmad-en-matiere-mobilite-durable>

Daganzo, C. F. (2009). A headway-based approach to eliminate bus bunching: Systematic analysis and comparisons. *Transportation Research Part B: Methodological*, 43(10), 913-921.

Environnement et Changement climatique Canada. (2017). *Indicateurs canadiens de durabilité de l'environnement : Émissions de gaz à effet de serre*. Repéré à : <https://www.ec.gc.ca/indicateurs-indicators/default.asp?lang=fr&n=F60DB708-1>

Delgado, F., Muñoz, J., Giesen, R., et Cipriano, A. (2009). Real-time control of buses in a transit corridor based on vehicle holding and boarding limits. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, (2090), 59-67.

Delgado, F., Munoz, J. C., et Giesen, R. (2012). How much can holding and/or limiting boarding improve transit performance?. *Transportation Research Part B: Methodological*, 46(9), 1202-1217.

Estrada, M., Mensión, J., Aymamí, J. M., et Torres, L. (2016). Bus control strategies in corridors with signalized intersections. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 71, 500-520.

Feng, W., et Figliozzi, M. (2011). Empirical findings of bus bunching distributions and attributes using archived AVL/APC bus data. *ICCTP 2011: Towards Sustainable Transportation Systems*, 4330-4341.

Gouvernement du Québec. (2015a). *Les impacts des changements climatiques*. Repéré à : <https://www.faisonslepoureux.gouv.qc.ca/fr/les-changements-climatiques/les-impacts-des-changements-climatiques>

Gouvernement du Québec. (2015b). *Programmes s'adressant aux municipalités et aux organismes en transport*. Repéré à : <https://www.faisonslepoureux.gouv.qc.ca/fr/les-programmes/municipalites-et-organismes-en-transport>

He, S. X. (2015). An anti-bunching strategy to improve bus schedule and headway reliability by making use of the available accurate information. *Computers & Industrial Engineering*, 85, 17-32.

Hilkevitch, J. (2015). *CTA hopes new system reduces bus-bunching*. Repéré à : <http://www.chicagotribune.com/news/local/breaking/ct-cta-bus-delays-met-0512-20150511-story.html>

Les 500 au Québec : Le classement des plus importantes sociétés québécoises en 2017. (2017). Repéré à : <http://www.lesaffaires.com/classements/les-500/liste>

Luethi, M., Weidmann, U., et Nash, A. (2006). Passenger arrival rates at public transport stations. *86th Transportation Research Board Annual Meeting 2007*.

Luo, X., Liu, S., Jin, P.J., Jiang, X. et Ding, H. (2017). A connected-vehicle-based dynamic control model for managing the bus bunching problem with capacity constraints. *Transportation Planning and Technology*, 40(6), 722-740.

Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2015). *Québec adopte la cible de réduction de gaz à effet de serre la plus ambitieuse au Canada*. Repéré à : <http://www.mddelcc.gouv.qc.ca/infuseur/communiquer.asp?no=3353>

Moreira-Matias, L., Gama, J., Mendes-Moreira, J., et de Sousa, J. F. (2014). An incremental probabilistic model to predict bus bunching in real-time. *International Symposium on Intelligent Data Analysis*, 227-238.

Moreira-Matias, L., Cats, O., Gama, J., Mendes-Moreira, J., et de Sousa, J. F. (2016). An online learning approach to eliminate Bus Bunching in real-time. *Applied Soft Computing*, 47, 460-482.

Morin, A. (2017). *Changement d'approche au RTC : pas partout, mais plus vite*. Repéré à : <http://www.lapresse.ca/le-soleil/actualites/transports/201705/24/01-5101015-changement-dapproche-au-rtc-pas-partout-mais-plus-vite.php>

Muñoz, J. C., Cortés, C. E., Giesen, R., Sáez, D., Delgado, F., Valencia, F., et Cipriano, A. (2013). Comparison of dynamic control strategies for transit operations. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 28, 101-113.

Newell, G. F., et Potts, R. B. (1964). Maintaining a bus schedule. *Australian Road Research Board (ARRB) Conference*, 2(1).

Psarros, I., Kepaptsoglou, K., et Karlaftis, M. G. (2011). An empirical investigation of passenger wait time perceptions using hazard-based duration models. *Journal of Public Transportation*, 14(3), 6.

Réseau de Transport de la Capitale. (2017a). *Engagement qualité*. Repéré à : <http://www.rtcquebec.ca/Default.aspx?tabid=172>

Réseau de Transport de la Capitale. (2017b). *Rapport d'activité 2016*. Repéré à : http://www.rtcquebec.ca/Portals/0/Pages/A_Propos_Du_RTC/Publications/Doc/RA2016_LR_Clickable.pdf

Réseau de Transport de la Capitale. (2017c). *Parcours 807*. Repéré à : http://www.rtcquebec.ca/Portals/0/Admin/TraceParcours/TRACE_807_20170828.pdf?#zoom=75

Statistique Canada. (2006). *Population active occupée selon le mode de transport pour se rendre au travail, par région métropolitaine de recensement, Recensement de 2006 (Saguenay, Québec, Sherbrooke, Trois-Rivières, Montréal)*. Repéré à : <http://www.statcan.gc.ca/tables-tableaux/sum-som/102/cst01/labr88b-fra.htm>

Statistique Canada. (2016). *Le déplacement domicile-travail*. Repéré à : http://www12.statcan.gc.ca/nhs-enm/2011/as-sa/99-012-x/99-012-x2011003_1-fra.cfm

Statistique Canada. (2017). *Enquête nationale auprès des ménages de 2011 : Durée moyenne du trajet domicile-lieu de travail*. Repéré à : <http://www12.statcan.gc.ca/nhs-enm/2011/dp-pd/dt-td/Rp-fra.cfm?LANG=F&APATH=3&DETAIL=0&DIM=0&FL=A&FREE=0&GC=0&GID=0&GK=0&>

[GRP=0&PID=105619&PRID=0&PTYPE=105277&S=0&SHOWALL=1&SUB=0&Temporal=2013&THEME=96&VID=0&VNAMEE=&VNAMEF=](#)

Sun, A., et Hickman, M. (2005). The real-time stop-skipping problem. *Journal of Intelligent Transportation Systems*, 9(2), 91-109.

TransitCenter (2016). *Turnaround : Fixing New York City's buses*. Repéré à : http://transitcenter.org/wp-content/uploads/2016/07/Turnaround_Fixing-NYCs-Buses-20July2016.pdf

Université Laval. (2017). *Les étudiants*. Repéré à : <https://www.ulaval.ca/notre-universite/salle-de-presse/information-institutionnelle/quelques-chiffres.html>

Victoria Transport Policy Institute (2017). *Transportation Cost and Benefit Analysis II – Travel Time Costs*. Repéré à : <http://www.vtpi.org/tca/tca0502.pdf>

Wu, W., Liu, R., et Jin, W. (2017). Modelling bus bunching and holding control with vehicle overtaking and distributed passenger boarding behaviour. *Transportation Research Part B: Methodological*, 104, 175-197.

WWF-Canada. (2012). *Road transportation emissions reduction strategies: WWF climate change and energy program*. Repéré à : http://awsassets.wwf.ca/downloads/road_transportation_emissions_reduction_strategies_2012.pdf

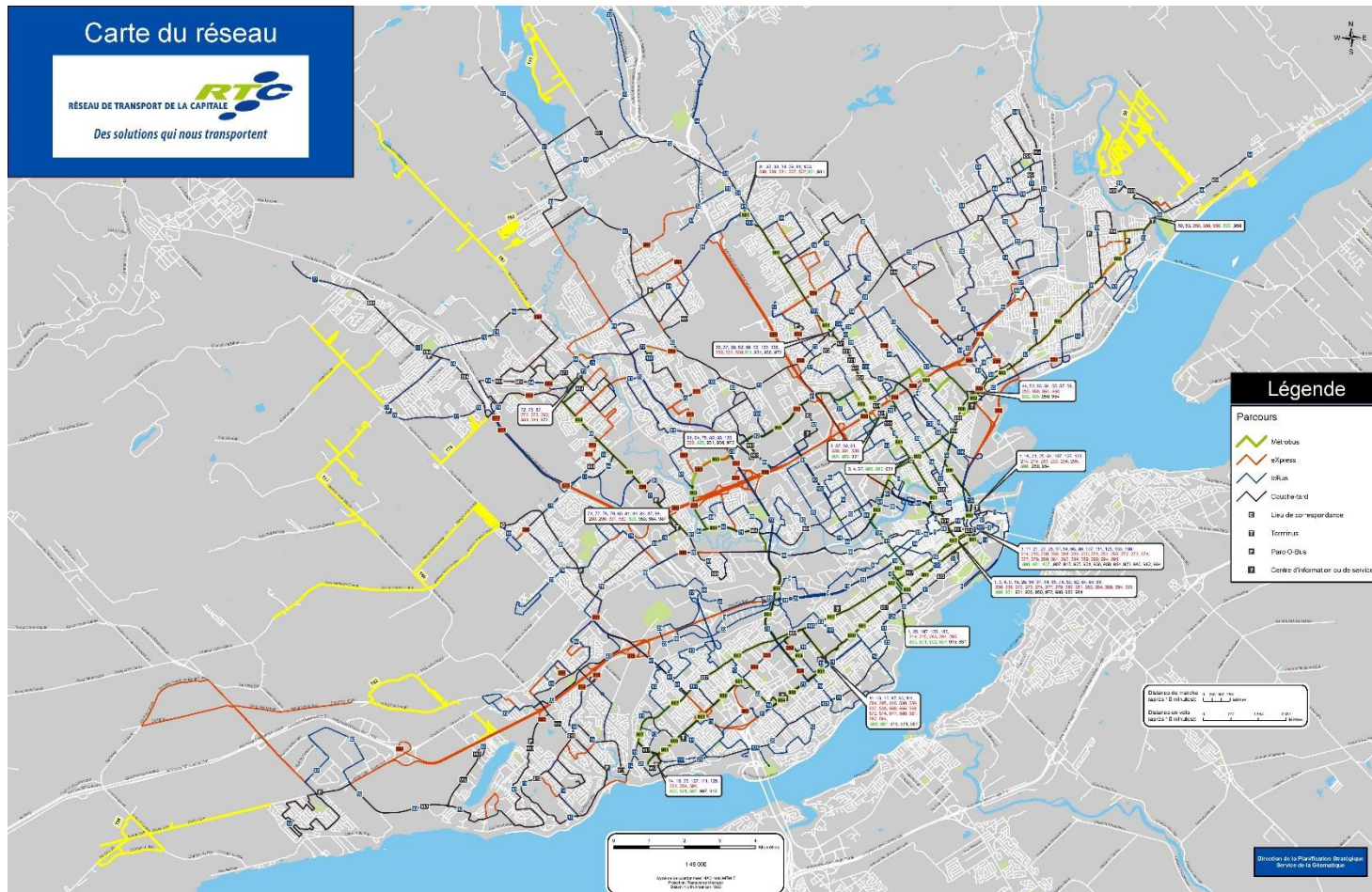
Xuan, Y., Argote, J., et Daganzo, C. F. (2011). Dynamic bus holding strategies for schedule reliability: Optimal linear control and performance analysis. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(10), 1831-1845.

Yu, B., Yao, J. B., et Yang, Z. Z. (2010). An improved headway-based holding strategy for bus transit. *Transportation planning and technology*, 33(3), 329-341.

Yu, H., Chen, D., Wu, Z., Ma, X., et Wang, Y. (2016). Headway-based bus bunching prediction using transit smart card data. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 72, 45-59.

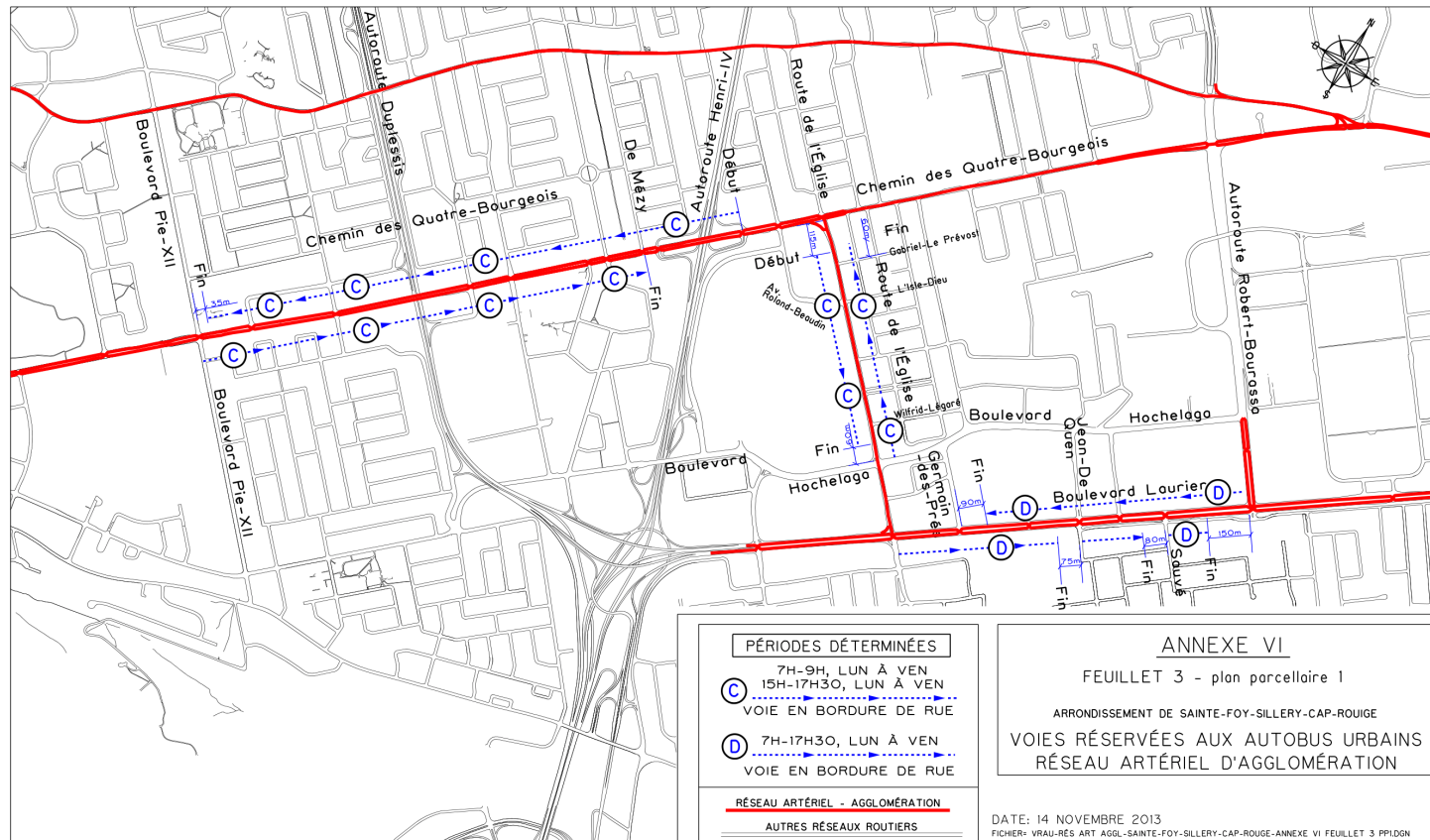
Annexe 1

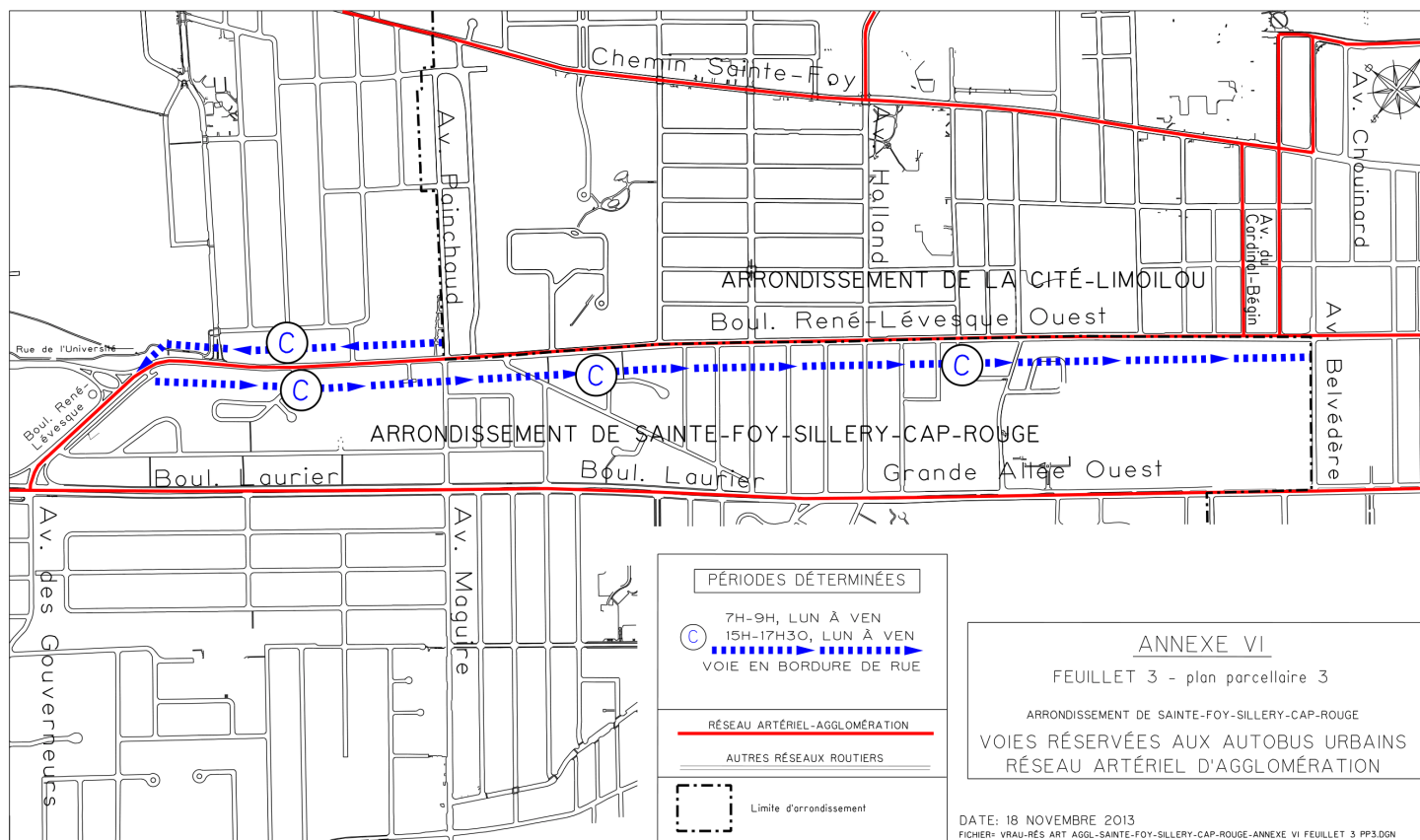
Tracés des parcours offerts par le RTC



Annexe 2

Réseau de voies réservées pour l'arrondissement Sainte-Foy-Sillery-Cap-Rouge





Annexe 3

Table de données pour l'évaluation des temps de déplacement par scénario

	Est – pointe du matin			Est – pointe du soir			Ouest – hors pointe		
Arrêt t	$TD_{10,t}$	$TD_{90,t}$	Nombre de feux avant l'arrêt t	$TD_{10,t}$	$TD_{90,t}$	Nombre de feux avant l'arrêt t	$TD_{10,t}$	$TD_{90,t}$	Nombre de feux avant l'arrêt t
2	83	154	0	79	123	0	38	147	0
3	43	84	2	44	115	2	17	31	0
4	10	22	0	9	21	0	38	57	0
5	19	54	1	19	57	1	42	63	0
6	19	33	1	16	31	1	35	51	0
7	15	47	0	13	44	0	50	133	2
8	25	77	1	23	75	1	15	83	2
9	35	81	2	34	87	2	20	71	1
10	24	41	1	23	45	1	18	41	2
11	30	88	2	34	113	2	13	44	2
12	38	91	3	39	116	3	11	43	2
13	40	54	0	39	53	0	41	139	1
14	38	72	1	36	73	1	28	60	2
15	47	126	2	45	123	2	33	79	2
16	30	85	1	25	96	1	35	111	1
17	30	89	1	31	84	1	25	46	2
18	27	66	1	27	64	1	37	82	2
19	33	82	1	30	112	1	7	53	1
20	48	108	2	76	130	2	38	123	3

21	33	115	1	24	111	1	55	146	1
22	40	123	1	34	104	1	42	93	0
23	22	51	2	21	47	2	53	140	2
24	37	76	0	30	71	0	31	57	1
25	35	143	1	38	130	1	76	139	1
26	22	92	3	21	98	3	36	70	2
27	14	49	1	14	56	1	29	65	1
28	37	82	2	40	88	2	24	59	1
29	43	167	2	58	229	2	44	100	1
30	18	55	1	15	59	1	39	114	1
31	39	76	2	37	57	2	33	82	2
32	25	47	2	25	44	2	43	77	1
33	22	104	1	5	84	1	24	80	0
34	24	102	2	23	75	2	24	82	3
35	21	63	2	21	60	2	22	43	2
36	39	86	2	43	107	2	37	75	1
37	23	103	1	31	129	1	23	62	2
38	29	95	2	30	94	2	23	39	1
39	41	155	2	41	179	2	15	27	0
40	34	89	3	31	79	3	17	40	1
41	46	91	1	46	80	1	11	20	1
42	38	199	1	40	298	1	16	75	0
43							25	50	2
44							48	72	0

Annexe 4

Table de probabilités cumulées de descente par scénario

Est – pointe du matin

Arrêt de descente	Arrêt de montée																			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00

19	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,03	0,03	0,03	0,00	0,00
20	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,13	0,13	0,12	0,10	0,00
21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20	0,19	0,17	0,17	0,17	0,14	0,05
22	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24	0,23	0,23	0,22	0,22	0,22	0,20	0,20	0,19	0,17	0,08
23	0,26	0,26	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,24	0,24	0,24	0,23	0,22	0,21	0,21	0,19	0,10
24	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,26	0,26	0,26	0,25	0,24	0,24	0,23	0,21	0,12
25	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32	0,32	0,30	0,30	0,30	0,28	0,20
26	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,38	0,38	0,38	0,38	0,37	0,37	0,36	0,36	0,35	0,33	0,26
27	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	0,40	0,40	0,40	0,40	0,38	0,38	0,38	0,36	0,29
28	0,43	0,43	0,43	0,43	0,43	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,41	0,41	0,41	0,40	0,39	0,39	0,37	0,31
29	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	0,43	0,43	0,43	0,43	0,42	0,41	0,41	0,41	0,39	0,32
30	0,47	0,47	0,47	0,47	0,47	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	0,45	0,45	0,45	0,44	0,44	0,43	0,42	0,35
31	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,51	0,51	0,51	0,50	0,50	0,49	0,48	0,42
32	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,54	0,53	0,53	0,52	0,52	0,52	0,50	0,45
33	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,64	0,64	0,64	0,63	0,58
34	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,65	0,65	0,65	0,64	0,63	0,59
35	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,66	0,66	0,66	0,65	0,61
36	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,67	0,67	0,67	0,66	0,66	0,66	0,65	0,62
37	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72	0,71	0,71	0,71	0,70	0,67
38	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,76	0,76	0,73
39	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,79	0,78	0,76
40	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,84	0,83
41	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92
42	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

[illegible]

27	0,25	0,23	0,21	0,19	0,11	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28	0,27	0,24	0,23	0,21	0,13	0,06	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29	0,29	0,26	0,25	0,23	0,15	0,08	0,05	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,32	0,30	0,28	0,26	0,19	0,13	0,09	0,07	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31	0,39	0,37	0,36	0,34	0,28	0,22	0,19	0,17	0,15	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32	0,42	0,40	0,39	0,37	0,31	0,25	0,22	0,21	0,19	0,15	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
33	0,56	0,55	0,54	0,53	0,48	0,44	0,41	0,40	0,39	0,36	0,28	0,24	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
34	0,57	0,56	0,55	0,54	0,49	0,45	0,43	0,42	0,40	0,37	0,30	0,26	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
35	0,59	0,57	0,56	0,55	0,51	0,47	0,45	0,44	0,42	0,39	0,32	0,29	0,06	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
36	0,59	0,58	0,57	0,56	0,52	0,48	0,46	0,45	0,43	0,40	0,33	0,30	0,07	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
37	0,65	0,64	0,63	0,62	0,58	0,55	0,53	0,52	0,51	0,48	0,42	0,39	0,20	0,18	0,15	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
38	0,72	0,71	0,70	0,69	0,66	0,64	0,62	0,61	0,60	0,58	0,53	0,51	0,35	0,34	0,31	0,30	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
39	0,75	0,74	0,74	0,73	0,70	0,68	0,66	0,66	0,65	0,63	0,59	0,57	0,43	0,41	0,39	0,38	0,28	0,11	0,00	0,00	0,00
40	0,82	0,81	0,81	0,80	0,78	0,76	0,75	0,75	0,74	0,73	0,70	0,68	0,58	0,57	0,55	0,55	0,48	0,35	0,27	0,00	0,00
41	0,92	0,91	0,91	0,91	0,90	0,89	0,89	0,88	0,88	0,88	0,86	0,85	0,81	0,80	0,79	0,79	0,76	0,70	0,66	0,54	0,00
42	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Est – pointe du soir

	Arrêt de montée																			
Arrêt de descente	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

7	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,05	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,03	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,09	0,09	0,09	0,08	0,08	0,07	0,06	0,06	0,05	0,04	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,10	0,10	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,05	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,11	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,09	0,08	0,07	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,13	0,13	0,12	0,12	0,12	0,11	0,10	0,09	0,08	0,08	0,05	0,04	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,14	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,07	0,06	0,05	0,03	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,15	0,15	0,15	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,17	0,16	0,16	0,16	0,15	0,15	0,14	0,13	0,12	0,12	0,09	0,08	0,07	0,06	0,04	0,03	0,01	0,00	0,00	0,00
19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,18	0,17	0,17	0,16	0,15	0,14	0,12	0,11	0,10	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,00	0,00
20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20	0,19	0,18	0,17	0,17	0,15	0,13	0,13	0,11	0,10	0,08	0,07	0,06	0,03	0,00
21	0,27	0,27	0,27	0,27	0,26	0,26	0,25	0,25	0,24	0,23	0,21	0,20	0,19	0,18	0,17	0,15	0,14	0,13	0,10	0,08
22	0,29	0,29	0,29	0,29	0,28	0,28	0,27	0,27	0,26	0,25	0,23	0,22	0,21	0,20	0,19	0,18	0,16	0,15	0,13	0,10
23	0,31	0,31	0,30	0,30	0,30	0,30	0,29	0,28	0,27	0,27	0,25	0,24	0,23	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17	0,15	0,12
24	0,35	0,35	0,35	0,35	0,34	0,34	0,33	0,33	0,32	0,32	0,30	0,29	0,28	0,27	0,26	0,25	0,24	0,22	0,20	0,18
25	0,39	0,39	0,38	0,38	0,38	0,38	0,37	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29	0,28	0,27	0,25	0,22
26	0,41	0,41	0,41	0,41	0,40	0,40	0,39	0,39	0,38	0,38	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,31	0,30	0,29	0,27	0,25
27	0,43	0,43	0,43	0,43	0,42	0,42	0,41	0,41	0,40	0,40	0,38	0,37	0,37	0,36	0,35	0,34	0,33	0,32	0,30	0,28
28	0,47	0,47	0,47	0,47	0,46	0,46	0,45	0,45	0,44	0,44	0,42	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37	0,36	0,35	0,32
29	0,49	0,49	0,48	0,48	0,48	0,48	0,47	0,47	0,46	0,46	0,44	0,43	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39	0,38	0,37	0,35
30	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,49	0,49	0,48	0,48	0,47	0,46	0,45	0,45	0,44	0,43	0,42	0,41	0,40	0,39	0,37
31	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,51	0,51	0,50	0,50	0,48	0,48	0,47	0,46	0,45	0,45	0,44	0,43	0,41	0,40
32	0,55	0,55	0,54	0,54	0,54	0,54	0,53	0,53	0,52	0,52	0,51	0,50	0,50	0,49	0,48	0,47	0,46	0,46	0,44	0,42
33	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,62	0,62	0,62	0,61	0,60	0,60	0,59	0,59	0,58	0,57	0,57	0,56	0,55	0,54
34	0,65	0,65	0,65	0,65	0,64	0,64	0,64	0,64	0,63	0,63	0,62	0,61	0,61	0,60	0,60	0,59	0,58	0,58	0,57	0,55

35	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,66	0,66	0,66	0,65	0,65	0,64	0,64	0,63	0,63	0,62	0,62	0,61	0,61	0,59	0,58
36	0,70	0,70	0,70	0,70	0,70	0,69	0,69	0,69	0,68	0,68	0,67	0,67	0,67	0,66	0,66	0,65	0,65	0,64	0,63	0,62
37	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,72	0,72	0,72	0,72	0,71	0,71	0,70	0,70	0,70	0,69	0,69	0,68	0,68	0,67	0,66
38	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,77	0,76	0,76	0,76	0,76	0,75	0,75	0,74	0,74	0,73	0,72
39	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,82	0,82	0,82	0,82	0,82	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,79	0,79	0,78
40	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,88	0,87	0,87	0,87	0,87	0,87	0,86	0,86	0,86	0,86	0,85
41	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92
42	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

	Arrêt de montée																				
Arrêt de descente	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
21	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
22	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
23	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
24	0,11	0,09	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
25	0,16	0,14	0,12	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
26	0,19	0,17	0,15	0,09	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
27	0,22	0,20	0,18	0,12	0,07	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
28	0,27	0,25	0,23	0,18	0,13	0,10	0,07	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
29	0,29	0,27	0,26	0,21	0,16	0,13	0,10	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
30	0,32	0,30	0,28	0,23	0,19	0,16	0,13	0,06	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
31	0,35	0,33	0,31	0,26	0,22	0,19	0,16	0,10	0,07	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
32	0,38	0,36	0,34	0,30	0,26	0,23	0,20	0,15	0,12	0,09	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
33	0,50	0,48	0,47	0,44	0,40	0,38	0,36	0,31	0,29	0,27	0,23	0,19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
34	0,52	0,50	0,49	0,46	0,43	0,41	0,38	0,34	0,32	0,29	0,26	0,23	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
35	0,55	0,54	0,52	0,49	0,46	0,44	0,42	0,38	0,36	0,34	0,31	0,27	0,10	0,06	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
36	0,59	0,58	0,57	0,54	0,51	0,49	0,47	0,43	0,42	0,40	0,37	0,34	0,18	0,15	0,09	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
37	0,63	0,62	0,61	0,58	0,56	0,54	0,53	0,49	0,47	0,46	0,43	0,40	0,26	0,23	0,18	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
38	0,70	0,69	0,69	0,66	0,65	0,63	0,62	0,59	0,58	0,56	0,54	0,52	0,41	0,38	0,34	0,28	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00
39	0,76	0,76	0,75	0,73	0,72	0,71	0,70	0,68	0,66	0,65	0,64	0,62	0,53	0,51	0,48	0,43	0,36	0,21	0,00	0,00	0,00
40	0,84	0,84	0,83	0,82	0,81	0,80	0,80	0,78	0,77	0,77	0,75	0,74	0,68	0,67	0,65	0,61	0,57	0,46	0,32	0,00	0,00
41	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90	0,89	0,88	0,88	0,88	0,87	0,84	0,83	0,82	0,80	0,78	0,73	0,65	0,49	0,00
42	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Ouest – hors pointe

Arrêt de descente	Arrêt de montée																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
4	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
5	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
6	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
7	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
9	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
10	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
11	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
12	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
13	0,08	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,05	0,05	0,05	0,04	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,14	0,13	0,13	0,13	0,13	0,13	0,12	0,11	0,11	0,11	0,10	0,10	0,06	0,05	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,16	0,15	0,14	0,14	0,14	0,13	0,13	0,09	0,08	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,18	0,18	0,17	0,17	0,17	0,16	0,16	0,13	0,11	0,07	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
18	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,15	0,14	0,10	0,07	0,03	0,00	0,00	0,00	0,00
19	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,27	0,26	0,26	0,25	0,25	0,25	0,25	0,22	0,20	0,16	0,14	0,10	0,07	0,00	0,00	0,00
20	0,30	0,30	0,30	0,30	0,29	0,29	0,28	0,28	0,28	0,28	0,27	0,27	0,24	0,23	0,19	0,16	0,13	0,10	0,03	0,00	0,00
21	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33	0,32	0,32	0,31	0,31	0,31	0,31	0,28	0,27	0,23	0,20	0,17	0,15	0,08	0,05	0,00
22	0,42	0,42	0,42	0,42	0,42	0,41	0,41	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,37	0,36	0,33	0,31	0,28	0,26	0,20	0,17	0,13
23	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,53	0,52	0,52	0,52	0,52	0,51	0,50	0,49	0,46	0,44	0,42	0,40	0,36	0,34	0,30

24	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,60	0,60	0,60	0,60	0,60	0,58	0,57	0,55	0,54	0,52	0,50	0,46	0,45	0,42
25	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,64	0,64	0,64	0,64	0,64	0,63	0,62	0,61	0,59	0,58	0,57	0,55	0,52	0,50	0,47
26	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,63	0,63	0,61	0,60	0,58	0,57	0,53	0,52	0,49
27	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67	0,66	0,66	0,66	0,66	0,66	0,65	0,64	0,62	0,61	0,59	0,58	0,55	0,53	0,51
28	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,73	0,72	0,72	0,72	0,71	0,71	0,69	0,68	0,67	0,66	0,63	0,62	0,60
29	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,76	0,75	0,74	0,74	0,73	0,72	0,71	0,70	0,67	0,66	0,65
30	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,79	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,77	0,77	0,76	0,75	0,74	0,73	0,71	0,70	0,68
31	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,81	0,80	0,80	0,80	0,80	0,79	0,78	0,77	0,77	0,76	0,74	0,73	0,72
32	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,84	0,83	0,83	0,83	0,83	0,83	0,82	0,81	0,81	0,80	0,79	0,78	0,77	0,76
33	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,89	0,89	0,89	0,88	0,88	0,87	0,87	0,86	0,86	0,85
34	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,90	0,89	0,89	0,88	0,88	0,87
35	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89	0,88
36	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,93	0,92	0,92	0,92	0,92	0,91	0,91	0,90	0,90	0,89
37	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93
38	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,95	0,95	0,95
39	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96	0,96
40	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,96
41	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97	0,97
42	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98
43	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
44	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

	Arrêt de montée																					
Arrêt de descente	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43
1	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

32	0,72	0,65	0,58	0,54	0,52	0,51	0,40	0,32	0,24	0,15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
33	0,83	0,78	0,74	0,71	0,70	0,69	0,62	0,57	0,52	0,47	0,37	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
34	0,84	0,81	0,77	0,74	0,73	0,72	0,66	0,62	0,57	0,52	0,44	0,11	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
35	0,86	0,83	0,80	0,78	0,77	0,76	0,71	0,67	0,63	0,59	0,51	0,22	0,13	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
36	0,88	0,85	0,82	0,80	0,79	0,78	0,73	0,70	0,66	0,62	0,56	0,30	0,21	0,10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
37	0,92	0,91	0,89	0,87	0,87	0,87	0,83	0,81	0,79	0,77	0,73	0,56	0,51	0,44	0,38	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
38	0,94	0,93	0,91	0,90	0,90	0,89	0,87	0,85	0,84	0,82	0,79	0,66	0,62	0,56	0,52	0,22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
39	0,95	0,94	0,93	0,92	0,92	0,92	0,90	0,88	0,87	0,85	0,83	0,73	0,69	0,65	0,61	0,37	0,20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
40	0,96	0,95	0,93	0,93	0,92	0,92	0,90	0,89	0,88	0,87	0,84	0,75	0,72	0,68	0,64	0,42	0,26	0,08	0,00	0,00	0,00	0,00
41	0,96	0,95	0,94	0,94	0,94	0,93	0,92	0,91	0,90	0,89	0,87	0,79	0,76	0,72	0,70	0,51	0,37	0,22	0,15	0,00	0,00	0,00
42	0,98	0,97	0,97	0,97	0,96	0,96	0,95	0,95	0,94	0,94	0,93	0,88	0,87	0,85	0,83	0,73	0,65	0,56	0,53	0,44	0,00	0,00
43	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98	0,98	0,98	0,97	0,95	0,95	0,94	0,93	0,90	0,87	0,83	0,82	0,79	0,62	0,00
44	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Annexe 5

Table de probabilités cumulées des montées par scénario

<https://1drv.ms/x/s!AgBeMKmJSyhYgYFt-wPstR89sZiQ9g>

Annexe 6

Résultats de référence

Est – pointe du matin

Outil d'aide à la décision

Paramètres de simulation		Solution(s) implantée(s)	
Nombre de répliques	15	Saut d'arrêts	
Nombre d'autobus	10	Limite de capacité	Limite du nombre de montées (si applicable)
Nombre d'arrêts	42	Immobilisation	
Intervalle (en secondes)	600	Feux de priorité	
Seuil de détection des événements (en secondes)	30		
Nombre d'événements détectés en moyenne/réplique	156		
Scénario	1		
Nombre de mesures appliquées en moyenne/réplique	0		
Charge à bord		Temps de parcours perçu par le passager	
Maximum	59	Moyenne des temps de parcours (en secondes)	1392
Moyenne	16	Moyenne des temps de voyage (en secondes)	1068
		Moyenne de temps supplémentaire (en secondes)	0
Temps de parcours			
Écart-type (en secondes)	186		
Battement suggéré (en secondes)	309		
Mesures d'irrégularité			
	Arrêts	Moyenne	
	1	0%	
	2	5%	
	3	6%	
	4	6%	
	5	6%	
	6	6%	
	7	7%	
	8	8%	
	9	8%	
	10	8%	
	11	10%	
	12	11%	
	13	11%	
	14	11%	
	15	13%	
	16	13%	
	17	14%	
	18	14%	
	19	15%	
	20	15%	
	21	17%	
	22	18%	
	23	18%	
	24	19%	
	25	20%	
	26	22%	
	27	22%	
	28	23%	
	29	24%	
	30	25%	
	31	25%	
	32	25%	
	33	26%	
	34	28%	
	35	28%	
	36	28%	
	37	28%	
	38	29%	
	39	30%	
	40	31%	
	41	33%	
	42	33%	

Est – pointe du soir

Outil d'aide à la décision

Paramètres de simulation

Nombre de répliques	15
Nombre d'autobus	10
Nombre d'arrêts	42
Intervalle (en secondes)	600

Seuil de détection des événements (en secondes)	30
Nombre d'événements détectés en moyenne/réplique	144
Scénario	2
Nombre de mesures appliquées en moyenne/réplique	0

Charge à bord

Maximum	61
Moyenne	15

Temps de parcours

Écart-type (en secondes)	186
Battement suggéré (en secondes)	286

Mesures d'irrégularité

Arrêts	Moyenne
1	0%
2	4%
3	5%
4	6%
5	6%
6	6%
7	7%
8	8%
9	8%
10	9%
11	9%
12	10%
13	10%
14	11%
15	11%
16	12%
17	13%
18	14%
19	15%
20	16%
21	16%
22	17%
23	18%
24	18%
25	19%
26	19%
27	21%
28	21%
29	23%
30	24%
31	24%
32	25%
33	25%
34	26%
35	27%
36	27%
37	28%
38	29%
39	30%
40	31%
41	32%
42	34%

Solution(s) implantée(s)

Saut d'arrêts	
Limite de capacité	Limite du nombre de montées (si applicable)
Immobilisation	
Feux de priorité	

Temps de parcours perçu par le passager

Moyenne des temps de parcours (en secondes)	1402
Moyenne des temps de voyage (en secondes)	1075
Moyenne de temps supplémentaire (en secondes)	0

Ouest – hors pointe

Outil d'aide à la décision

Paramètres de simulation		Solution(s) implantée(s)	
Nombre de réplifications	15	Saut d'arrêts	
Nombre d'autobus	10	Limite de capacité	Limite du nombre de montées (si applicable)
Nombre d'arrêts	44	Immobilisation	
Intervalle (en secondes)	600	Feux de priorité	
Seuil de détection des événements (en secondes)	30		
Nombre d'événements détectés en moyenne/réplication	150		
Scénario	3		
Nombre de mesures appliquées en moyenne/réplication	0		
Charge à bord		Temps de parcours perçu par le passager	
Maximum	42	Moyenne des temps de parcours (en secondes)	1155
Moyenne	7	Moyenne des temps de voyage (en secondes)	823
		Moyenne de temps supplémentaire (en secondes)	0
Temps de parcours			
Écart-type (en secondes)	145		
Battement suggéré (en secondes)	272		
Mesures d'irrégularité			
	Arrêts	Moyenne	
	1	0%	
	2	5%	
	3	6%	
	4	6%	
	5	6%	
	6	6%	
	7	8%	
	8	10%	
	9	10%	
	10	10%	
	11	11%	
	12	11%	
	13	13%	
	14	14%	
	15	14%	
	16	14%	
	17	15%	
	18	15%	
	19	15%	
	20	16%	
	21	18%	
	22	19%	
	23	20%	
	24	21%	
	25	21%	
	26	22%	
	27	22%	
	28	23%	
	29	23%	
	30	24%	
	31	25%	
	32	25%	
	33	25%	
	34	26%	
	35	26%	
	36	26%	
	37	26%	
	38	27%	
	39	27%	
	40	27%	
	41	27%	
	42	28%	
	43	28%	
	44	28%	