

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE
PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA
MAÎTRISE EN GÉNIE
CONCENTRATION EN GÉNIE DE L'ENVIRONNEMENT
M. Ing.

PAR
Mélina MAIORANO

APPROCHE BIOMIMÉTIQUE DANS LA CONCEPTION D'UN RÉSEAU DE
TRANSPORT : APPLICATION À UN SYSTÈME DE TRANSPORT CYBERNÉTIQUE

MONTRÉAL, LE 16 OCTOBRE 2013

©Tous droits réservés, Mélina Maiorano, 2013

©Tous droits réservés

Cette licence signifie qu'il est interdit de reproduire, d'enregistrer ou de diffuser en tout ou en partie, le présent document. Le lecteur qui désire imprimer ou conserver sur un autre media une partie importante de ce document, doit obligatoirement en demander l'autorisation à l'auteur.

PRÉSENTATION DU JURY
CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ
PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Mathias Glaus, directeur de mémoire
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Michel Baraër, président du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

M. Robert Hausler, membre du jury
Département de génie de la construction à l'École de technologie supérieure

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 19 SEPTEMBRE 2013

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je veux remercier le directeur de ce mémoire, Monsieur Mathias Glaus qui m'a guidé et soutenu à travers ce processus de création laborieux. Je tiens à remercier également le directeur du programme de Génie de l'environnement, Monsieur Robert Hausler pour ses commentaires constructifs et ses encouragements. De par leur expertise et leur implication, ils ont participé au développement de mon travail de manière inestimable. Mes connaissances concernant les dynamiques des systèmes urbains, leurs enjeux et les multiples possibilités pouvant contribuer à l'amélioration de la qualité de l'environnement sont maintenant approfondies et acquises.

Merci à tous les membres de la STEPPE qui m'ont également soutenue durant les expériences en laboratoire et tout au long de mon projet.

Je tiens à remercier ma famille et mes amis qui m'ont offert un soutien moral à toute épreuve.

APPROCHE BIOMIMÉTIQUE DANS LA CONCEPTION D'UN RÉSEAU DE TRANSPORT : APPLICATION À UN SYSTÈME DE TRANSPORT CYBERNÉTIQUE

Mélina MAIORANO

RÉSUMÉ

Dans les noyaux urbains denses, le volume élevé de l'activité humaine et la forte demande en mobilité induite par l'attractivité des centres créent un achalandage accru. L'utilisation dominante des véhicules privés en zone dense comme le centre-ville causent congestion, pollution et dégradation de la qualité de l'environnement urbain. L'implantation d'un système de transport rapide personnalisé (TRP) afin de répondre aux déplacements multiples et réduire l'utilisation de l'automobile est essentiel au développement des centres urbains. Afin d'assurer le succès et la mise en place d'un tel système de transport, le réseau sur lequel il se campe doit présenter une forte résilience afin de permettre la desserte de la zone malgré les fractures aléatoires, et ce, pour un coût avantageux par rapport à la distance totale de la configuration. La présente recherche se base sur l'organisme *Physarum polycephalum* (P.p.) afin d'obtenir différentes configurations efficaces. Cet organisme est une moisissure visqueuse qui produit des liens entre différentes sources de nourritures trouvées sur un substrat de manière à former un réseau.

La zone à l'étude est située au centre-ville de Montréal, couvre une aire de 2,8 km² et est composée de 12 nœuds. Les lieux à desservir sont identifiés par rapport à l'intensité de l'activité économique, sociale et culturelle où le volume de déplacements est important. La carte produite est mise à l'échelle pour ensuite être transposée aux modèles utilisés. Les expériences en laboratoire et itérations effectuées à partir du modèle biologique et du modèle informatique respectivement, nous donnent une solution optimale pour la configuration d'un réseau avec les caractéristiques suivantes : faible degré de séparation, haute résilience, faible coût par rapport à la distance totale.

Les résultats démontrent que plus de 50% du total des échanges possibles sont maintenus lorsque 85% des nœuds du réseau expérimental d'inspiration biologique sont déconnectés, alors que moins de 20% des échanges totaux sont conservés pour les autres solutions communes d'optimisation combinatoire. Cette solution, inspirée du modèle biologique, est utilisée comme guide de référence pour la conception de réseau de TRP afin d'assurer un degré élevé d'efficacité et de robustesse.

Mots clés : biomimétisme, réseau de transport, TRP, résilience, transport urbain

BIOMIMETIC APPROACH TO URBAIN PERSONAL RAPID TRANSIT (PRT) NETWORK DESIGN

Mélina MAIORANO

ABSTRACT

In the dense urban core, high volumes of human activity and variable transits yield the need for an efficient personal rapid transportation (PRT) network. Efficient network performance involves a trade-off between cost, transport efficiency, and fault tolerance. Biological networks have developed a high degree of efficiency through evolutionary cycles and may suggest an acceptable solution to this combinatorial optimization problem. We draw inspiration from *Physarum polycephalum* (*P.p.*) slime mold, which naturally produces networks with low average node separation, low average degree of separation and high resiliency. Necessary nodes in our urban transportation network are identified where high volumes of human transits occur within our predefined boundaries.

Such areas may consider academic and civic institutions, existing public transit hubs and commercial districts. This high activity downtown area of 2,8 km², consisting of 12 exchange nodes, is scaled for use in laboratory testing with the *Physarum polycephalum*. Repeated experiments with the slime mold yield a solution to the network with the aforementioned characteristics. The solution's average degree of separation, node separation and fault tolerance are analyzed and compared to those of other common combinatorial optimization solutions known as the Steiner minimal tree and the minimal spanning tree. Additionally, the solution is compared to a mathematical model of the *P. polycephalum* simulated in the CompuCell3D cellular potts environment.

The results demonstrate that over 50% of the total possible exchanges are maintained when 85% of the nodes of the biologically inspired experimental network are disconnected, while less than 20% of the total exchanges are preserved for the other common combinatorial optimization solutions. This biologically inspired network solution is used as a reference guide for the design and layout of paths and connections for the personal rapid transportation network to ensure a high degree of efficiency and robustness.

Keyword: biomimetic, transportation network, PRT, network optimization, urban transport

TABLE DES MATIÈRES

Page

INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 ÉTAT DES CONNAISSANCES	3
1.1 Le milieu urbain	3
1.1.1 L'évolution de la ville et de son organisation	3
1.1.2 La mobilité selon l'échelle, les types et les modes de déplacement	5
1.1.3 Les limites de la mobilité moderne	10
1.2 Les stratégies d'intervention et caractéristiques des réseaux de TC	16
1.2.1 Les stratégies dissuasives à l'égard de la voiture	16
1.2.2 Caractéristiques d'un réseau transport en commun performant ...	20
1.2.3 Les transports émergents	22
1.3 Approche biomimétique et modèles utilisés	27
1.3.1 Réflexion biomimétique et introduction aux myxomycètes	27
1.3.2 <i>Physarum polycephalum</i>	30
1.3.3 Modèle informatique	33
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE	
2.1 Sélection des lieux à desservir pour la zone à l'étude	37
2.2 Méthode appliquée selon le modèle utilisé	38
2.2.1 Modèle biologique	39
2.2.2 Modèle informatique	40
2.3 Outils d'analyse	41
2.3.1 Sélection des réseaux et critères de validité	42
2.3.2 Algorithmes utilisés lors de l'analyse graphique	42
2.3.3 Caractéristiques graphiques et indicateurs de performance	44
CHAPITRE 3 RÉSULTATS	
3.1 Présentation des configurations des réseaux	47
3.1.1 Configuration des réseaux obtenus à l'aide du modèle biologique	47
3.1.2 Réseaux obtenus à l'aide des simulations informatiques et l'AMS	49
3.1.3 Analyse des caractéristiques graphiques	50
3.2 Comparaison des résultats selon les indicateurs de performances	51
3.2.1 Étude des réseaux selon les qualités graphiques	51
3.3 Étude des indicateurs de performance et évaluation de la performance	55
3.3.1 Trajets totaux potentiels, résilience et coût	56
3.3.2 Évaluation de la performance des configurations	61

CHAPITRE 4	DISCUSSION	
4.1	Études de cas	63
4.1.1	Adaptation du modèle à la situation urbaine	64
4.1.2	Étude du réseau selon les indicateurs de performance	65
4.2	Applications du modèle en milieu urbain	67
4.3	Les perspectives	69
4.3.1	Outil de référence et d'aide à la décision	69
4.3.2	Évaluation de la performance du réseau en situation d'utilisation.....	70
CONCLUSION		75
Références bibliographiques		78

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1.1	Externalités négatives de l'utilisation accrue de l'automobile.....14
Tableau 1.2	Les stratégies et politiques dissuasives contre l'automobile17
Tableau 1.3	Les types de transport à guidage automatisé.....23
Tableau 1.4	Les étapes de la réflexion biomimétique28
Tableau 3.1	Résultats obtenus pour toutes les configurations retenues.....51
Tableau 3.2	Valeurs moyennes des caractéristiques graphiques des configurations.....52
Tableau 3.3	Ratio de la distance totale et distance moyenne par rapport au nombre de boucle54
Tableau 3.4	Moyenne des résultats pour les indicateurs de performance56
Tableau 3.5	Analyse multicritère selon les propriétés étudiées.....62
Tableau 4.1	Caractéristiques graphiques et indicateurs de performance.....65
Tableau 4.2	Pointage lié au classement des indicateurs de performances.....66

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Densité d'emploi dans l'arrondissement.....8
Figure 1.2	Part modale selon le type de transport9
Figure 1.3	Vitesse moyenne maximale selon l'écart entre les arrêts pour différents type de transport en commun.....12
Figure 1.4	Vitesse moyenne selon l'utilisation.....12
Figure 1.5	Stratégie de tarification dans les zones de trafic limité.....18
Figure 1.6	Solution pour l'ensemble de points ABC selon l'AMS21
Figure 1.7	Cycle de vie de <i>Physarum polycephalum</i>30
Figure 2.1	Points attracteurs présents dans la zone à l'étude.....38
Figure 3.1	a) à g) Configurations des réseaux obtenus à l'aide du modèle biologique ...48
Figure 3.2	a) à f) Configurations issues du modèle informatique et g) l'AMS.....49
Figure 3.3	Distance totale selon le nombre de boucle pour tous les modèles.....53
Figure 3.4	Trajets totaux potentiels selon le nombre de boucle pour toutes les configurations excluant l'AMS57
Figure 3.5	Trajets totaux potentiels restants en fonction du nombre58
Figure 3.6	Résilience selon le nombre de boucle pour tous les modèles59
Figure 4.1	a) Réseau P.p.5 juxtaposé à la trame urbaine de Montréal et b) configuration adaptée à la situation urbaine64

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

AMS	Arbre à poids minimal de Steiner
B	Nombre de boucles
C	Coût
CCD	CompuCell3D
DM	Distance moyenne
DS	Degré de séparation
DT	Distance totale
P.p.	<i>Physarum polycephalum</i>
PRT	<i>Personal Rapid Transit</i>
R	Résilience
RA	Réseau adapté
SNB	Système de navette en boucle
STC	Système de transport cybernétique
SUV	Voiture utilitaire sport
TC	Transport en commun
TGA	Système de transport à guidage automatisé
TRG	Transport rapide de groupe
TRP	Transport rapide personnalisé
TT	Trajets totaux potentiels

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

CO	Monoxyde de carbone
GES	Gaz à effet de serre
HC	Hydrocarbure
Kg	Kilogramme
Km	Kilomètre
g	Gramme
m	Mètre
mm	Milimètre
NO _x	Oxyde nitrique
PM ₁₀	Particules microscopiques
R ²	Coefficient de détermination
SO ₂	Anhydrite sulfureux
μm	Micromètre
vOC	Composés organiques volatiles

INTRODUCTION

À l'ère où l'automobile reste le moyen de transport dominant, les pressions subies par les infrastructures de transport, l'environnement et le milieu urbain ont atteint un niveau limite, freinant ainsi la prospérité des villes. Afin de remédier aux problématiques entourant les externalités négatives liées à l'usage accru de l'automobile en zone dense comme le centre-ville et de répondre à la demande en mobilité, un système de transport alternatif qui offre les mêmes qualités que l'automobile (des déplacements directs de type porte-à-porte, rapides, personnalisés et disponibles en tout temps) doit être mis en place. (Glaus, 2007) La principale problématique abordée dans le cadre de cette recherche concerne la conception d'un réseau efficient dans l'utilisation des ressources, offre une flexibilité dans les trajets, minimise le temps de transport et est résilient aux ruptures pouvant survenir sur le réseau, tout en étant accessible.

Dans le cas de la présente recherche, la conception d'un tel réseau se base sur une approche biomimétique. Cette approche prend la nature comme modèle et se traduit ici par une série d'expériences en laboratoire avec l'organisme choisi et est combiné à des simulations informatiques dans le but d'obtenir des configurations efficientes. Présentant des qualités telles qu'une faible distance totale afin d'être efficient dans l'utilisation des ressources, une faible distance moyenne et un faible degré de séparation permettant d'offrir des trajets directs et rapide entre les nœuds à desservir, une forte résilience face aux ruptures aléatoires et un bénéfice élevé par rapport aux coûts, une telle configuration accueillant un système de transport à guidage automatisé tel que les TPR permet d'offrir un service compétitif à l'automobile et répondre aux besoins en mobilité au centre-ville pour Montréal.

Tout d'abord, le premier chapitre discute de l'état des villes en terme de mobilité, aborde les types de déplacements et trace un portrait de la situation spécifique du centre-ville de Montréal. Les limites des systèmes de transports actuels et les solutions envisageables afin de réduire l'utilisation de l'automobile tout en encourageant les modes de transports en commun

sont également abordés. Puis, la discussion porte sur les différents types de transports émergents. Le chapitre se termine par une introduction au biomimétisme et la présentation des modèles utilisés.

Ensuite, le chapitre 2 présente la méthodologie employée lors de l'utilisation des modèles. Les algorithmes et formules mathématiques utilisés afin d'obtenir les résultats y sont également discutés. Le chapitre se termine sur la description des caractéristiques graphiques, des indicateurs de performances et de l'analyse multicritère utilisée lors de l'évaluation de la performance des configurations obtenues. Les résultats sont présentés et analysés au troisième chapitre.

Puis, le dernier chapitre porte tout d'abord sur l'application des résultats à la situation spécifique du centre-ville de Montréal. Ainsi, la configuration du réseau le plus performant est adaptée à la trame urbaine, puis la performance du réseau adapté est évaluée. Enfin, la discussion se poursuit en abordant les applications liées à un tel système de TGA en milieu urbain. Le chapitre se termine sur les perspectives permettant l'amélioration du modèle.

CHAPITRE 1

ÉTAT DES CONNAISSANCES

Les problématiques de la mobilité en milieu urbain sont passées en revue en faisant un retour sur le développement des villes et leurs organisations. La mobilité en milieu urbain est également abordée en examinant les différents types de déplacements, l'usage des moyens disponibles en matière de transport, l'accessibilité et les limites de ceux-ci. Ensuite, les nouvelles solutions en matière de transport tel que les systèmes de transport à guidage automatisé (TGA) sont présentées. Enfin, une introduction au biomimétisme est faite et les différents modèles utilisés lors de la conception d'un réseau sont finalement présentés.

1.1 Le milieu urbain

Déjà plus de la moitié de la population mondiale vit en ville, soit environ 3,6 milliards d'individus vivant dans les 230 centres urbains. (ONU, 2011) L'accroissement de la population en milieu urbain est passé de 15 à 50% entre 1900 et 2000 et plus de 213 villes comptent plus d'un million d'habitants. (ONU, 2011) Le phénomène d'urbanisation est décrit par Papillon (2004) comme étant une convergence géographique d'une population croissante et de l'activité humaine engendrée par celle-ci. Cette section discute de ce phénomène en abordant la densification des villes, la mobilité et ses limites.

1.1.1 L'évolution de la ville et de son organisation

Étant un pôle économique important, les grandes villes offrent des possibilités d'emplois et génèrent une masse de salariés, encourageant ainsi la population à s'y installer. La densification se fait sentir dès le 19^{ème} siècle. Par contre la superficie de la ville est restreinte par les modes de transports. Les zones urbanisées se limitent généralement à un rayon d'environ 10km et peuvent se parcourir à pied. (Chandler, 1987) C'est au début du 19^{ème} siècle que la population mondiale atteint le cap du milliard d'habitants. La part démographique de la population urbanisée de l'Asie et l'Europe est de 65 et 20%, tandis que

l'Amérique du Nord ne compte que pour 0,7%. (Caselli *et al*, 2006) La ville de Beijing (Chine) est la plus peuplée à l'époque et compte déjà 1 million d'habitants, Londres (Angleterre) et Guangzouh (Chine) en comptent 861 et 800 milles, suivies de Tokyo (Japon), Istanbul (Turquie) et Paris (France) avec, respectivement, 685, 570 et 547 milles habitants. (Chandler, 1987)

Au 20^{ème} siècle, les avancées techniques comme le moteur à combustion et l'électrification des industries et des foyers stimulent la croissance de la population et de la production globale. La population mondiale atteint alors 1,5 milliards d'habitants et déjà 16 métropoles recensent plus d'un million d'habitants. (Chandler, 1987) Afin d'encadrer le développement croissant des grandes villes, des politiques concernant l'occupation du sol et l'aménagement du territoire furent mises sur pied. Le réaménagement des quartiers centraux des vieilles villes d'Europe est alors grandement influencé par le modèle de Haussmann, suite à la reconstruction de Paris. (Harouel, 1981) L'espace urbain se voit transformé et structuré à l'aide de larges artères rectilignes encadrées par des arbres et des édifices publics, type d'aménagement reconnaissable dans les grandes villes d'Europe comme Madrid, Barcelone ou Amsterdam. L'avènement du tramway électrique, le développement accru du chemin de fer et l'arrivée de l'automobile contribuent également au changement radical de l'allure des villes. Parallèlement, l'accélération de la vitesse et l'accessibilité à la mobilité engendre une migration des habitations en périphérie du centre et marquera le début de la périurbanisation, mode de vie fortement associé à l'utilisation de l'automobile. La nécessité de la proximité liée à la mobilité restreinte est dès lors chose du passé.

Ainsi, l'accroissement constant de la démographie, le phénomène de migration émergent engendré par les avancées techniques en matière de déplacements, combiné aux multiples problèmes liés à l'hygiène et à la salubrité poussent les architectes et urbanistes à élaborer un modèle se voulant universel « permettant de retrouver un ordre perturbé par le machinisme. » (Harouel, 1981) Cette nouvelle modernité inspire les architectes tels que Le Corbusier et Niemeyer à imaginer une ville fonctionnelle se divisant en quatre fonctions : l'habitation, le travail, les loisirs et les infrastructures de transport. (Taylor, 1998) Les plans de construction

affichent de grands ensembles de logements sociaux, des édifices publics dominant de vastes espaces publics et des quartiers industriels écartés des lieux d'habitation, le tout étant relié par des autoroutes. La planification de stationnements publics, de grands boulevards et d'autoroutes traversant le centre des métropoles sont au cœur des plans des nouvelles villes. Suite à la Deuxième Guerre Mondiale, de grands plans d'ensembles basés sur le principe de la ville fonctionnelle furent construits dans plusieurs pays tel qu'en Inde avec Chandigarh et au Brésil avec Brasilia. Évidemment, les impacts d'une telle organisation spatiale de la ville, la ségrégation des fonctions et l'utilisation accrue des véhicules privés étaient grandement sous-estimés par les architectes et urbanistes de cette époque. (Taylor, 1998)

Tandis que la population poursuit sa croissance, la ville connaît un élargissement de son périmètre urbanisé, ayant pour conséquent l'augmentation de la distance des déplacements. En effet, la croissance économique, le changement de la structure familiale, la valorisation de l'habitation individuelle et la baisse de la valeur foncière en couronne de la périphérie urbaine incitent la population active à s'y installer. (Da Cunha *et al*, 2005) Le phénomène de périurbanisation n'est pas sans conséquence, car plus la distance entre l'habitation, le lieu de travail et les autres d'activités quotidiennes augmente, plus la dépendance à la voiture et à la consommation d'énergie croît, générant congestion et pollution. Afin d'avoir accès à toutes les fonctions diverses offertes par la métropole, la population périurbaine et urbaine doit se déplacer et emprunter les réseaux de transport disponibles.

1.1.2 La mobilité selon l'échelle, les types et les modes de déplacement

La complexification de la vie quotidienne par la diversification des activités (professionnelles, économiques, divertissements, scolaires) et l'étalement spatial de celles-ci, manifestation de la mobilité accrue et diversifiée, renvoie aux multiples changements que connaît la société du 21^{ème} siècle. La flexibilité du temps de travail, l'augmentation des déplacements professionnels et la multirésidentialité (domicile saisonnier, éclatement de la famille, lieu de travail éloigné obligeant un double domicile, tourisme de courte durée)

introduisent différents besoins en mobilité pouvant être observées à différentes échelles. (Wiel, 1999)

Les échelles de la mobilité

La mobilité s'exerce à différentes échelles spatiales et temporelles où son objet d'analyse varie selon celles-ci. L'échelle macrosociale permet d'observer l'attractivité des pôles à l'intérieur d'un territoire et d'identifier la distribution de la mobilité selon des caractéristiques sociales (âge, sexe, nationalité, niveau d'éducation, etc.). L'échelle microsociale fait référence aux acteurs de la mobilité, aux systèmes d'actions et de stratégies mises en œuvre par ceux-ci afin de se mouvoir à l'échelle régionale ou de l'ensemble des territoires urbanisés. Enfin, à l'échelle micro-individuelle, ce sont les besoins des individus en terme de mobilité qui sont observés. À cette échelle, c'est le lieu de résidence et les moyens utilisés par les acteurs (voitures, train, tramway, autobus, vélo) qui dominent le cadre d'observation. (Bonnet, 2006) Par ailleurs, la mobilité varie également selon les dimensions de temps et d'espace. L'échelle de temps se divise selon la durée du déplacement et s'exerce à l'intérieur de différentes échelles d'espace. Celle-ci peut être soit, de longue durée et associée au déménagement ou à l'immigration, soit de moyenne durée, où, relevant de l'unité mensuelle, elle s'inscrit dans les déplacements occasionnels tels que les voyages et les loisirs. L'échelle de courte durée est observée selon la journée ou la semaine et est assignée à la mobilité quotidienne (travail, courses, loisirs, socialisation) et s'exerce dans les espaces de « proximité ». (Bonnet, 2006) Il est à noter que la notion de « proximité » n'est plus seulement relative à la situation géographique et que la notion de temps, variant selon la vitesse du moyen emprunté, s'impose également comme unité de mesure de l'espace.

Ainsi, l'échelle d'observation concernant les besoins individuels en mobilité se campe dans la dimension micro individuelle et englobe les déplacements quotidiens. Ayant une fréquence de déplacements plus élevée par rapport aux autres échelles, la mobilité micro individuelle englobe l'ensemble des déplacements journaliers qui animent la métropole et permettent son développement économique, social et culturel. Que ce soit dans le but de l'emploi,

l'éducation, les loisirs, la culture ou pour effectuer des emplettes, c'est à cette échelle que le besoin en mobilité individuelle se manifeste et que les problématiques liées à l'utilisation accrue de l'automobile apparaissent. La mobilité micro individuelle s'opère sur une courte à moyenne distance et est généralement de courte durée. Par contre, la fréquence des déplacements à cette échelle est élevée comparativement aux autres échelles de la mobilité. De plus, le besoin en mobilité ne peut se résumer à l'aller-retour entre le lieu de résidence et d'emploi. Les déplacements micro individuels journaliers connaissent plusieurs points de départ et de destinations dues à la diversification des activités et sont définis ici comme étant des déplacements de type « multiple-multiple ».

Le portrait de la mobilité des grandes villes canadiennes

Les déplacements quotidiens dans les grandes métropoles canadiennes comme Montréal, Toronto et Vancouver sont estimés à environ 8, 5 et 17 millions chaque jour, pour les trois villes respectivement. (Enquête O.-D. 2003) Ceux-ci sont soit « primaires » et englobent le navettage domicile-travail ou vers les établissements d'enseignement, soit d'ordre « secondaire » et généralement liés aux loisirs, aux achats et autres motifs (sociaux, reliés à la santé et autres). En 2008, la distance moyenne de navettage à l'intérieur de la région du grand Montréal est en moyenne de 8,5 km pour les déplacements primaires et de 4,6 km pour ceux considérés comme secondaire. (Enquête O.-D., 2008) Il est vrai d'affirmer que le secteur de l'emploi motive la majorité des déplacements. Ainsi, le marché de l'emploi fortement localisé dans le centre de la métropole absorbe « [...] les excédents de main d'œuvre de sa zone d'influence sans exiger d'émigration dans la ville agglomérée. » (Wiel, 1999) La distance moyenne afin d'atteindre le lieu de travail est de 8,1 km pour Montréal, 9,4 km pour Toronto et 7,6 km pour Vancouver et la durée moyenne du trajet domicile-emploi est de 31, 33 et 30 minutes respectivement. Près de 40% des travailleurs de ces trois grandes métropoles parcourent une distance entre 5 et 14 km et près du quart franchira plus du double de la distance moyenne afin d'atteindre le lieu d'emploi. (Statistique Canada, 2006) Ce sont les résidents des zones suburbaines qui parcourent généralement les plus grandes distances afin de se rendre au travail. La distance à parcourir peut représenter une augmentation du

temps de déplacement, par contre l'augmentation de la vitesse induite par l'automobile permet d'atteindre les destinations désirées plus rapidement que les autres modes de transport. Par ailleurs, lorsque l'achalandage vers une même destination est élevé, par exemple le centre d'une métropole, la vitesse moyenne de déplacement diminue et le temps nécessaire afin d'atteindre la destination désirée augmente.

Le cas de Montréal

Le centre-ville de Montréal, centre attracteur à forte activité économique, touristique et culturelle, est une destination populaire où l'achalandage, durant toutes les heures de la journée est accru. Le centre-ville comprend plus de 25% des emplois de la ville de Montréal, ce qui correspond à près de 300 000 travailleurs, soit plus de 17 000 emplois par kilomètres carrés. (Statistique Canada, 2006) La figure 1.1 illustre la densité d'emploi pour l'arrondissement Ville-Marie, soit le centre-ville de Montréal pour l'année 2006.

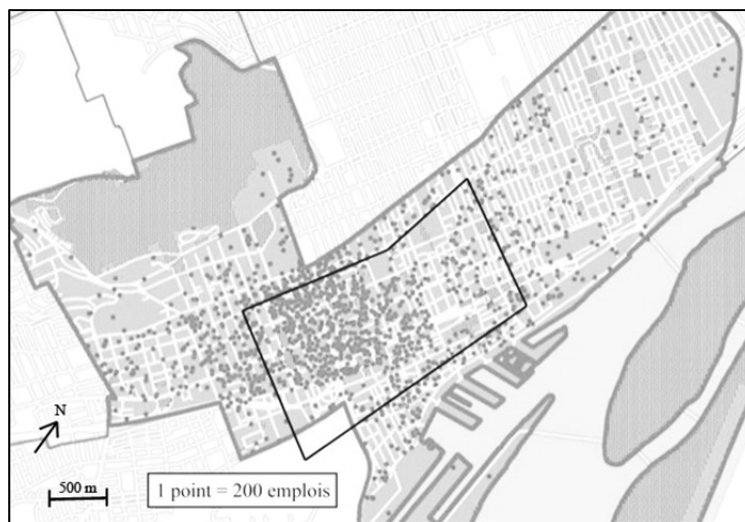


Figure 1.1 Densité d'emploi dans l'arrondissement de Ville-Marie
Tirée de Montréal en statistique (2013)

L'arrondissement de Ville-Marie compte plus de 3 000 commerces, plus de 100 000 véhicules y circulent quotidiennement et près de 8 millions de personnes visitent le centre-ville à chaque année. Sans compter les 100 000 étudiants qui y circulent chaque jour afin d'atteindre les établissements d'enseignement. (SDÉVM, 2008) La zone à l'étude est représentée à la figure 1.1 par un polygone et s'étend sur 2.81 km², ce qui représente moins de 1% de l'aire totale de la ville de Montréal. Offrant ainsi un potentiel de patronage élevé, dû aux multiples centres d'activités s'y trouvant, cette zone génère des milliers de déplacements quotidiens. Les navetteurs ayant comme destination le centre-ville affluent soit de l'extérieur de la région métropolitaine, des quartiers adjacents ou des résidents de l'arrondissement. Par contre, le mode de déplacement utilisé afin d'atteindre ce secteur est problématique.

Les modes de déplacements

Afin d'effectuer les activités quotidiennes, l'individu peut choisir entre trois modes de déplacement, soit actif (marche à pied, vélo), collectif (autobus, tramway, métro) ou privé (voiture individuelle). La figure 1.2 illustre la part modale selon le mode de transport utilisé.

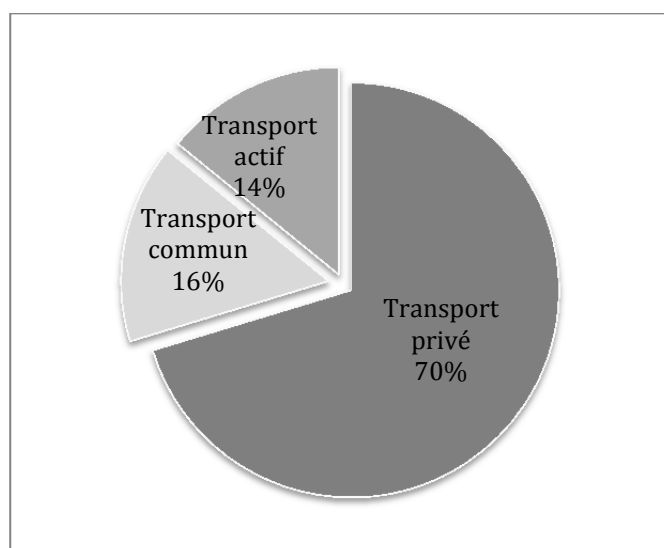


Figure 1.2 Part modale selon le type de transport
à Montréal
Enquête O.-D. (2008)

La figure 1.2 illustre la part modale selon le type de transport emprunté à Montréal durant l'année 2009, tout type de déplacements confondus et démontre que l'utilisation de l'automobile domine les autres modes de déplacements. En 2006, plus de 70% des travailleurs de la grande région métropolitaine de Montréal utilisent la voiture (conducteurs et passagers) afin d'atteindre le lieu de travail. Les villes de Toronto et de Vancouver présentent des statistiques similaires avec 71,1% et 74,4% respectivement. Le nombre de véhicules sur la route canadienne ne fait qu'augmenter et a atteint 20,2 millions en 2008. (Statistique Canada, 2009) En effet, l'automobile est encore le mode de transport le plus populaire. Celle-ci offre un espace privée confortable où le conducteur est isolé, tout en offrant une flexibilité dans les déplacements, permettant de consolider les différentes activités quotidiennes. L'utilisation accrue de l'automobile est causée par de multiples facteurs, soit la ségrégation des fonctions, les développements résidentiels éloignés du centre et des services de transports collectifs, l'accessibilité des infrastructures routières, le confort, la valeur symbolique et le sentiment de sécurité offerte par celle-ci. Par contre, les externalités négatives liées à l'usage du véhicule privé exercent des pressions sur l'environnement, la santé et l'économie.

1.1.3 Les limites de la mobilité moderne

Ainsi, la majorité de la population nord-américaine choisit la voiture comme mode de transport primaire lors des activités quotidiennes. Pour tous ménages canadiens confondus, l'accès à la voiture représente la principale raison du non-usage des transports en commun, suivie de la contrainte des horaires de passages et de la fréquence de ceux-ci. (OCDE, 2007) Les limites du transport en commun et les externalités négatives liées à l'utilisation accrue de l'automobile sont ici abordés.

Les limites des transports collectifs

Malgré les efforts d'amélioration du service et des infrastructures, l'utilisation du transport collectif reste limité tandis que l'usage de l'automobile persiste comme mode de transport de prédilection. Le mode de déplacement de type privé offre des avantages que les transports en commun ne peuvent offrir à l'individu. Évidemment, la disponibilité et l'accessibilité du moyen de transport privilégié joue un rôle important dans le choix de l'individu. Les transports collectifs offrent une disponibilité restreinte et une accessibilité limitée. En effet, les déplacements des usagers du transport en commun dépendent des horaires de passage et l'individu doit planifier son trajet en fonction du service offert. Celui-ci peut varier selon le mode (autobus, métro, tramway, train) et l'achalandage présent sur une ligne. De plus, l'accessibilité au mode de transport en commun au point de départ et au point d'arrivée doit également être pris en compte lors du déplacement. (OCDE, 2007) L'utilisateur du transport collectif doit atteindre le lieu d'embarquement du mode choisi, doit se déplacer vers le point de transfert lorsque nécessaire et enfin, du point de débarquement vers la destination choisie. En effet, le temps de marche afin d'accéder à un système de transport en commun, le temps d'attente lors du transfert et lors de l'embarquement et des débarquements influencent l'individu dans le choix de l'usage du transport en commun. Ainsi, le transport collectif ne peut offrir un service de type porte-à-porte comme le fait l'automobile. Il offre une flexibilité de déplacement limitée par le corridor desservi, la fréquence de passage et la localisation des points d'embarquement. De plus, la fréquence des arrêts nécessaires à l'embarquement et au débarquement des usagers, ralentit la vitesse moyenne causant une augmentation du temps total consacré au déplacement. (Lowson, 2004) Cette vitesse moyenne peut également être influencée par le nombre de véhicules présents sur la route dans le cas où les transports collectifs partagent la voirie. La figure 1.3 affiche la vitesse moyenne de déplacement par rapport à la vitesse maximale atteinte selon l'écart entre les arrêts, tandis que la figure 1.4 représente la vitesse moyenne selon la part modale (voiture ou autobus) par rapport au pourcentage de l'utilisation de la voiture.

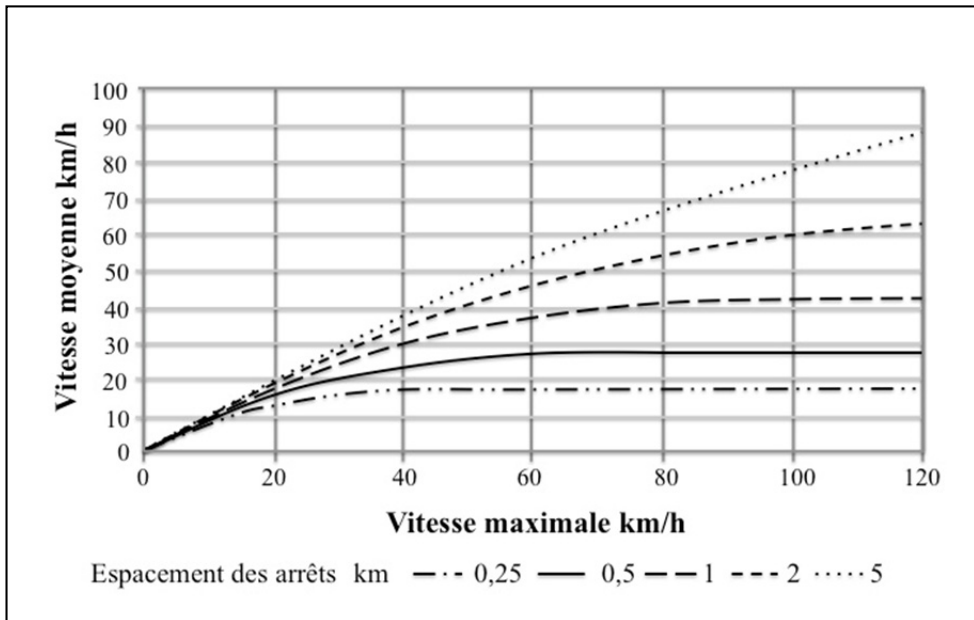


Figure 1.3 Vitesse moyenne maximal selon l'écart entre les arrêts
pour différent type de transport en commun
Adaptée de Lawson (2004)

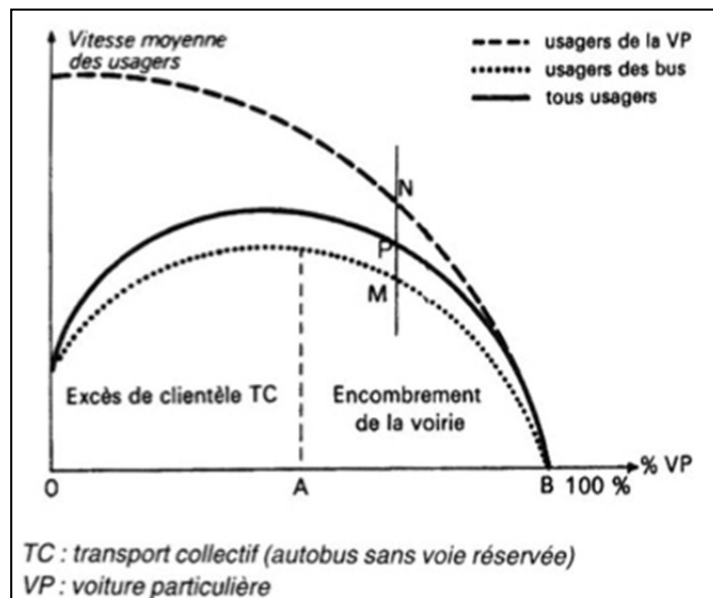


Figure 1.4 Vitesse moyenne selon l'utilisation
de la voiture
Tirée de Bonnafous A. et Puel H. (1983)

Ainsi, comme l'illustre la figure 1.3, plus la distance des arrêts est rapprochée, plus la vitesse moyenne diminue, ce qui augmente le temps consacré aux déplacements. Lorsque les arrêts sont rapprochés comme pour les autobus où les arrêts se situent entre 0,25 et 0,5 km, le véhicule n'accélère que sur une très courte distance avant de devoir décélérer, ne lui permettant pas d'atteindre sa vitesse maximale moyenne. Par contre, afin d'augmenter l'accessibilité aux modes de transports, un espacement de moins de 400 m est recommandé, ce qui, selon la figure 1.3 ne permet pas au moyen de transport d'atteindre une vitesse moyenne élevée. (STM, 2007) Par ailleurs, comme le démontre la figure 1.4, lorsque l'utilisation de la voiture est faible, la fluidité de la circulation permet d'atteindre une vitesse moyenne maximale pour tous les navetteurs, automobilistes et utilisateurs du transport collectif. (Lowson, 2004) Par contre, l'utilisateur utilisant l'autobus aux heures de pointe lorsque la saturation est forte, étant représenté par le point *M* à la figure 1.4, se voit ralenti par les automobilistes. Ainsi, la vitesse moyenne des usagers du transport en commun n'est pas seulement faible à cause de la faible distance entre les arrêts, mais varie également en fonction de l'achalandage automobile. De plus, la vitesse moyenne de ceux-ci, située au point *N*, est tout de même supérieure à la vitesse des usagers du TC. La frustration causée par cette inégalité augmente le désir d'acquérir une voiture et lorsque l'utilisateur du TC « [...] en aura la possibilité, muni d'un permis de conduire et d'un revenu suffisant, il prendra à son tour le volant et provoquera [...] un déplacement vers la droite de la courbe, et ainsi, un accroissement des encombrements. » (Bonnaïfous, 1996)

Les externalités négatives liées à l'usage de l'automobile

L'encombrement de la route a des répercussions beaucoup plus étendue que la diminution de la vitesse moyenne et l'augmentation du temps de déplacement. Les routes sont congestionnées durant les heures de pointe tandis que les moteurs continuent à consommer de l'énergie. Les émissions de GES et autres particules néfastes polluent l'air et l'environnement et affectent la santé de la population vivant à proximité des grands axes routiers. De plus, 80% des coûts relatifs aux externalités négatives liés à l'utilisation de la voiture proviennent des trois plus grandes villes canadiennes, Montréal, Toronto et

Vancouver. (Statistiques Canada, 2009) Les retombées négatives liées à ce mode de déplacement concernent la sphère sociale, économique et environnementale. Ainsi, l'utilisation de l'automobile comme mode privilégié de transport n'est pas viable. Le tableau 1.1 présente les externalités négatives liées à l'usage accrue de l'automobile.

Tableau 1.1 Externalités négatives de l'utilisation accrue de l'automobile

Externalités négatives	
Impacts directs	Description et exemple
Pollution de l'air	Impacts sur le système respiratoire : bronchite chronique, emphysème, asthme, irritation et cancer des voies respiratoires, maux de tête, vertiges, nausées et perte de conscience. (Degobert, 1992)
Sécurité routière	Accidents de la route chez les automobilistes, cyclistes et piétons engendrant de la mortalité et des blessures graves. (Direction de la santé publique, 2006)
Utilisation de l'espace	Perte d'espace liée à l'encombrement des véhicules stationnés et des véhicules en mouvement et également liée à la voirie et aux autoroutes. (Kenworthy and Laube, 1999) Création de barrières physiques et visuelles dans le paysage urbain.
Consommation d'énergie	Utilisation des ressources non renouvelables comme le bitume dans la construction des routes et du pétrole raffiné pour le fonctionnement des véhicules. (Agence de l'efficacité énergétique, 2008)

La détérioration de la qualité de l'air et de l'eau, la pollution sonore, la sécurité, la perte d'espace et d'énergie contribuent à la dégradation de la qualité de vie des habitants des grandes villes. Le monoxyde de carbone (CO), l'anhydride sulfureux (SO₂), l'oxyde nitrique (NO_x), les hydrocarbures et composés organiques volatils (HC et VOC) et les particules microscopiques (PM₁₀) sont tous des polluants atmosphériques qui sont néfastes pour la santé des humains, des animaux, de la végétation et des cours d'eau avoisinants. (OCDE, 2010) En 2010 au Québec, les émissions de GES pour le secteur des transports sont évaluées à 34,7 mégatonnes de GES et la voiture individuelle, à elle seule, est responsable du tiers de ces émissions. (OEE, 2011)

Les pertes économiques liées à la voiture peuvent également être associées à la consommation d'espace et d'énergie. En comparaison avec le transport collectif, un autobus ayant à bord 50 usagers a une consommation d'espace de 3,5 m² par passager, tandis que l'espace consommé par une voiture est de 16,7 m² lorsque stationnaire et cinq (5) fois plus grande lorsque celle-ci est en mouvement. (Grava, 2003) L'espace utilisé lorsque le véhicule est en arrêt n'est pas négligeable étant donné que les périodes d'inutilisation lors des activités primaires sont généralement entre 4 et 8 heures. Les espaces de stationnement tapissent le paysage urbain et contribuent à la dégradation de celui-ci. Il restreint également l'espace disponible pour les modes actifs comme le vélo et occupe en moyenne 31% de la surface des grandes métropoles mondiales. (Kenworthy et Laube, 1999) La superficie dédiée à la circulation automobile est également un facteur qui participe à la consommation accrue de l'espace. En effet, au Canada la distance totale d'autoroute consacrée au trafic automobile est 2,22 fois plus élevée que la superficie dédiée au transport en commun, comparativement aux pays d'Europe où le ratio est de 1,39. (Kenworthy et Laube, 1999) De plus, les autoroutes nécessitent des espaces nécessaires à la construction d'échangeurs, ce qui perturbe la cohésion de l'environnement bâti. L'utilisation du bitume dans la construction des infrastructures routières est un bon exemple de consommation énergétique néfaste et non-renouvelable. La dépendance aux produits pétroliers, source finie d'énergie, est fortement liée à l'usage de l'automobile. De plus, la consommation d'énergie nécessaire au fonctionnement des véhicules est également problématique. Au Québec, la consommation

énergétique fournie par le carburant en milieu urbain représente 212,56 pétajoules pour les voitures et est de 2,97 pétajoules pour les autobus. (Agence de l'efficacité énergétique, 2008) Les externalités négatives liées à l'utilisation accrue de l'automobile cause des impacts directs mentionnés précédemment, mais l'interaction entre ceux-ci engendre également des conséquences indirectes telles que le désintérêt pour les transports actifs, l'effritement des relations de voisinages et la détérioration de la santé et de la qualité de vie. (Héran, 2011) Selon Héran (2011), ces liens démontrent la complexité des externalités négatives liées à l'automobile. Il affirme également que le calcul du coût réel des impacts est biaisé et sous-estimé étant donné l'exclusion des liens présents entre eux.

1.2 Les stratégies d'interventions et caractéristiques des réseaux de TC

Ainsi, malgré tous les effets négatifs et les pertes économiques liées à l'utilisation de la voiture, celle-ci reste tout de même le mode de transport privilégié. La voiture n'est pas un moyen de déplacement viable en terme d'utilisation d'espace et d'énergie, ni dans l'optique du développement durable des villes. C'est pourquoi plusieurs stratégies d'intervention sont mises en œuvre dans différents pays. Il existe des moyens afin de réduire l'utilisation de l'automobile, tout en satisfaisant les besoins en mobilité, et ce, par l'intermédiaire de système de transport en commun performant et des technologies émergentes.

1.2.1 Les stratégies dissuasives à l'égard de la voiture

Afin de réduire la dépendance face à l'automobile et de limiter l'étendue des externalités négatives provenant du trafic routier, plusieurs politiques ont été mises en place en Europe et en Amérique du Nord. Par exemple, la limitation de l'accès aux automobiles dans les centres urbains, le contrôle des stationnements et la tarification des autoroutes, ponts et autres infrastructures routières sont des moyens permettant de réduire les impacts relatifs à l'usage accrue de l'automobile. Le tableau 1.2 énumère certaines stratégies mises en place dans différents pays afin de réduire l'utilisation de l'automobile et les retombées engendrées par celles-ci.

Tableau 1.2 Les stratégies et politiques dissuasives contre l'automobile

Stratégies d'interventions		
Stratégies	Implantation	Retombées connues
Limitation de l'accès (<i>Low Emission Zone</i>)	- délimitation de la zone à restreindre (centre-ville); - instaurer un système de laissez-passer et restreindre le nombre d'immatriculations émises; - établir un seuil maximal d'émission par type de véhicule.	- Londres : baisse de 13% NO_x, baisse de 15% PM₁₀ et baisse des accidents (OCDE, 2010); - Rome : baisse de 20% du trafic routier, baisse de 15% du nombre de véhicule dans les heures de pointe et augmentation de 6% de l'utilisation du TC. (OCDE, 2010)
Contrôle des stationnements	- limitation des espaces de stationnement public; - gestion et tarification selon des zones préétablies, les heures du jour et le temps d'occupation.	Calgary : réduction de 24% du nombre de véhicules et augmentation de l'utilisation des TC de 79% en direction du centre-ville, 11M \$ générer en 2009. (RIM, 2011)
Tarification des axes routiers	- péage sur les ponts, les autoroutes et les tunnels. - tarification selon les heures du jour, l'achalandage et le type de véhicule.	- assure un contrôle du flux routier. Ex : autoroute SR91 en Californie, Etats-Unis; - Londres : baisse de 33% du nombre de véhicule sur 3 ans et réduction d'environ 20% du trafic routier. (OCDE, 2010)

La limitation de l'accès des véhicules motorisés dans certaines zones de la ville, comme le centre-ville ou le centre historique, peut être appliquée de différentes façons. Celle-ci peut être déterminée soit par le type de véhicule (véhicule lourd, SUV), par un système de laissez-passer ou encore par l'émission restreinte du nombre d'immatriculations. (Wilson, 2006) La figure 1.5 illustre le principe de limitation d'accès de zone à basse émission.

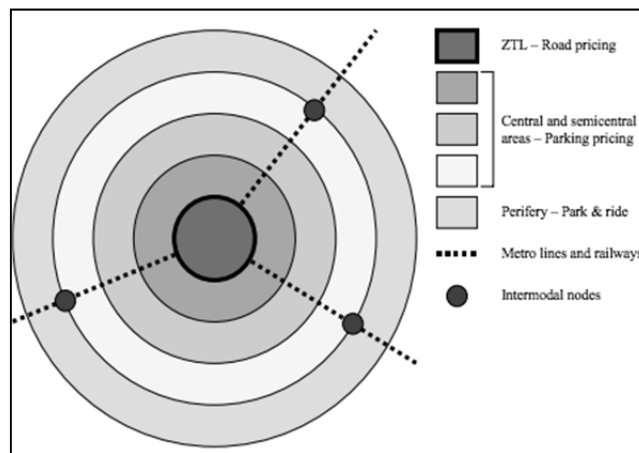


Figure 1.5 Stratégie de tarification dans les zones de trafic limité
Tirée de Wolfram *et al.* (2005)

Lorsque la limitation de l'accès se fait par rapport au type de véhicule, les zones problématiques sont d'abord délimitées, puis les types de véhicules problématique à restreindre sont établis (véhicules diésels, transport de marchandise lourde ou SUV). La zone à bas niveau d'émissions (*Low Emissions Zones*) est ciblée et représentée à la figure 1.5 par le cercle central. À l'intérieur des zones adjacentes au centre, l'accès aux véhicules est possible pour tous, par contre les zones de stationnement y sont limitées et la tarification de celles-ci varie selon la proximité du centre. Puis, en périphérie se trouvent des stationnements incitatifs desservis par des lignes de transports collectifs permettant de rejoindre la zone centrale où l'accès est limité. Il est important de noter que cette mesure restrictive est jumelée à un contrôle des zones de stationnements et à un système de transport collectif afin d'offrir une alternative à l'automobile, tout en permettant un accès direct et rapide à la zone restreinte.

Le contrôle des zones de stationnements peut jouer un rôle non négligeable sur le choix du type de transport. Cette stratégie vise à limiter l'espace de stationnement disponible et d'augmenter la tarification. Le contrôle des zones de stationnement offre une grande flexibilité et peut être facilement implanté dans les zones où l'achalandage automobile est jugé problématique. Les places de stationnement peuvent être gérées et tarifées soit selon leur emplacement, une plage horaire, le type d'utilisation et l'activité en lien ou encore en offrant des tarifs concurrentiels aux utilisateurs du covoiturage. Les zones peuvent également être divisées en fonction du temps d'occupation de l'espace de stationnement. Une telle stratégie permet d'influencer le comportement des navetteurs, le choix du mode emprunté et d'induire un changement dans les heures de déplacements permettant ainsi d'atténuer la demande aux heures de pointe. (OCDE, 2010)

Le péage lors de l'utilisation des axes routiers permet également d'atténuer le phénomène de congestion. Ce type d'intervention s'opère au niveau des autoroutes, des ponts et des tunnels et varie selon le flux du trafic afin d'éviter l'encombrement des infrastructures. Par exemple, l'autoroute SR 91, en Californie aux États-Unis, est la première route à être munie d'un système à péage complètement automatisé dont le système de tarification s'ajuste selon le nombre de véhicules présents sur la route. Évidemment, c'est aux heures de pointe que la tarification atteint un prix plafond. Cette stratégie d'intervention tente de modifier les comportements de déplacements en tarifant à la baisse les automobilistes ayant plus de deux passagers, les motocyclistes, les voitures à émission nulle et aucune tarification n'est appliquée aux véhicules servant aux transports des personnes invalides. Les profits issus de ce type d'installation peuvent permettre le financement lié à l'entretien et l'amélioration des infrastructures en place ou à la construction de nouvelles infrastructures.

L'application des stratégies d'intervention dans les grandes villes d'Europe et d'Amérique du Nord a démontré que les mesures dissuasives à l'égard de l'automobile permettent de réduire son utilisation. Par contre, de tels politiques se doivent d'être combinées à d'autres initiatives concernant le plan d'aménagement des villes et la mise en place d'un service de transport en

commun efficace afin d'offrir un service pouvant répondre aux besoins de mobilité individuelle de type « multiple-multiple ».

1.2.2 Caractéristiques d'un réseau de transport en commun performant

Par ailleurs, les stratégies d'intervention et l'amélioration du cadre bâti afin de promouvoir l'usage des transports collectifs doivent être soutenues par un réseau de transport en commun pouvant être compétitif à l'automobile. Lors de la conception d'un tel réseau de transport en commun, la configuration du réseau est fondamentale à la réussite du projet. Elle doit contribuer à réduire les transferts, le temps d'attente induit par ceux-ci et augmenter l'accessibilité du réseau et la vitesse moyenne. Ainsi, la configuration d'un tel réseau présente une structure simple. En effet, un réseau construit de lignes courtes et directes, interconnectées entre elles et aux différents types de systèmes en place (train, tramway, métro, bus) permet de faciliter les transferts, la planification du trajet et l'usage de celui-ci. (Nielsen *et al.*, 2005) Ainsi, un réseau offrant un service ponctuel et coordonné peut accroître la vitesse de déplacement des usagers, rendant les transports en commun plus attrayants. L'espacement des arrêts influence également la vitesse moyenne et l'accessibilité du type de transport. Un point d'embarquement est considéré comme accessible aux navetteurs lorsqu'il se trouve dans un rayon de 400 à 900 mètres. Par contre, lorsque la distance excède 400 mètre, soit environ 5 minutes de marche, le navetteur sera moins enclin à utiliser le transport en commun. (O'Sullivan et Morral, 1996) Le maillage des différentes lignes de bus, de métro et de train contribue également à augmenter l'accessibilité du système de transport. La transition entre les différents types de transport en commun devient plus fluide, permettant aux navetteurs d'avoir accès à un réseau interconnecté, offrant un nombre plus élevé de points d'embarquement et de débarquement, contrairement à une configuration linéaire comme le bus, le train ou le tramway. Par contre, les configurations linéaires correspondent aux tracés les plus directs.

Lors de la conception d'un réseau, le tracé le plus court et direct peut être trouvé par l'entremise de l'arbre à poids minimal de Steiner (AMS). En effet, l'AMS informe sur le coût minimal d'un réseau liant tous les points d'un ensemble. La figure 1.6 illustre la solution pour les points ABC.

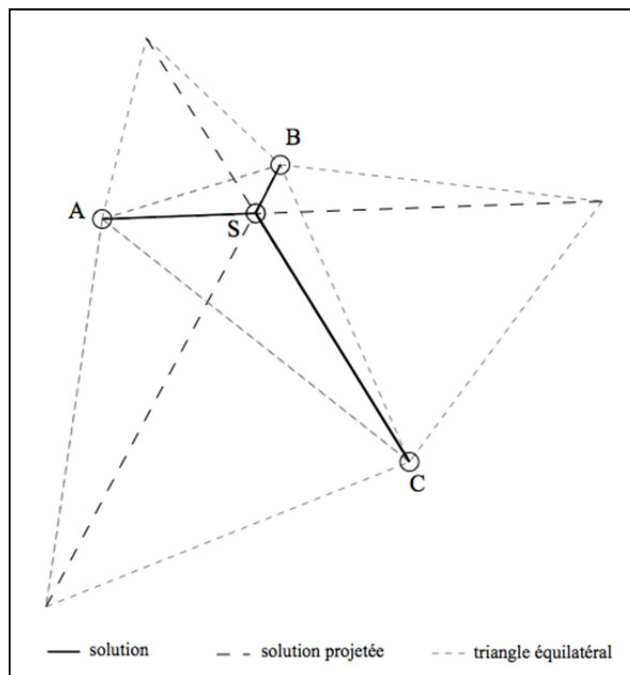


Figure 1.6 Solution pour l'ensemble de points ABC selon l'AMS

La solution pour l'ensemble de points ABC est exprimée par un tracé arborescent liant chacun des points à son plus proche voisin et les connecte de manière à obtenir la plus faible distance total. (Graham et Pavol, 1985) Afin de réduire la distance totale du réseau, l'AMS crée des points et des tronçons intermédiaires appelés « points Steiner » et « tronçons Steiner » se trouvant à la médiane géométrique des points ABC. Celle-ci peut être résolue en formant un triangle liant ABC, puis en construisant un triangle équilatéral pour chacune des arrêtes du triangle ABC. Ensuite, chacun des sommets des triangles équilatéraux sont liés avec les sommets opposés correspondants du triangle ABC. Le point Steiner se trouve au point de Fermat (médiane géométrique) du triangle formé par A, B et C. Ainsi, les tronçons ajoutés se rejoignent au point « S » et se rencontrent tous à un angle de 120 degré. Le

maximum de points « S » pouvant être ajoutés à l'arbre est de $N-2$, où N est le nombre initial de points. L'AMS présente une configuration linéaire où les segments formant la solution ne se croisent jamais. Ainsi, la solution proposée par l'AMS est toujours arborescente et offre le chemin le plus court et direct afin de lier les points de l'ensemble donné.

Par contre, un réseau à configuration linéaire ne permet que de répondre partiellement au besoin en déplacement de type « multiple-multiple ». L'utilisateur devra emprunter soit une autre ligne de bus ou un autre type de transport afin de rejoindre les différentes destinations désirées. Ainsi, une configuration de lignes courtes et directes qui se croisent afin de créer des mailles permet aux véhicules de se déplacer dans toutes les directions, de desservir différentes destinations et de satisfaire le besoin en déplacements de type « multiple-multiple ». Le niveau de maillage peut varier et être soit partiellement ou complètement maillé. Un réseau présentant au moins un nœud lié par un seul tronçon n'est que partiellement maillé, tandis qu'un réseau où tous les nœuds sont liés à son plus proche voisin par au moins deux tronçons, est considéré comme étant complètement maillés. Les réseaux complètement maillés permettent d'offrir un haut niveau de robustesse, où le coût d'exploitation varie en fonction du nombre de tronçons. (Dromard et Seret, 2010) Ainsi, un réseau maillé permet de maintenir une connexion entre les points à desservir, et ce, même en cas de panne sur une ligne. De plus, le niveau de maillage peut également varier afin d'être adapté à l'utilisation, l'achalandage ou aux caractéristiques spécifiques de la zone à l'étude.

1.2.3 Les transports émergents

Les nouvelles technologies en matière de transport, telles que le « *Personal Rapid Transit* » (PRT), proposent un système plus compétitif, personnalisé et moins polluant pouvant répondre à la demande en mobilité des habitants des métropoles. C'est au début de la première moitié du 20^{ème} siècle que l'idée d'un type de transport se situant entre le mode privé et le mode collectif est né. Donn Fichter, ingénieur en transport pour l'état de New York, conceptualise un système de transport automatisé électrique offrant des qualités similaires au mode privé; trajet direct, service sur demande, sécurité et confort, mais sans les

inconvenients de la voiture : pollution, perte de temps, d'énergie et d'espace. Conscient des problèmes relatifs à l'utilisation de l'automobile et à la demande croissante de mobilité, Fichter publie, en 1964, un livre intitulé *Individualized Automated Transit and the City* où il discute des possibilités offertes par un tel mode.

Les systèmes de transport à guidage automatisé (TGA)

Le TGA est décrit par Irving (1978) comme étant un réseau fixe où les véhicules y circulent de manière complètement autonome. Le tableau 1.3 présente les différents types de TGA décrits par Irving (1978).

Tableau 1.3 Les types de transport à guidage automatisé

Types de transport à guidage automatisé (TGA)	
Catégories	Caractéristiques
Système de navette en boucle (SNB)	• un seul rail; • un seul véhicule ou train de véhicule opère sur un rail; • parcours de courte et moyenne distance; • effectue des allers-retours entre le point A et B; • offre une circulation fluide et ininterrompue.
Transport rapide de groupe (TRG)	• fonctionne sur un réseau de route maillée; • parcours de moyenne et longue distance; • trajet avec un nombre limité d'arrêts permettant les embarquements et les débarquements; • doit atteindre une occupation minimale avant le départ.
Transport rapide personnalisé (TRP)	• système de rail magnétique incrusté au sol ou élevé; • trajet direct et simple sur un réseau maillé; • voyage sur de courtes et moyennes distances; • forte adaptabilité selon la demande; • peu ou pas de déplacement à vide.

Le système de navette en boucle (SNB) est la forme la plus simple de TGA. Similaire au système de train ou de métro, le SNB est constitué d'un seul rail où un véhicule ou un train de véhicule, parcourant de courtes ou moyennes distances, effectue des allers-retours afin de rejoindre deux points. Le rail peut également présenter un embranchement au centre permettant le croisement de deux navettes. Selon la zone à desservir, le rail peut aussi prendre la forme d'un circuit en boucle. Il peut tracer un périmètre étendu (*spread loop*) ou se lie comme deux voies rapprochées avec une boucle à chaque extrémité (*flattened loop*) afin d'obtenir une circulation fluide et ininterrompue lorsque le nombre de véhicules présents sur le circuit est élevé.

Le second type de TGA est décrit comme étant un transport rapide de groupe (TRG) où les navetteurs doivent partager le véhicule. La capacité peut varier entre 10 et 70 passagers. Similaire aux itinéraires d'autobus ou de tramway, les circuits des TRG, effectuant des trajets de moyennes et longues distances, sont tracés selon les besoins de mobilité de manière à former un réseau maillé. Lorsque le véhicule effectue un trajet ininterrompu entre l'origine et la destination, le navetteur doit attendre que la demande pour cette destination soit suffisante avant le départ de la navette. Ainsi, la capacité du véhicule présent sur le circuit fera varier le temps d'attente et le nombre total de véhicules. Le service peut également offrir différents arrêts prédéterminés entre l'origine et la destination afin d'augmenter le patronage et de réduire le temps d'attente induit par le premier scénario. Les arrêts peuvent être effectués sur demande, le service peut également être de groupe-à-groupe où le nombre d'arrêts présents sur le circuit est limité. Dans tous les scénarios, le trajet, le nombre d'arrêts, la capacité et la quantité de véhicules peuvent varier selon l'achalandage et la demande entre les points desservis.

Le dernier type de TGA relève d'un système de transport rapide personnalisé (TRP) où le véhicule peut accueillir entre un et six passagers et effectue un trajet direct entre l'origine et la destination. Idéal pour les déplacements de courtes et moyennes distances, les TRP permettent de répondre au besoin accru en mobilité des secteurs attracteurs comme les centres-villes, tout en satisfaisant la demande de déplacements « multiples-multiples »

induite par les métropoles, et ce, en offrant les avantages d'une voiture privée. L'embarquement d'un passager additionnel est possible lorsque l'utilisateur principal, en route vers sa destination, accepte de partager le véhicule et croise un point d'embarquement où se trouve un autre usager désireux d'atteindre la même destination. Une fois le véhicule libéré, celui-ci est envoyé à au prochain point d'embarquement le plus près de manière à minimiser le temps d'attente des usagers. Lorsqu'un lieu connaît une forte demande, les véhicules peuvent former un train afin de minimiser le temps d'attente et augmenter la capacité totale de passagers en route vers la même destination. (Ivring *et al.*, 1978) Étant donnée la nature semi-privée de ce type de TGA, un nombre plus important de véhicules doit circuler sur le réseau de manière à répondre adéquatement à la demande. Plusieurs variations de TRP existent et s'expriment selon l'installation (souterrain, terrestre ou aérien), le service offert (individualisé ou semi-privé) et la direction (monodirectionnel ou bidirectionnel).

Les systèmes de transport cybernétique (STC)

Les avancées techniques et technologiques des 30 dernières années ont permis de repousser les limites des TGA. Les systèmes de transport cybernétique (STC) sont un parfait exemple de ces innovations appliquées au transport de masse. Reposant sur le principe des TGA et les caractéristiques des TRP, les STC présentent les qualités suivantes (Lowson, 2004) :

- 1) disponibles en tout temps et sur demande;
- 2) effectuent des trajets directs avec peu ou aucun arrêt;
- 3) sont accessibles et offrent une multitude de destinations où l'activité est élevée;
- 4) ne polluent peu ou pas;
- 5) sont peu coûteux;
- 6) sont hautement sécuritaires;
- 7) peuvent être facilement intégrés aux autres modes de transports déjà en place.

Le STC comme la Serpentine, conceptualisé en Suisse par Dr. Bernard Saugy en 1982, propose une flotte de véhicules pouvant recevoir de un à quatre passagers qui sont guidés et alimentés en électricité par une bande magnétique incrustée dans le sol. Ceux-ci sont composés d'éléments physiques (voies de guidage et voitures) et d'un réseau de communication (terrestre par câble ou radio par longueur d'ondes) permettant la transmission de l'information à l'unité centrale qui analyse et coordonne le flux des déplacements. Un système de communication entre le véhicule et la centrale permet de connaître la position exacte de chaque voiture et de leur vitesse en temps réel, permettant ainsi la coordination et l'optimisation de la circulation. Une telle gestion des véhicules et du trafic permet également de réduire les déplacements « vides », tout en ajustant le nombre de véhicules nécessaires selon la demande. De plus, les avantages des STC sont nombreux (Glaus, 2007) :

- 1) le service est axé sur la demande des usagers et est disponible en tout temps;
- 2) la dimension réduite des véhicules nécessite peu d'espace tant à l'arrêt qu'en fonction;
- 3) son utilisation peut être d'ordre primaire et répondre au besoin en mobilité individuelle en situation urbaine, tout en permettant d'augmenter la connectivité entre les points de services d'une ville, ou d'ordre secondaire en servant de navette afin de lier les modes de transports rapides (train, aéroport) afin de répondre à un besoin collectif en mobilité;
- 4) l'utilisation de l'électricité, source d'énergie renouvelable, permet la réduction des émissions polluantes;
- 5) le coût d'installation et d'opération est plus bas que celui des transports de masse (métro, train léger, tramway).

Lorsque le STC transite sur un circuit terrestre, comme pour le système de Serpentine, il est essentiel de planifier un réseau résilient et flexible permettant de desservir plusieurs destinations où l'achalandage est accru afin de maximiser le patronage. De plus, la configuration du réseau peut compromettre ou participer au succès et à l'essor d'un tel système de transport. Ainsi, un réseau constitué de lignes courtes et directes de manière à mailler complètement les nœuds de l'ensemble à desservir présente les caractéristiques recherchées afin de supporter des déplacements fluides, dynamiques et variés.

Alors, comment configurer un réseau de transport urbain de type STC de manière à offrir une grande flexibilité dans les itinéraires, tout en étant hautement résilient, et ce, pour un coût avantageux ?

1.3 Approche biomimétique et modèles utilisés

L'approche utilisée dans la présente recherche afin de répondre à cette question se trouve du côté de la nature, et ce, en l'utilisant comme modèle et en s'inspirant de celle-ci. Les fondements de l'approche biomimétique seront tout d'abord présentés, puis les caractéristiques de l'organisme qui servira de modèle biologique afin de répondre à la problématique seront décrits. La dernière partie portera sur le modèle informatique qui reproduit le comportement de l'organisme étudié.

1.3.1 Réflexion biomimétique et introduction aux myxomycètes

L'approche biomimétique examine les lois, les stratégies et les principes employés par les organismes vivants afin de les imiter ou de s'inspirer de ceux-ci pour répondre aux problématiques contemporaines. (Benyus, 1997) La structure de la réflexion biomimétique se divise en quatre phases. Le tableau 1.4 présente les étapes de la réflexion biomimétique.

Tableau 1.4 Les étapes de la réflexion biomimétique
(Baumeister, 2012)

Démarche de la réflexion biomimétique	
Étapes	Déroulement
Définition des champs d'application	• définition du contexte et de la problématique; • identification des fonctions biologiques en lien à la problématique; • intégration des principes de vie dans la réflexion et la recherche.
Recherche	• dégager les modèles naturels offrant une réponse ou une solution à la problématique; • extraire et relever les stratégies biologiques permettant de résoudre le problème.
Conception	• lister les solutions possibles inspirées par les modèles organiques; • imiter et s'inspirer des principes et des stratégies afin de concevoir des solutions.
Évaluation et analyse	• mesurer et évaluer l'efficacité et les impacts de la solution selon les principes de vie.

La première phase permet de camper le problème. Le contexte y est défini puis l'identification de la fonction biologique et des principes applicables à la problématique sont dégagés. Ensuite, la seconde phase correspond à la recherche et l'exploration des différents modèles naturels pouvant offrir une solution au problème afin d'isoler les stratégies potentiellement applicables. Puis, la troisième partie relève du processus créatif où différentes solutions sont développées à partir des stratégies précédemment dégagées. Enfin, la dernière partie porte sur l'évaluation de l'efficacité des solutions établies à partir des principes de vie applicables.

La problématique de cette recherche porte sur les transports de masse en milieu urbain et, transposée à la fonction biologique, relève de la distribution ou du transport des ressources dans un système donné par l'intermédiaire d'un réseau. Parallèlement, l'intensité et la dynamique des échanges à l'intérieur d'un réseau, que ce soit un réseau de transport (distribution des ressources), un réseau biologique comme le système nerveux (sensoriel) ou animal tel qu'un nid de termites (régulation), peuvent varier considérablement selon la quantité du flux et dans le temps. Ainsi, les interactions entre les éléments de tels systèmes complexes sont hétérogènes. Certains éléments du système peuvent présenter une connectivité plus forte, tandis que d'autres seront plus faibles. Ainsi, c'est dans l'organisation de ces échanges que la lecture des motifs et des principes spécifiques de ces systèmes complexes émergent. (Weitz *et al.*, 2007) Ici, trois principes biologiques pouvant permettre de répondre à la problématique sont dégagés. Tout d'abord, le principe de résilience, caractéristique présente dans tous les organismes, systèmes ou réseaux naturels, où le modèle démontre une robustesse face aux ruptures imprévues. Puis, les principes d'optimisation et d'efficacité dans l'utilisation des ressources matérielles et énergétiques permettent de minimiser les coûts. Enfin, le principe de fractale, facteur structurel présent chez tous les organismes vivants, permet au modèle d'être raffiné à plus petite échelle ou étendu à grande échelle selon les besoins.

Ensuite, les différents modèles biologiques possédant les caractéristiques liées aux principes précédemment énoncés sont étudiés. Certains organismes basent leur survie sur un système de réseaux complexes permettant de transporter des nutriments, soit à travers une structure physique, comme les nids de termites ou les fourmilières, ou soit à travers une structure tentaculaire comme les racines, les cours d'eau ou les plantes. Le modèle biologique observé lors de la présente recherche appartient au règne végétal et base sa survie sur la formation d'un réseau arborescent permettant de trouver et d'exploiter différentes sources de nutriments de manière optimale. Étant donné que ces organismes ont subi les pressions de plusieurs milliers d'années d'évolution sélective, ils sont susceptibles d'avoir atteint un équilibre en matière de robustesse, de coût et d'efficacité. (Tero *et al.*, 2010)

1.3.2 *Physarum polycephalum*

En effet, c'est à travers le corps cellulaire que la construction d'un réseau s'effectue, permettant à la moisissure visqueuse *Physarum polycephalum* (*P.p.*) de distribuer les nutriments trouvés sur un substrat. Ayant déjà appartenue au sous-règne des Fongis, *P. p.* est un organisme protozoaire unicellulaire faisant partie de la famille des Physaridae. Issue de la classe des Myxomycètes, ce type de moisissure fait partie du domaine des Eucaryotes qui englobe les animaux, les plantes, les champignons et les protistes. *Physarum polycephalum*, organisme possédant plusieurs noyaux contenus dans un seul cytoplasme, a également la capacité de fusionner avec d'autre corps cytoplasmiques. Son cycle de vie, illustré par la figure 1.7, se divise en dix phases.

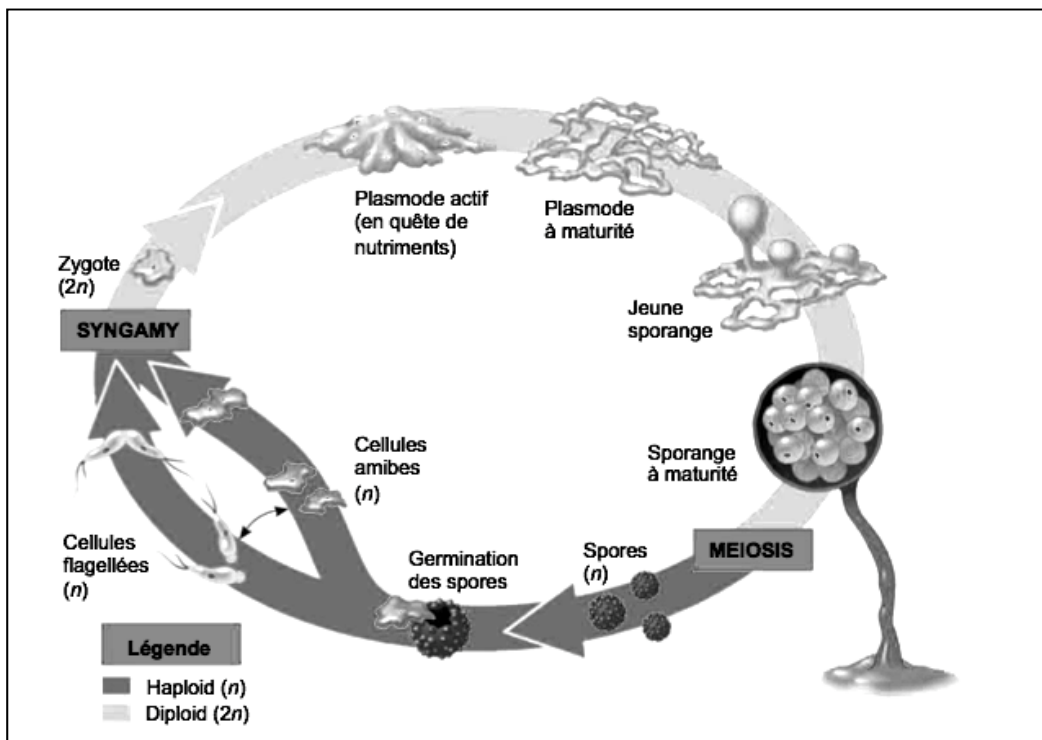


Figure 1.7 Cycle de vie de *Physarum polycephalum*
Adaptée de Campbell et Reece (2005)

La sporulation, état de reproduction sexuelle, peut être provoquée par un manque de nourriture, par l'exposition prolongée à la lumière, la maturation du plasmode ou encore par certains changements environnementaux tels que le pH du substrat, la température ou le niveau d'humidité. (Nakagaki *et al.*, 2001) À partir du moment où la sporulation est entamée, le phénomène de méiose se produit et le plasmode forme un corps sexuel contenant les spores destinés à être relâchés dans l'air afin de permettre la reproduction de l'organisme. Lorsque les spores se trouvent dans un environnement où les conditions idéales sont réunies (humidité, luminosité, nutriments, température), ils éclosent et relâchent les cellules amiboïdes qui fusionnent ensuite les unes aux autres pour former le plasmode. La dimension du plasmode varient entre 10 μm et 1 m. (Takamatsu *et al.*, 2008) Cet organisme est un système multinucléé qui peut se diviser en plusieurs parties ou fusionner à d'autre plasmode ou cellules amiboïdes sans altérer ses fonctions biologiques. La formation du plasmode est la principale phase de vie de l'organisme *Physarum polycephalum*. À l'état de plasmode, l'organisme ressemble à une masse visqueuse de couleur jaune et prend la forme de veines protoplasmiques se mouvant grâce aux flux internes allant d'avant en arrière. (Haskins, 2008) Ce mouvement est également combiné à un phénomène de contraction-relaxation de la membrane cytoplasmique permettant la diffusion des nutriments et des signaux chimiques à l'intérieur du corps, tout en procurant à l'organisme la capacité de se déplacer et de se transformer afin de trouver une source de nourriture ou de s'adapter à son substrat. (Nakagaki *et al.*, 2004)

Lorsque *P. polycephalum* trouve une ou plusieurs sources de nutriments, les veines protoplasmiques n'ayant pas atteint de substances nutritives se rétractent et se dirigent vers les sources de nutriments détectées afin de les recouvrir totalement par le corps protoplasmique. Ainsi, l'organisme prend la forme d'un réseau constitué de veines protoplasmiques interconnectées afin d'assurer le transport des nutriments et de l'information à travers le plasmode, et ce, de manière à obtenir un tracé résilient. (Nakagaki *et al.*, 2000; 2001) Les recherches de Nakagaki *et al.* (2001) décrivent le comportement de *Physarum polycephalum* par les deux règles empiriques suivantes :

- 1) les veines protoplasmiques n'étant pas connectées à une source de nourriture disparaissent;
- 2) lorsque deux veines ou plus connectent une même source de nourriture, la veine la plus longue tend à disparaître.

En effet, les veines liées à une source de nutriment émettent des signaux chimiques plus importants que les veines errantes. Cela provoque un changement de pression hydrostatique induite par la contraction rythmique de la membrane cytoplasmique, ce qui a pour effet d'augmenter l'épaisseur des veines afin d'accélérer le flux des nutriments dans le corps. (Nakagaki *et al.*, 2004) « En formant un réseau constitué de veines courtes et épaisses, l'organisme optimise ses chances de survies de deux manières : 1) l'aire de son corps couvrant la source de nourriture et absorbant les nutriments est maximisée et 2) la communication intracellulaire via l'échange de signaux chimiques entre la position des sources de nourriture est optimisée. » (Tero *et al.*, 2006, traduction libre) De plus, Nakagaki *et al.* (2000) ont testé les limites de *P. Polychephalum*, et ce, en évaluant la capacité de l'organisme à trouver le plus court chemin à l'intérieur d'un labyrinthe ayant quatre solutions possibles de longueurs distinctes. Les résultats démontrent que *Physarum polycephalum* choisi la solution ayant la distance la plus faible, et ce, pour chacune des expériences effectuées.

La fonction biologique de la moisissure visqueuse *Physarum polycephalum* est de former des réseaux liant des sources de nourriture de manière à établir des connections directes et maillées afin d'améliorer l'efficacité du réseau. L'organisme crée ainsi un réseau ayant une faible distance totale, une faible distance moyenne entre chaque source de nourriture et une forte robustesse face aux ruptures accidentelles. (Tero *et al.*, 2010) Les caractéristiques relevées dans les réseaux formés par *Physarum polycephalum* sont également recherchées dans le tracé de réseau de transport terrestre. Ainsi, un réseau de transport performant présente :

- 1) une faible distance totale afin d'être efficient dans l'utilisation des ressources matérielles et énergétiques;
- 2) une faible distance moyenne entre chaque paire de points afin de minimiser le temps de transport entre l'origine et la destination;
- 3) un faible degré de séparation entre chaque paire de points où le trajet emprunté ne fait aucun ou peu de détours par d'autres points;
- 4) un nombre élevé de trajets totaux potentiels afin d'offrir une flexibilité dans le mouvement des véhicules présents sur le réseau;
- 5) une forte résilience face aux ruptures afin de maintenir la connexion entre chacun des points à desservir;
- 6) un faible coût qui représente le bénéfice entre robustesse et distance totale (Nakagaki *et al.*, 2004).

1.3.3 Modèle informatique

Parallèlement, d'autres méthodes ont été développées à l'aide d'outils informatiques afin de simuler le comportement de la moisissure visqueuse en s'appuyant sur les deux règles suivantes : (1) les veines n'étant connectées à aucune source de nourriture ou autres veines protoplasmiques ont tendance à disparaître et (2) lorsque deux tronçons ou plus lient la même paire de source de nourriture, le tube le plus long tend à disparaître. (Nakagaki *et al.*, 2001) Les différents modèles informatiques développés permettent d'obtenir des tracés équivalents au modèle biologique.

Tout d'abord, le modèle informatique utilisé dans la présente recherche s'appuie sur les travaux de Semmler (2011) et permet de générer des résultats en simulant des conditions physiques (substrat, pH, température, humidité, luminosité) idéales. Le logiciel CompuCell3D (CCD) est utilisé afin d'effectuer les simulations. Le modèle informatique s'appuie sur une banque de données ouvertes (*Cellular-Potts-Model*) où les comportements de plusieurs organismes, dont *Physarum Polycephalum*, sont déjà modélisés. Afin de reproduire le comportement de la moisissure de manière virtuelle, un ensemble de règles et

de contraintes a été établi en se basant sur les études de Tero (2006, 2007, 2010) et Nakagaki (2000, 2001, 2004). Leurs études relèvent et synthétisent la dynamique des réactions de *Physarum Polycephalum* à différents stimuli, permettant par la suite de simuler le mouvement et les comportements de l'organisme à l'aide d'algorithmes. Dans le cas du modèle de Semmler (2011), l'algorithme se base sur cinq (5) fondements, soit :

- 1) les tubes les plus longs et étroits qui ne sont pas connectés à une source de nourriture disparaissent (Nakagaki *et al.*, 2004);
- 2) la grandeur d'un tube est limitée (connaît un maximum) (Tero, 2007);
- 3) un flux croissant augmente la grandeur du tube (Tero, 2007);
- 4) les nutriments sont distribués de manière aléatoire à l'intérieur du corps protoplasmique (Nakagaki, *et al.*, 2000);
- 5) la quantité de nourriture n'affecte que l'échelle de temps de la simulation (Kakagaki, *et al.*, 2001).

L'algorithme utilisé est construit de manière à calculer la force énergétique du flux protoplasmique à l'intérieur de l'organisme en identifiant quelles cellules sont connectées à quoi (à une autre cellule ou à une source de nourriture) et leurs positions. (Semmler, 2011) Ainsi, la fonction Hamiltonienne ($\mathcal{H}$) exprime le comportement général du modèle. La fonction suivante permet de simuler la croissance de l'organisme et est exprimée selon l'équation 2.1.

$$\mathcal{H} = \sum_{(\vec{i}, \vec{j}) \text{ neighbours}} J_{\tau, \tau'}(\sigma_i, \sigma_j)(1 - \delta_{\sigma_{\vec{i}}, \sigma_{\vec{j}}}) + \sum_{(\vec{i}, \vec{j}) \text{ neighbours}} \frac{J_{\tau, \tau'}(\sigma_i, \sigma_j)(\delta_{\sigma_{\vec{i}}, \sigma_{\vec{j}}})}{2} \quad (2.1)$$

Où $J_{\tau, \tau'}$ représente le flux énergétique entre deux cellules (τ et τ') et σ correspond aux cellules occupant un espace dans l'environnement virtuel construit. Le terme $(\delta_{\sigma_{\vec{i}}, \sigma_{\vec{j}}})$ est une fonction Kronecker où le delta est égal à un (1) lorsque deux cellules se retrouvent sur un même site. Les coordonnées de la grille correspondent aux vecteurs $\vec{i}$ et $\vec{j}$. (Semmler, 2011)

Deux types de contraintes peuvent être utilisées, soit attractive (source de nourriture) ou répulsive (lumière, toxicités) afin de simuler une topographie, un endroit restreint d'accès ou d'autres contraintes physiques propres à l'application du modèle. L'algorithme est organisé selon les trois parties suivantes : la direction, la structure et l'optimisation. La direction de la moisissure est déterminée par la présence de sources de nourriture. Chacune des sources émet un signal (attractif ou répulsif) afin de motiver le déplacement de la moisissure tout en évitant que l'organisme se divise en plusieurs parties ou encore qu'il se déplace en masse illisible. Ensuite, lorsqu'un tube trouve une source de nourriture, un signal attracteur est envoyé à la partie du corps la plus près et un signal répulsif est envoyé à la partie la plus éloignée. Ces signaux sont envoyés afin de compléter l'exploration de la surface et de détecter les sources de nourriture restantes dans le but de lier tous les points. Enfin, le volume du corps est contrôlé dans le but de réduire les agglutinations formant des anomalies dans la structure du réseau tout en permettant une lecture plus claire de la carte. (Semmler, 2011)

Le modèle informatique permet de simuler le comportement de l'organisme en étant libéré de la contrainte de temps vu la rapidité des itérations, et où les conditions environnementales pouvant biaiser les résultats sont inexistantes.

CHAPITRE 2

MÉTHODOLOGIE

Ce deuxième chapitre présente les méthodes, manipulations et opérations réalisées dans la présente étude. La démarche méthodologique vise d'une part à obtenir la configuration d'un réseau destiné à l'opération d'un système de transport cybernétique (STC) en milieu urbain, et d'autre part de mesurer la performance de celui-ci. Tout d'abord, la méthode utilisée afin d'obtenir la carte utilisée pour les expériences en laboratoire et les simulations informatique est présentée. La méthodologie appliquée afin de générer des configurations de réseaux sera passée en revue, et ce, pour le modèle biologique et informatique. La dernière section discute des outils d'analyse utilisés afin de mesurer la performance des réseaux obtenus.

2.1 Sélection des lieux à desservir pour la zone à l'étude

La zone à l'étude pour laquelle les modèles seront utilisés est présentée dans cette section. Cette zone englobe plusieurs centres d'intérêts économiques, commerciaux, institutionnels et culturels. Tout d'abord, lors de la sélection des nœuds à desservir, les stations de métro ont été priorisées. Puis, les lieux générateurs d'emplois et les institutions scolaires ont été sélectionnés. Enfin les lieux culturels ont été ciblés. La figure 2.1 illustre les points attracteurs sélectionnés dans la zone à l'étude.

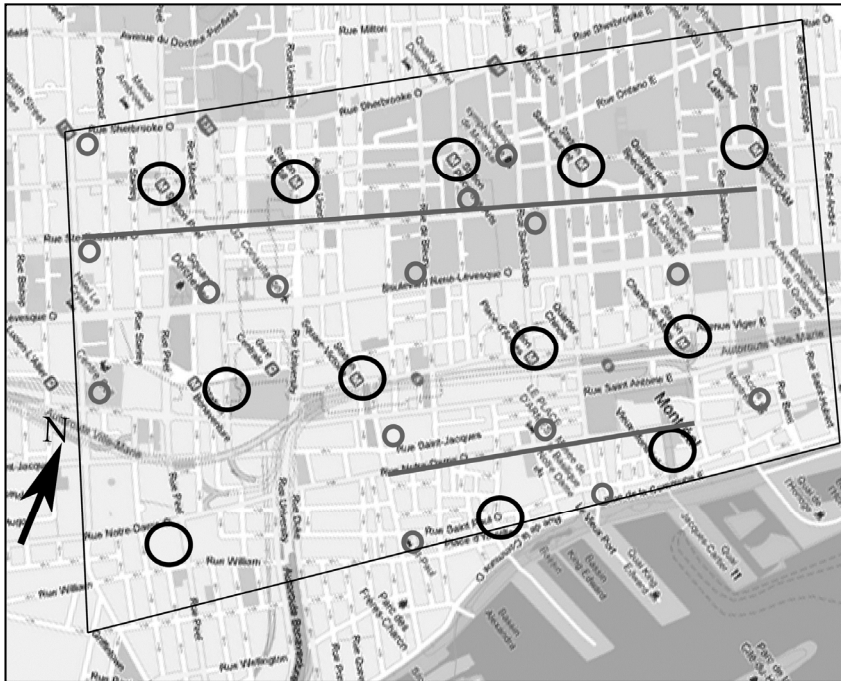


Figure 2.1 Points attracteurs présents dans la zone à l'étude

Ainsi, les douze cercles noirs présents sur la figure 2.1 représentent les lieux les plus attracteurs de la zone à l'étude. Les institutions universitaires, lieux culturels achalandés, les stations de métro et la gare centrale sont sélectionnés afin d'obtenir un réseau qui est intégré aux autres modes de transport de masse, qui offre un potentiel d'achalandage suffisant afin d'assurer la rentabilité de l'infrastructure et qui assure une bonne visibilité afin de promouvoir son usage. Par ailleurs, plusieurs autres lieux d'intérêts sont présents à l'intérieur du périmètre à l'étude et sont représentés à l'aide de cercles gris. Ceux-ci correspondent soit à des lieux culturels comme les musées, théâtres ou espace de diffusion (Place Bonaventure, Palais des congrès), soit à des bâtiments institutionnels comme les universités et bâtiments consacrés aux fonctions publiques (Chambre de commerce), soit à un lieu commercial ou touristique comme les grands centres d'achats et les places publiques. Les deux lignes horizontales représentent des artères commerciales achalandées. Ainsi, la conception d'un réseau liant ces douze nœuds permet de desservir la zone et les divers lieux attracteurs tout en liant les différents modes de transport en commun présents afin de répondre à la forte demande de mobilité induite par les secteurs d'activités de la zone.

2.2 Méthode appliquée selon le modèle utilisé

Les procédures suivies pour les deux types de modèles utilisés, soit biologique et informatique afin d'obtenir des tracés pouvant supporter un réseau de STC seront ici décrites. Tout d'abord, le matériel utilisé et le protocole suivi lors des expériences en laboratoire, correspondant au modèle biologique (P.p.), sont détaillés. Puis la démarche réalisée lors de l'utilisation du logiciel CompuCell3D (CCD), logiciel informatique servant de modèle mathématique, y est discutée.

2.2.1 Modèle biologique

Des manipulations en laboratoire ont été effectuées afin d'observer la manière dont la moisissure visqueuse *Physarum polycephalum* trace des réseaux pour un ensemble de point déterminé. En utilisant la carte de la zone à l'étude présentée à la figure 2.1, des nutriments et l'organisme *P. p.*, il est possible d'obtenir des configurations de réseau liant les douze (12) nœuds choisis. La méthode suivie lors des expériences en laboratoire s'appuie sur les travaux de Haskins (2008) et se structure selon trois étapes, soit la stérilisation du matériel, la préparation du substrat et la manipulation de l'organisme.

Premièrement, tout le matériel est stérilisé par l'intermédiaire d'un autoclave. Les pincettes, la petite spatule et les flocons d'avoines y sont déposés pour 40 minutes à 121 degrés Celsius. La surface de travail est également stérilisée à l'aide de l'Éthanol. Deuxièmement, le gel agar qui joue le rôle du substrat est préparé à l'aide du béccher 1L, de la poudre d'agar bactériologique et de l'eau distillée. Le béccher est rempli d'eau distillée puis la poudre d'agar y est ajoutée afin d'obtenir une concentration de 1,5%. Cette solution est également stérilisée selon la première étape. Le gel agar est ensuite versé dans des pétris afin d'obtenir un substrat d'environ 3 à 5 millimètres d'épaisseur. Lorsque le gel est ferme, la carte de la zone à l'étude est placée sous le pétri. Puis, à l'aide des pincettes, des flocons d'avoine sont déposés sur le substrat aux 12 points sélectionnés précédemment. Troisièmement, à l'aide d'une petite spatule (ou scalpel) le substrat sur lequel se trouve *Physarum polycephalum* est

découpé en blocs d'environ 10mm x 10mm. Ils sont ensuite déposés, face contre substrat dans les pétris préparés à l'étape précédente. L'organisme est déposé au centre pour la moitié des expériences et en périphérie pour l'autre moitié. Les pétris sont ensuite gardés à l'obscurité à une température entre 22 et 25 degrés Celsius pour une période de 48 à 55 heures. Toutes les manipulations se produisent sous une hotte et près d'une flamme afin de garder le matériel stérile. Des photos ont été prises au début de l'expérience, 24 heures après et entre 48 et 55 heures suivant le début de l'expérience.

2.2.2 Modèle informatique

Le modèle mathématique construit par Semmler (2011) à l'aide du logiciel CompuCell3D (CCD) a également été utilisé afin d'obtenir des tracés de réseau potentiel en simulant des conditions environnementales absolues. Tout d'abord, le tracé de la carte représentant la zone à l'étude est réalisé à l'aide du logiciel complémentaire PIFFtracer. Lors de cette étape, les sources de nourriture, les limites de la zone et la quantité de cellules présentes sont modélisées. Ensuite, la carte et ses paramètres sont importés dans le logiciel.

Différentes contraintes peuvent être définies afin de simuler divers types d'environnements, telles que la direction, la connectivité des cellules, la vitesse et viscosité du flux, le volume du corps cellulaire, l'attractivité ou la répulsion des sources de nourritures. Dans le cas des simulations réalisées lors de la présente étude, une variation de $\pm 20\%$ est effectuée sur la valeur d'origine correspondant à 80 unités cellulaires formant le volume idéal du corps (V_t). Cette variation est effectuée afin d'obtenir une image claire et lisible, tout en diminuant les agglutinations aux sources de nourriture. L'équation mathématique 2.2, tirée de Semmler (2011), permet d'ajuster le volume du corps protoplasmique au modèle d'origine.

$$\mathcal{H}' = \mathcal{H} + \lambda_{\tau}(v_{\sigma} - V_{\tau}) \quad (2.2)$$

λ_{τ} : le poids de la contrainte;

v_{σ} : le volume réel pour chaque cellule;

V_{τ} : le volume idéal du corps cellulaire.

Toutes les images finales provenant du modèle biologique et informatique sont ensuite traitées à l'aide de DraftSight, un logiciel de conception assistée par ordinateur permettant de tracer les configurations obtenues, et ce, afin d'obtenir une image plus nette, tout en mesurant les distances exactes de chaque tronçon.

2.3 Outils d'analyse

Les procédures suivies afin d'extraire les données nécessaires à l'analyse des résultats sont présentées dans cette section. Tout d'abord, les critères de validité des configurations à analyser sont précisés. Les graphiques retenus sont ensuite traités à l'aide d'algorithmes permettant d'extraire les données préliminaires. La deuxième partie discute de l'algorithme de Dijkstra, ici utilisé afin de connaître le nombre total de trajets potentiels, le nombre de trajets indépendants entre chaque paires de points, et des modifications apportées à celui-ci afin de simuler des ruptures aléatoires. Enfin, les caractéristiques graphiques sont définies et les indicateurs de performance permettant d'évaluer l'efficacité des graphiques sont présentés.

2.3.1 Sélection des réseaux et critères de validités

Suites aux expériences en laboratoire et aux itérations informatiques, des configurations ont été obtenues. Seuls les réseaux répondant aux critères de sélection suivants ont été retenus :

- 1) tous les points de la carte sont liés par au moins un tronçon afin de desservir tous les nœuds présent dans la zone à l'étude;
- 2) plus de la moitié des points sont liés par deux tronçons afin d'obtenir un réseau présentant un nombre maximal de trajet indépendant entre chaque pair de nœud;
- 3) le tracé du réseau est clair et ne présente que peu ou pas d'agglutination afin de rester fidèle au tracer des configurations obtenues par l'entremise des deux modèles.

Avant de débiter l'analyse des cartes à l'aide du logiciel MATLAB, une matrice carré symétrique doit être générée pour chaque réseau sélectionné. Les matrices sont organisées de manière à informer sur le nombre de nœuds totaux et la distance de chaque tronçon liant les paires de points i et j formant le réseau.

2.3.2 Algorithmes utilisés lors de l'analyse graphique

L'algorithme de Dijkstra a pour fonction de trouver la plus courte distance entre deux points. À l'aide de la matrice décrite précédemment, l'algorithme classe la distance des tronçons en ordre croissant, permettant de sélectionner le poids le plus faible, de nœud en nœud, afin de trouver le chemin le plus court vers la destination inscrite. L'algorithme permet également de connaître tous les autres chemins afin de lier la paire de points sélectionnée. Les trajets trouvés sont présentés en ordre croissant de distance, de même que le détail du chemin à suivre pour chaque possibilité de parcours. Ainsi, pour connaître toutes les possibilité de trajets, trois (3) variables doivent être définies : le point d'origine, le point d'arrivé et la valeur k qui représente le nombre de chemins à trouver entre l'origine et la destination. Dans le cas présent, la valeur k est fixée à 1 000 afin de permettre à l'algorithme de considérer

toutes les possibilités de trajets présentes dans le graphique. L'algorithme de Dijkstra s'exprime par l'équation 2.4 (Fredman et Tarjan, 1984) :

$$Q = O(|E| + |V| \log |V|) \quad (2.4)$$

Q : l'ensemble de nœuds du graphique et leurs poids;

V : nombre d'intersections présentes dans le graphique;

E : nombre de tronçons.

L'algorithme de Dijkstra permet également de connaître le nombre de trajets indépendants. Les trajets indépendants sont définis comme étant toutes les possibilités de route liant les paires de points i et j où les tronçons empruntés afin de lier i et j sont propres à chaque trajet. (Ip, 2009)

Puis, afin de simuler des ruptures aléatoires et d'obtenir des données sur le comportement des réseaux en situation de stress, un deuxième script a été ajouté à celui de Dijkstra. Tout d'abord, une matrice de probabilités est construite. Étant donné la symétrie des matrices créées précédemment, l'algorithme débute par trouver le triangle supérieur. Ensuite une matrice de probabilités « P » est construite à l'aide de la distance de chaque tronçon, étant donné que la probabilité de rupture d'une arrête est proportionnelle au ratio de la distance du tronçon sur la distance totale du réseau. (Nakagaki *et al.*, 2004) Le nombre total de tronçons soumis à une rupture correspond au nombre total de nœuds moins un (1). Puis, suite à la première rupture, l'algorithme calcule le nombre total de trajets restants, poursuit avec la deuxième rupture et recalcule le nombre de trajets et ainsi de suite. La simulation de ruptures aléatoires est répétée vingt-cinq (25) fois. Pour chaque simulation, une nouvelle matrice de probabilités est construite afin de générer différents scénarios de rupture.

2.3.3 Caractéristiques graphiques et indicateurs de performance

Afin de connaître l'efficacité des configurations retenues, les caractéristiques graphiques et les indicateurs de performance sont mesurés. Les caractéristiques graphiques sont les suivantes : (1) la distance totale du réseau (DT) correspond à l'efficacité de la configuration dans l'utilisation des ressources, (2) la distance moyenne entre deux points (DM) se traduit par le temps de déplacement entre chaque pair de nœuds, (3) le degré de séparation (DS) permet de connaître si les trajets offerts entre toutes les paires de nœuds sont directs et (4) le nombre de boucles (B) formant la configuration correspondent au niveau de maillage présent dans le réseau. Les indicateurs de performance sont les suivants : (5) le nombre de trajet potentiels totaux (TT) permet d'évaluer la flexibilité de trajets offerts par le réseau, (6) la résilience (R) correspond à la capacité du réseau à desservir tous les nœuds en cas de ruptures aléatoires et (7) le bénéfice par rapport au coût (C) indique si le service rendu reste avantageux par rapport à la résilience sur la distance totale. (Nakagaki *et al.*, 2004)

La distance totale (DT) est calculée à l'aide de la formule 2.5.

$$DT = \sum_{i=1}^n L_i \quad (2.5)$$

L_i : longueur du tronçon du tronçon i ;

n : l'ensemble des tronçons;

i : un tronçon.

L'équation 2.6 permet de calculer la distance moyenne (DM).

$$DM = \frac{\sum_{i=1}^n L_i}{N} \quad (2.6)$$

L_i : longueur du tronçon i ;

n : l'ensemble des tronçons;

N : le nombre total de tronçons.

Le degré de séparation (DS) est calculé à l'aide de la formule 2.7.

$$DS = \frac{\sum_{t=1}^p N_t^p}{P} \quad (2.7)$$

p : une intersection;

P : le nombre total d'intersections;

N : le nombre d'intersections traversant le trajet t ;

t : le trajet pour chaque paire de points i et j .

L'équation 2.8 permet de connaître le nombre de trajets potentiels totaux (TT).

$$TT(i, j) = \sum_{\forall k \text{ lien}(i, j)} T_k(i, j) \quad (2.8)$$

T : trajet possible entre i et j ;

k : $k^{\text{ième}}$ trajet possible entre les points i et j , pour tous les i et j ;

$\forall k$: pour tous les k liant i et j , pour tous les i et j .

La résilience (R) est calculée selon l'équation 2.9.

$$R = 1 - \left\langle \prod_{\forall k \text{ lien}(i,j)}^m L_k(i,j) \right\rangle \quad (2.9)$$

$L_k(i,j)$: la longueur du k -ième trajet indépendant entre les points i et j ;

m : les trajets indépendants pour toutes les paires i et j .

La formule suivante permet de calculer le coût (C) :

$$C = R / \left(\frac{DT}{DT_{AMS}} \right) \quad (2.10)$$

R : valeur de la résilience;

DT : valeur de la distance totale;

AMS : DT de l'AMS.

Une fois que tous les résultats sont obtenus, une analyse multicritère est réalisée afin d'évaluer l'efficacité des configurations. Les caractéristiques graphiques et les résultats des indicateurs de performances sont classés en ordre croissant ou décroissant, selon le critère recherché, soit croissant pour la DT, DM, DS et R et décroissant pour B, TT et C. Le pointage attribué à chaque indicateur correspond à son rang par rapport aux autres configurations où tous les indicateurs présentent le même poids. Enfin, la somme du pointage est calculée afin de connaître la performance globale du réseau.

CHAPITRE 3

RÉSULTATS

Le but de la recherche est de tracer un réseau regroupant les pôles attracteurs du centre-ville de Montréal permettant l'usage de cybertransport afin de répondre à la demande en déplacements de type « multiple-multiple ». Les résultats obtenus sont présentés selon la structure suivante. Tout d'abord, les configurations obtenues à l'aide des modèles mentionnés précédemment sont illustrées en présentant leurs caractéristiques graphiques. Par la suite, les réseaux sont comparés et analysés selon les indicateurs de performance. Enfin, la performance des configurations est évaluée.

3.1 Présentation des configurations des réseaux

Les différentes configurations des réseaux obtenus suite aux expériences effectuées sont ici présentées. Tout d'abord, les configurations obtenues par l'intermédiaire de l'organisme vivant sont affichées. Ensuite, les réseaux issus des simulations informatiques et l'arbre minimum de Steiner sont illustrés. Enfin, la section 3.1 se termine par une discussion portant sur les caractéristiques graphiques des configurations présentées.

3.1.1 Configuration des réseaux obtenus à l'aide du modèle biologique

Lors des expériences en laboratoire, un total de quinze (15) essais ont été effectués, et sept (7) d'entre eux ont été retenus. Les figures 3.1 a) à g) représentent les réseaux formés par l'organisme *Physarum polycephalum* ayant répondu aux critères de sélection. Les caractéristiques graphiques, la distance totale (DT), la distance moyenne (DM), le degré de séparation (DS) et le nombre de boucles (B) présentes dans le réseau est également présentées pour chaque configuration.

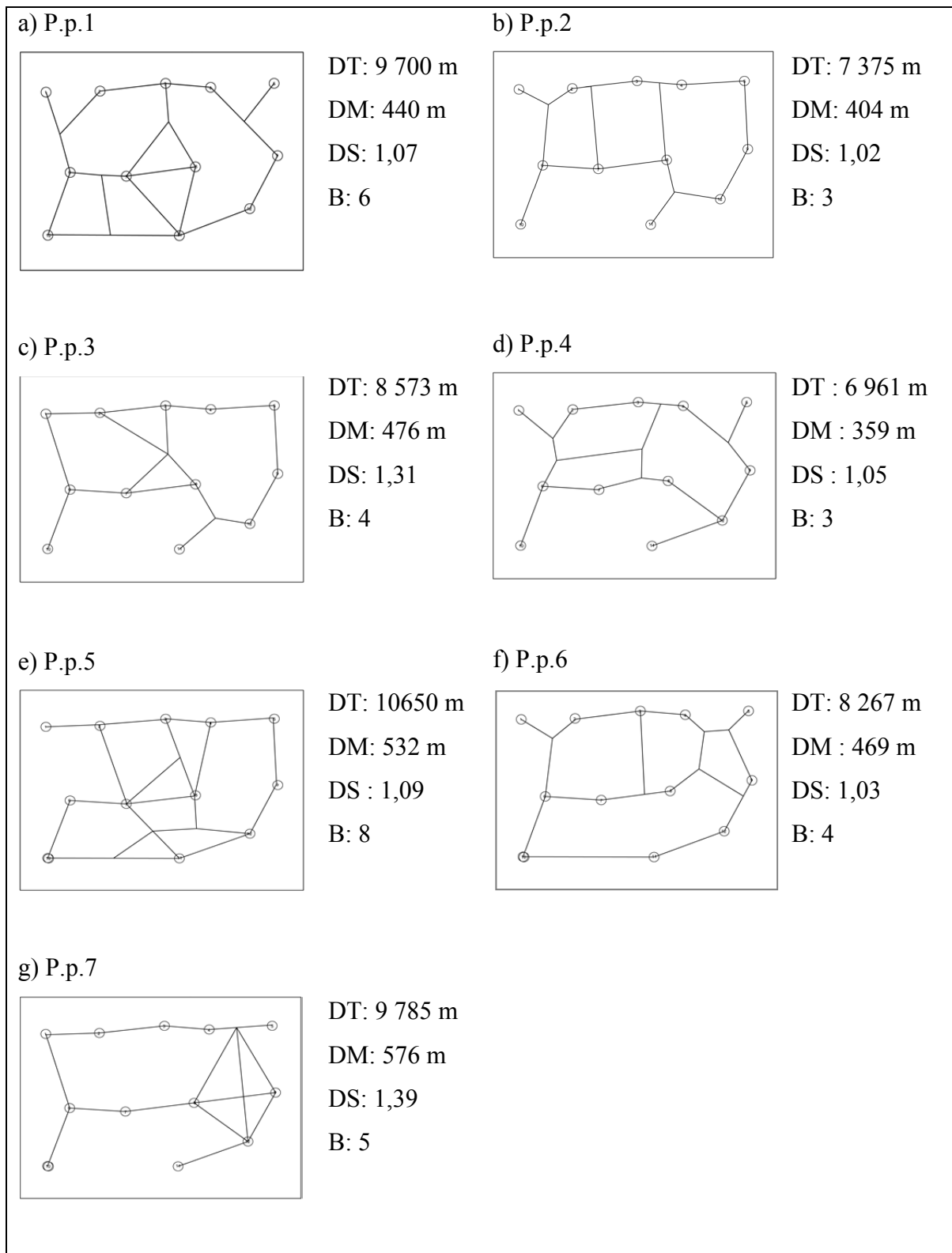


Figure 3.1 a) à g) Configurations des réseaux obtenus à l'aide du modèle biologique

3.1.2 Réseaux obtenus à l'aide des simulations informatiques et l'AMS

Les sept (7) configurations illustrées par les figures 3.2 a) à f) présentent les résultats obtenus pour le modèle CCD et la configuration de l'AMS.

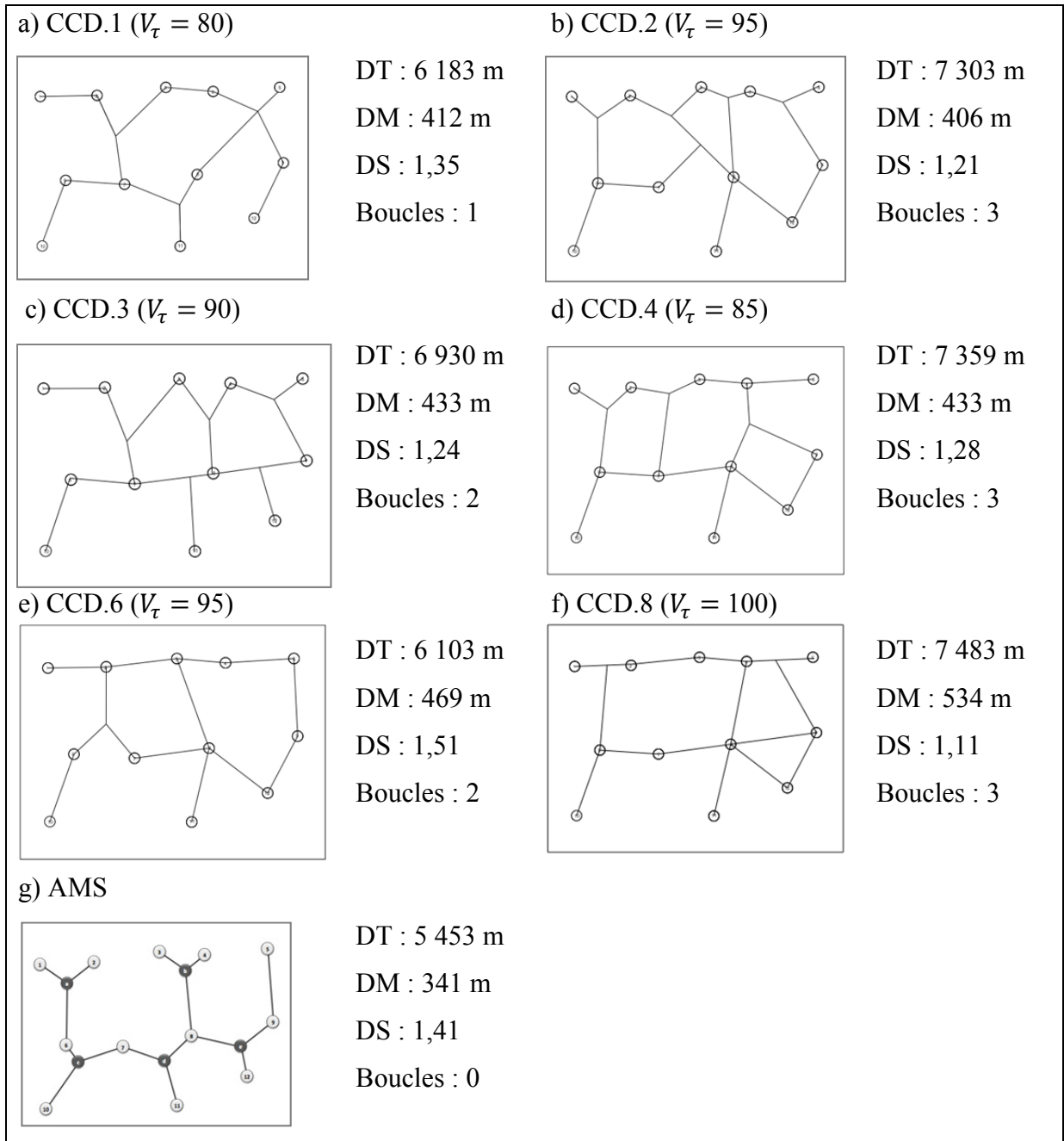


Figure 3.2 a) à f) Configurations issues du modèle informatique et g) l'AMS

3.1.3 Analyse des caractéristiques graphiques

De toute évidence, lorsque comparées entres elles, les configurations obtenues sont hétérogènes. Les variations du modèle biologique sont interprétées par le fait que celui-ci est un organisme vivant. Soumis aux pressions environnementales comme la lumière, la qualité et quantité de la nourriture offerte, la qualité du substrat, l'humidité et la température ambiante, le comportement de l'organisme est imprévisible et celui-ci, malgré les règles qui régissent le mouvement cellulaire protoplasmique, forme des configurations en fonction de son état immédiat. De plus, bien que la quantité de *Physarum polycephalum* utilisée reste la même pour chaque expérience, la qualité de l'organisme et son avancement dans les phases de vie est un paramètre qui ne peut être totalement contrôlé. Il est vrai de dire que le modèle *P.p.* relève de l'approche heuristique où ce sont les expériences successives qui permettent de dégager des tendances afin de connaître la solution optimale. Ainsi, le but des expériences en laboratoire n'est pas d'obtenir une configuration redondante et optimale mais bien de comprendre, par l'entremise des itérations, les caractéristiques nécessaires afin d'obtenir un réseau performant. Par ailleurs, les variations des configurations issues du modèle informatique sont moins disparates. Se trouvant constamment sous des conditions environnementales idéales, et contrôlé par des paramètres définis à même le modèle, le comportement de l'organisme lors des simulations informatiques reste constant. Ainsi, ce modèle se base sur une approche algorithmique ayant comme but de trouver la solution par l'entremise d'une démarche mathématique suivant des règles de calcul et une logique basée sur le modèle biologique permettant d'atteindre la solution optimale. Par conséquent, les configurations CCD diffèrent légèrement entres-elles dû aux variations effectuées pour le paramètre d'attractivité des sources de nourriture lors des itérations.

Les deux modèles, l'un étant organique et le second informatique, génèrent des résultats différents. Malgré le fait que certaines configurations présentent des ressemblances, de manière générale, les réseaux présentés aux figures 3.1 et 3.2 ont tous une configuration distincte. C'est donc par l'étude des caractéristiques graphiques et des indicateurs de performance que le réseau le plus optimal est identifié.

3.2 Comparaison des résultats selon les indicateurs de performance

Les résultats obtenus et présentés précédemment sont ici analysés selon les qualités graphiques et les indicateurs de performance. Tout d'abord, les qualités graphiques, soit DT, DM, DS et B sont comparées et analysées. Puis, l'étude de la robustesse du réseau est réalisée par l'intermédiaire des indicateurs suivants : le nombre de trajets potentiels totaux (TT), la résilience (R) et le coût (C) afin de déterminer la performance de chaque configuration.

3.2.1 Études des réseaux selon les qualités graphiques

Tout d'abord, les configurations obtenues sont comparées et analysées entre elles selon leurs qualités graphiques. Le tableau 3.1 affiche le détail des caractéristiques graphiques et les résultats obtenus pour les indicateurs de performance des réseaux présentés précédemment.

Tableau 3.1 Résultats obtenus pour toutes les configurations retenues

	Caractéristiques graphiques				Indicateurs		
	DT (m)	DM (m)	DS	Boucle	TT	R	C
P.p.1	9 700	441	1,08	6	1 625	0,94	0,53
P.p.2	7 375	404	1,02	3	378	0,87	0,65
P.p.3	8 573	476	1,32	4	512	0,89	0,56
P.p.4	6 961	359	1,05	3	412	0,84	0,66
P.p.5	10 650	532	1,09	8	2 641	0,96	0,49
P.p.6	8 267	532	1,03	4	727	0,93	0,61
P.p.7	9 785	576	1,39	6	2 013	0,92	0,51
CCD.1	6 183	412	1,35	1	125	0,81	0,71
CCD.2	7 303	406	1,21	3	376	0,91	0,68
CCD.3	6 930	433	1,24	2	162	0,81	0,64
CCD.4	7 359	433	1,29	3	347	0,89	0,66
CCD.6	6 103	469	1,52	2	129	0,80	0,71
CCD.8	7 483	534	1,11	3	126	0,86	0,63
AMS	5 453	340	1,41	0	66	0,73	0,73

Le tableau 3.2 affiche les valeurs moyennes, l'écart type et le coefficient de variation pour les caractéristiques graphiques des modèles utilisés.

Tableau 3.2 Valeurs moyennes des caractéristiques graphiques des configurations

		DT (m)	DM (m)	DS	B
P.p.	Moyenne	8 744	474	1,14	4,86
	Écart type	1 266	72	0,14	1,73
	Coefficient de variation (%)	14,48	15,21	12,39	35,54
CCD	Moyenne	6 893	448	1,29	2,33
	Écart type	557	44	0,13	0,75
	Coefficient de variation (%)	8,11	9,75	9,85	31,94

Utilisé comme point référentiel minimum, la configuration issue de l'AMS présente la DT et la DM la plus faible avec 5 354 m et 340 m respectivement. Les configurations obtenues par l'entremise de l'organisme *Physarum Polycephalum* (*P.p.*) affichent une DT moyenne plus élevée que celle provenant du modèle informatique (CCD) avec 8 744 m $\pm$ 1 266 m versus 6 893 m $\pm$ 557 m respectivement. Par contre, dans le cas du modèle biologique, l'écart type de la valeur moyenne de DT est deux fois plus élevé que celui du modèle CCD. Étant donné que le nombre de boucles a une incidence sur la DT, l'écart entre les valeurs s'explique par la variation de B où *P.p.* présente entre 3 et 8 boucles, avec un B moyen de 4,86 $\pm$ 1,73, tandis que CCD présente entre 1 et 3 boucles, avec une moyenne de 2,33 $\pm$ 0,75. Ainsi, les réseaux issus du modèle biologique présentent en moyenne deux fois plus de boucles que les réseaux obtenus par le modèle informatique. L'écart entre les valeurs de B pour *P.p.* est 2,3 fois plus élevé par rapport aux configurations CCD, ce qui explique un écart type élevé pour la valeur de DT. Lorsque les réseaux sont comparés par rapport à la valeur moyenne de la DM de chaque tronçon, le scénario reste semblable. L'AMS présente la DM la plus faible avec 341 m, le modèle *P.p.* présente la DM la plus élevée avec 474 m $\pm$ 72 m, tandis que le modèle CCD se situe à l'entre-deux avec 448 $\pm$ 44 m. De plus, la valeur de l'écart type pour

la DM moyenne de *P.p.* est 1,63 fois plus élevée que la valeur analogue de CCD. De plus, les configurations issues du modèle *P.p.* ont un DS plus faible que celui de CCD. C'est le nombre élevé de boucles qui explique un DS plus faible. Une configuration ayant un B élevé offre plusieurs possibilités de trajets, ce qui réduit le nombre de détours nécessaires afin de rejoindre les différentes paires de points à desservir. Ainsi, plus un DS est faible, plus le trajet sera direct entre *i* et *j*.

Ce sont les configurations du modèle biologique qui présentent le coefficient de variation le plus élevé, et ce, toutes caractéristiques graphiques confondues. La variation des résultats pour le modèle biologique se rapproche de 15%, tandis que le modèle CCD présente des variations inférieures à 10%. Les configurations obtenues par le modèle biologique présentent des données plus hétérogènes que le modèle CCD. De manière générale, l'écart entre les données reste inférieur à 15%, sauf pour le nombre de boucles (B) où le coefficient de variation est supérieur à 30%. Ainsi, la caractéristique graphique B est celle qui varie le plus, et ce, indépendamment des autres caractéristiques graphiques.

De plus, le nombre de boucles influence la distance totale du réseau de manière linéaire, où la DT augmente avec le nombre de boucles. La figure 3.3 illustre la DT selon le nombre de boucles, pour tous les modèles.

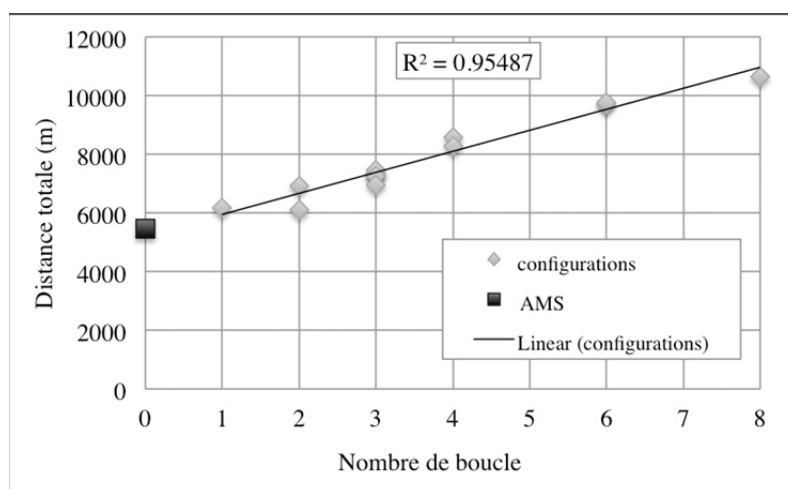


Figure 3.3 Distance totale selon le nombre de boucle pour tous les modèles

Évidemment, n'ayant aucune boucle, l'AMS présente la DT la plus faible. Le coefficient de détermination (R^2), calculé avec les données issues du modèle *P.p.* et CCD correspond à 0,95. Ainsi peut on dire que la relation entre B et DT est fortement significative. Cependant, lorsque la distance moyenne (DM) est observée selon le nombre de boucles, la relation n'est pas significative. La valeur de R^2 , lorsque calculée en excluant l'AMS, est de 0,31, ce qui confirme que la DM varie indépendamment du nombre de boucles. La relation entre B et DS est également non significative avec un R^2 de 0,43.

Compte tenu de ce qui précède, le modèle *P.p.* présente, de manière générale, une DT et une DM plus élevée que le modèle informatique. Ceci s'explique par le fait que le modèle naturel affiche un plus grand nombre de boucles que le modèle informatique. Lorsque le ratio de la DT et de la DM sur B est observé, le scénario s'inverse. Le tableau 3.3 affiche la valeur moyenne des résultats obtenus, l'écart type et le coefficient de variation pour tous les modèles utilisés.

Tableau 3.3 Ratio de la distance totale et distance moyenne par rapport au nombre de boucles

	AMS	<i>P.p.</i>	CCD
DT/B	5 453	1 933	3 347
Écart type	n/a	379	1 323
Coefficient de variation %	n/a	20	40
DM/B	341	106	220
Écart type	n/a	26	93
Coefficient de variation %	n/a	24	42

Étant donné que l'AMS ne compte qu'une seule configuration, les données concernant l'écart type et le coefficient de variation sont non existantes. C'est le modèle *P.p.* qui présente les résultats les plus bas. En effet, tel que discuté précédemment, le nombre de boucles élevé

pour les configurations obtenues par le biais de $P.p.$ a une incidence sur la DT. Lorsque que le ratio est appliqué, les résultats démontrent que la DT pour $P.p.$ est deux fois moins élevée que celle de CCD, ce qui est aussi vrai pour la DM. De plus, l'écart type pour le ration DT/B est d'environ 3,5 fois moins élevé pour $P.p.$ que pour CCD. Ainsi, plus le nombre de boucles augmente, moins grand devient l'écart entre les valeurs de DT par rapport à B. Par conséquent, une configuration ayant un nombre élevé de B aura une DT plus élevée et sera plus avantageux dans le sens où l'utilisation de la DT est plus efficiente qu'un réseau présentant un faible nombre de boucles.

3.3 Étude des indicateurs de performance et évaluation de la performance

La capacité du réseau à maintenir son intégrité est une propriété cruciale permettant d'assurer le bon fonctionnement d'un réseau de transport. Cette caractéristique est mesurée par l'entremise du nombre de trajets potentiels totaux (TT) et la capacité du réseau à fonctionner lorsque soumis à des fractures aléatoires, correspondant à la résilience (R). Ces deux indicateurs, combinés à l'étude du coût (C), permettent d'évaluer la performance des configurations obtenues. Tout d'abord, les valeurs moyennes, l'écart type et le coefficient de variation sont analysés. Puis, le comportement des réseaux en situation de stress est observé à l'aide de simulations de fractures aléatoires. Enfin, l'étude de la résilience et du coût est présentée.

3.3.1 Trajets totaux potentiels, résilience et coût

Une première analyse est réalisée à l'aide des valeurs moyennes pour les indicateurs de performance. Le tableau 3.4 affiche les résultats pour TT, R et C.

Tableau 3.4 Moyenne des résultats pour les indicateurs de performance

		TT	R	C
<i>P.p.</i>	Moyenne	1 187	0,91	0,57
	Écart type	838	0,04	0,06
	Coefficient de variation (%)	71	4,55	10,64
CCD	Moyenne	211	0,85	0,67
	Écart type	108	0,05	0,03
	Coefficient de variation (%)	51	5,33	4,78
AMS	Résultats	66	0,73	0,73

L'AMS présente les valeurs les plus faibles pour le nombre de TT et le R, et ce, pour un C élevé. Le modèle *P.p.* présente la valeur moyenne la plus élevée pour TT et R, et ce, avec la valeur moyenne de C la plus basse. Les résultats, pour le modèle CCD, se situent à l'entre-deux, où le nombre de TT est 5,6 moins élevé que pour *P.p.* et 3,2 fois plus élevé que l'AMS. Ainsi, un réseau n'ayant que peu de TT potentiels est moins résilient, et ce, pour un coût plus élevé. De manière générale, les configurations issues du modèle *P.p.* offrent un nombre élevé de trajets potentiels totaux (TT), permettant d'atteindre une plus grande résilience (R), et ce, pour un faible coût (C).

Tandis que les valeurs de R et de C ne varient que peu, les valeurs de TT, pour les modèles *P.p.* et CCD sont disparates et présentent un coefficient de variation de 71% et 51% respectivement. Ceci s'explique par la forte variation du nombre de boucle (B) pour les différentes configurations. La relation entre le nombre de TT selon le nombre de B est illustrée à la figure 3.4.

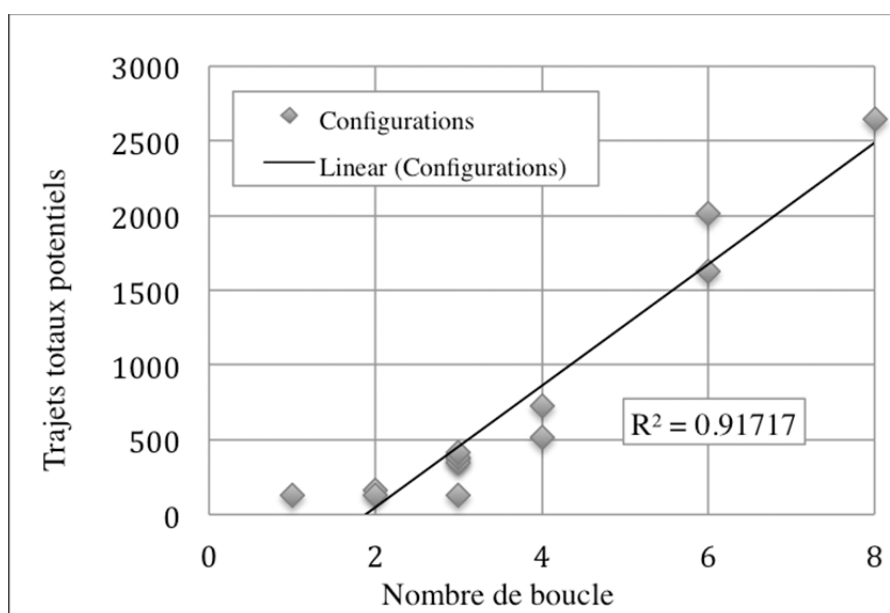


Figure 3.4 Trajet totaux potentiels selon le nombre de boucle pour toutes les configurations excluant l'AMS.

Considérant la figure 3.4, un réseau ayant un plus grand nombre de boucle offre un plus grand nombre de possibilités de trajets entre deux points. La valeur du coefficient de détermination (R^2) pour le nombre de TT par rapport à B, excluant l'AMS, est de 0,92 et corréle la relation entre B et TT. Ainsi, le nombre de boucle influence le nombre de trajets potentiels totaux, et ce, de manière linéaire.

L'étude du comportement des configurations face aux ruptures aléatoires est réalisée à l'aide du pourcentage moyen des trajets totaux potentiels (TT) restants pour chaque réseau, et ce, pour douze (12) ruptures aléatoires consécutives. Les résultats présentés à la figure 3.5 correspondent à la valeur moyenne des trajets restants et sont obtenus à partir des vingt-cinq (25) itérations de fractures aléatoires effectuées pour chaque configuration.

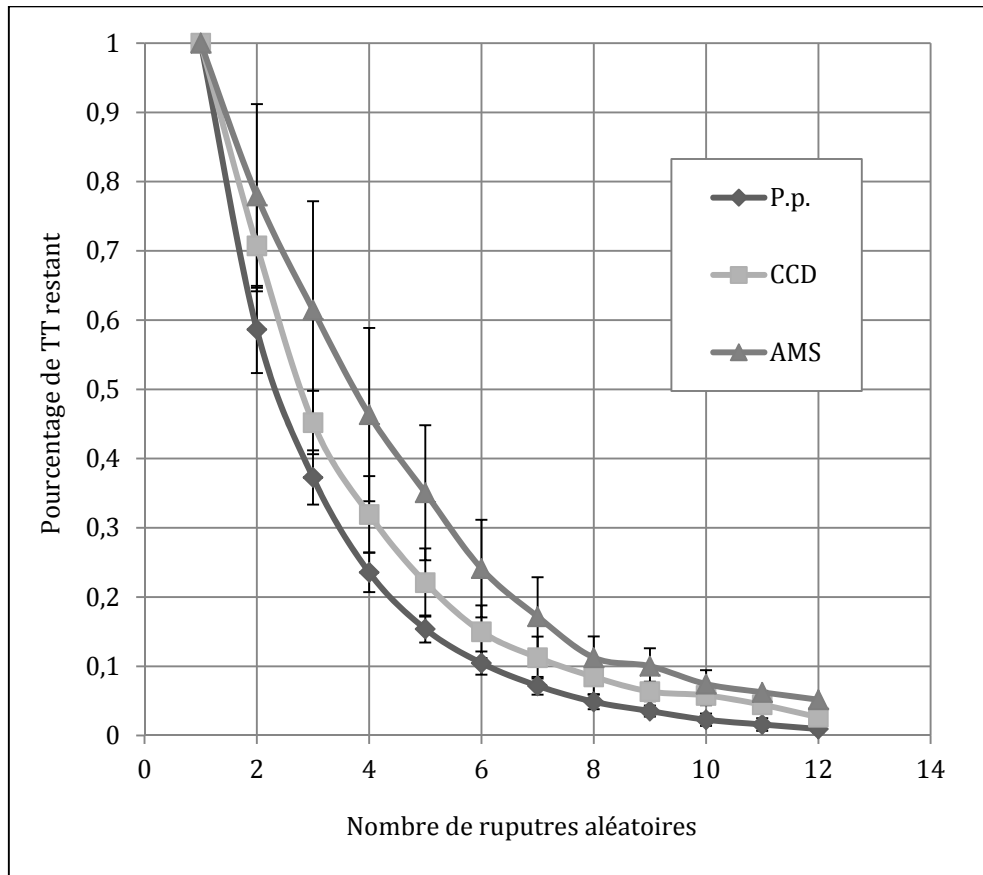


Figure 3.5 : Trajets totaux potentiels restant en fonction du nombre de fractures aléatoires

De manière générale, les configurations *P.p.* perdent un nombre de TT potentiels plus rapidement que les autres modèles. Suite à la deuxième rupture consécutive, le modèle *P.p.* réussit à maintenir en moyenne 41% et 33% des TT potentiels, tandis que les configurations CCD conservent entre 50% et 41% de leurs TT potentiels. Cette tendance persiste également pour les autres ruptures consécutives. Lorsque la quatrième rupture consécutive est observée, le pourcentage de TT restants est plus bas pour le modèle *P.p.* que pour CCD avec 17% à 13% et 27% à 17% respectivement. C'est l'AMS qui est le moins infligé par la série de fractures aléatoires. Ainsi, un réseau ayant un plus grand nombre de boucles (B) présente un nombre de TT potentiels plus élevé, mais ce nombre diminue plus rapidement lorsqu'un tronçon se fracture. Par ailleurs, l'écart type entre les valeurs est beaucoup plus élevé pour l'AMS, tandis que le modèle *P.p.* présente un faible écart type. Ainsi, un réseau ayant un plus

grand nombre de B, une DT et un TT potentiel élevé sera plus infligé lors de ruptures aléatoires des tronçons. Par contre, le comportement de celui-ci reste prévisible. Ainsi, peu importe le tronçon rompu, le réseau répond de manière constante et régulière, où le nombre de TT perdus varie peu, et ce, même si le tronçon sectionné diffère. De plus, le comportement du réseau face aux ruptures aléatoires n'est pas forcément précurseur de la résilience.

En effet, un réseau pouvant maintenir un nombre élevé de TT lors de ruptures aléatoires n'est pas nécessairement apte à conserver son intégrité et à être résilient. La résilience est exprimée ici comme étant la moyenne de la probabilité combinatoire de fractures pour tous les trajets indépendants de chaque paire de nœuds i et j . Les trajets indépendants correspondent aux routes liant i et j , et ce, où chaque trajet indépendant ne partage aucun tronçon avec les autres trajets possibles. La résilience (R) est également mise en relation avec le coût (C) étant donné que celui-ci est issu du ratio de la R sur la DT normalisée par la DT de l'AMS. La figure 3.6 illustre les résultats pour l'indicateur de R et C selon le nombre de boucles.

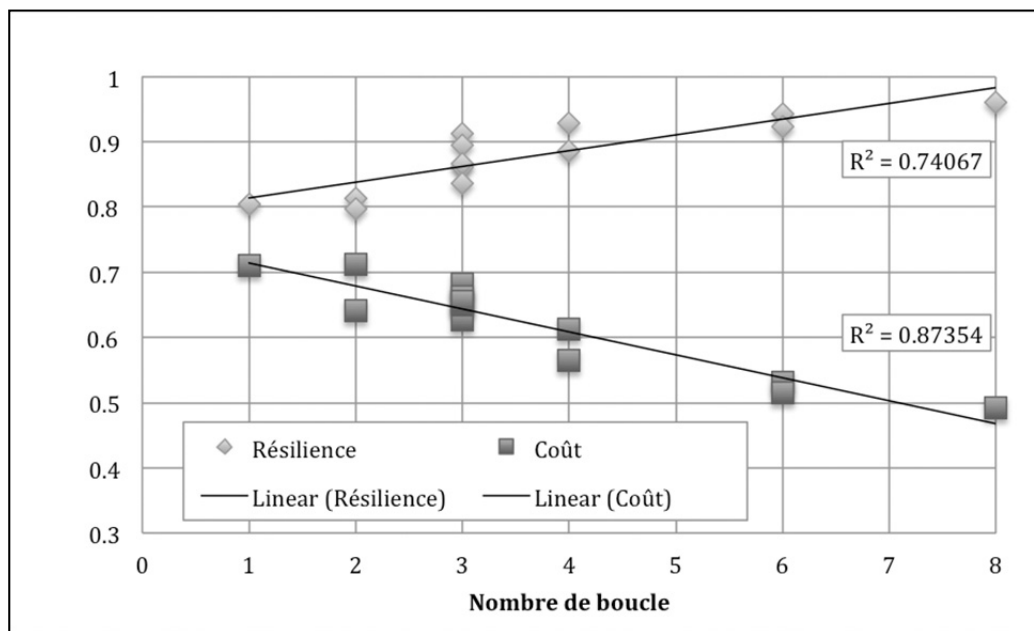


Figure 3.6 Résilience selon le nombre de boucle pour tous les modèles

Comme l'illustre la figure 3.6, le B influence la résilience (R) et le coût (C) de manière linéaire. Le R^2 calculé à partir des résultats pour le modèle *P.p.* et CCD est de 0,74 et 0,87 pour R et C respectivement. Ainsi, lorsque le nombre de boucles augmente, la résilience du réseau fait de même, tandis que le coût diminue. De plus, la régression linéaire du C connaît une pente plus abrupte que l'augmentation linéaire de R, soit 0,03 et 0,02 respectivement. Un réseau ayant un nombre de boucles plus élevé présente un nombre de tronçons et un nombre de trajets indépendants plus élevé. Par conséquent, la probabilité que celui-ci puisse maintenir une connexion entre les points i et j lors des ruptures est également plus élevée. Par ailleurs, le coût étant calculé selon la DT et la résilience, tous deux influencés par le nombre de boucles, la relation inversement proportionnelle entre R et C est prévisible. De manière générale, plus le nombre de B augmente, plus la DT, la R et le nombre de TT augmentent, tandis que le C diminue. Ainsi, le réseau étant le plus performant en terme de résilience et de coût présente un nombre de boucles (B), une distance totale (DT) et un nombre de trajets totaux potentiels (TT) élevé.

Afin d'illustrer la relation entre le nombre de TT potentiels, la résilience (R) et le coût (C), les résultats pour ces indicateurs de performance sont exprimés par la figures 3.8 présentés ci-dessous.

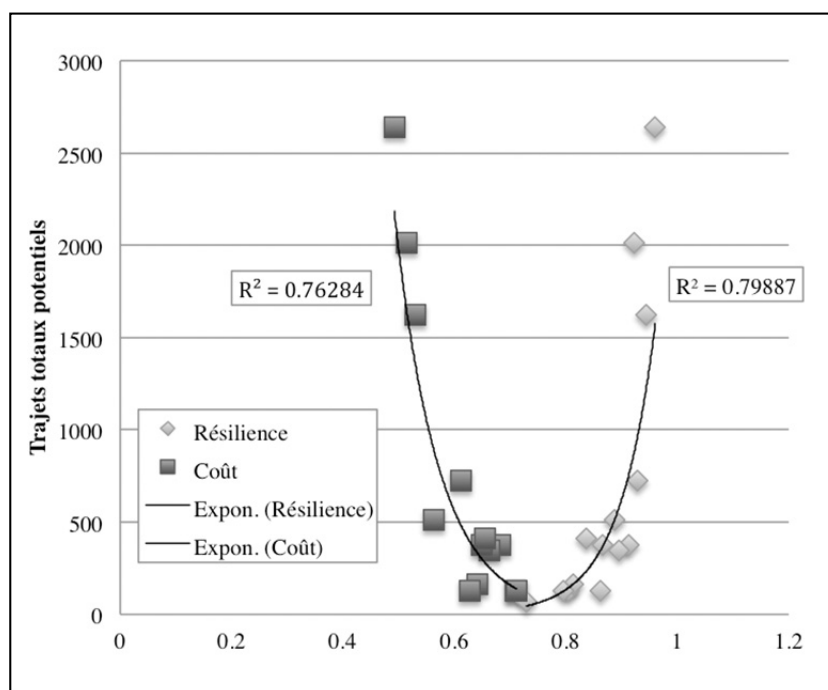


Figure 3.7 Trajets totaux potentiels selon la résilience et le coût

La figure 3.8 met en évidence qu'un nombre de TT élevé correspond à une meilleure résilience (R) et à un faible coût (C). Le coefficient de détermination exponentiel est calculé pour R et C correspond à 0,80 et 0,76 respectivement. Ainsi, la relation entre TT, R et C est corrélée. Un nombre de TT élevé, induit par un nombre de B élevé, permet d'obtenir un R élevée, et ce, pour un faible C. Ainsi, il est vrai d'affirmer que les configurations ayant un nombre de TT élevé, donc un B et une DT élevé sont plus avantageuses en terme de R et de C que celles présentant les caractéristiques inverses.

3.3.2 Évaluation de la performance des configurations

Afin d'évaluer la performance globale des réseaux, une étude multicritère est réalisée. Le pointage correspond à la somme des classements des caractéristiques graphiques et des indicateurs de performance des réseaux les uns par rapport aux autres, où chaque indicateur a le même poids, et ce, dans le but de déterminer la configuration qui présente un équilibre

entre tous les indicateurs. Le classement est fait de manière croissant pour les indicateurs de DT, DM, DS et C où une valeur faible reflète une performance accrue, et en ordre décroissant pour les indicateurs B, TT et R où la valeur élevée est témoin d'efficacité. Le tableau 3.4 affiche le classement et le pointage pour toutes les configurations étudiées.

Tableau 3.5 Analyse multicritère selon les propriétés étudiées

	DT	DM	DS	B	TT	R	C	Total
P.p.1	12	8	4	3	3	3	3	36
P.p.2	6	3	1	10	7	8	8	43
P.p.3	11	10	10	5	5	4	4	49
P.p.4	5	2	3	8	6	9	9	42
P.p.5	14	12	5	1	1	1	1	35
P.p.6	10	11	2	4	4	5	5	41
P.p.7	13	14	12	2	2	2	2	47
CCD.1	3	5	11	13	13	12	12	69
CCD.2	7	4	7	7	8	11	11	55
CCD.3	4	7	8	11	10	7	7	54
CCD.4	8	6	9	9	9	10	10	61
CCD.6	2	9	14	12	11	13	13	74
CCD.8	9	13	6	6	12	6	6	58
AMS	1	1	13	14	14	14	14	71

Les réseaux ayant le meilleur classement pour la DT et la DM, soit les réseaux issus du modèle informatique, présentent une moins bonne performance par rapport aux indicateurs B, TT, R et C. Ce sont les réseaux P.p.1, P.p.5 et P.p.6 qui ont le pointage le plus bas, soit la meilleure performance, et ce, tous indicateurs confondus. Ces réseaux présentent 6, 8 et 4 boucles respectivement, un faible degré de séparation (DS), un nombre de TT élevé, une résilience (R) élevée et un faible coût (C). C'est le réseau P.p.5 qui a le pointage total le plus faible avec 35 points. C'est également la configuration qui présente la distance totale la plus élevée, le plus grand nombre de boucles et de trajets potentiels totaux, la meilleure résilience et le coût le plus faible.

CHAPITRE 4

DISCUSSION

À l'ère où la majorité de la population mondiale vit dans les milieux urbains, le transport des personnes et des marchandises est un enjeu d'actualité. Afin de contrôler et de réduire les effets néfastes induits par l'utilisation accrue de l'automobile, des stratégies d'intervention et des politiques concernant l'accès de la voiture aux zones denses comme le centre-ville doivent être prises, et ce, en parallèle avec le développement d'un réseau de transport durable et non polluant. Ainsi, la présente recherche se penche sur la conception d'un réseau de transport cybernétique dans une optique de développement durable, afin de répondre à la demande croissante de mobilité de type multiple-multiple pour le centre-ville de Montréal.

La configuration évaluée comme étant la plus performante est adaptée à la situation urbaine de la zone à l'étude. Tout d'abord, l'étude des caractéristiques graphiques et des indicateurs de performance est réalisée afin de déterminer l'efficacité de la nouvelle configuration. Ensuite, les applications relatives à l'usage d'un réseau de transport cybernétique en milieu urbain sont discutées. Puis, le chapitre se conclut en abordant les perspectives qu'offrent les modèles employés lors de la conception d'un réseau de transport.

4.1 Études de cas

Cette recherche est axée sur la qualité d'efficience que peuvent apporter les modèles biologique et informatique à la conception d'un réseau de transport. Un réseau efficace et résilient est fortement accessible et présente une structure simple et maillée. Il est formé à partir de tronçons courts, ce qui permet d'offrir des trajets directs entre les diverses destinations. De plus, en étant connecté aux autres modes de transport, un tel réseau permet de réduire les transferts, le temps d'attente et encourage la multimodalité, tout en augmentant la vitesse moyenne de croisière. L'adaptation de la configuration retenue à la situation urbaine est faite de manière à répondre à ces critères. Puis, afin d'évaluer l'efficacité du

réseau adapté, la performance de celui-ci est évaluée et analysée en faisant une comparaison avec les autres configurations obtenues à l'aide de l'analyse multicritère.

4.1.1 Adaptation du modèle à la situation urbaine

Tout d'abord, le tracé est juxtaposé à la trame urbaine, puis adapté à celle-ci. La figure 4.1 a) correspond à la juxtaposition du réseau P.p.5 de la zone à l'étude et b) à la configuration adaptée à la trame urbaine.

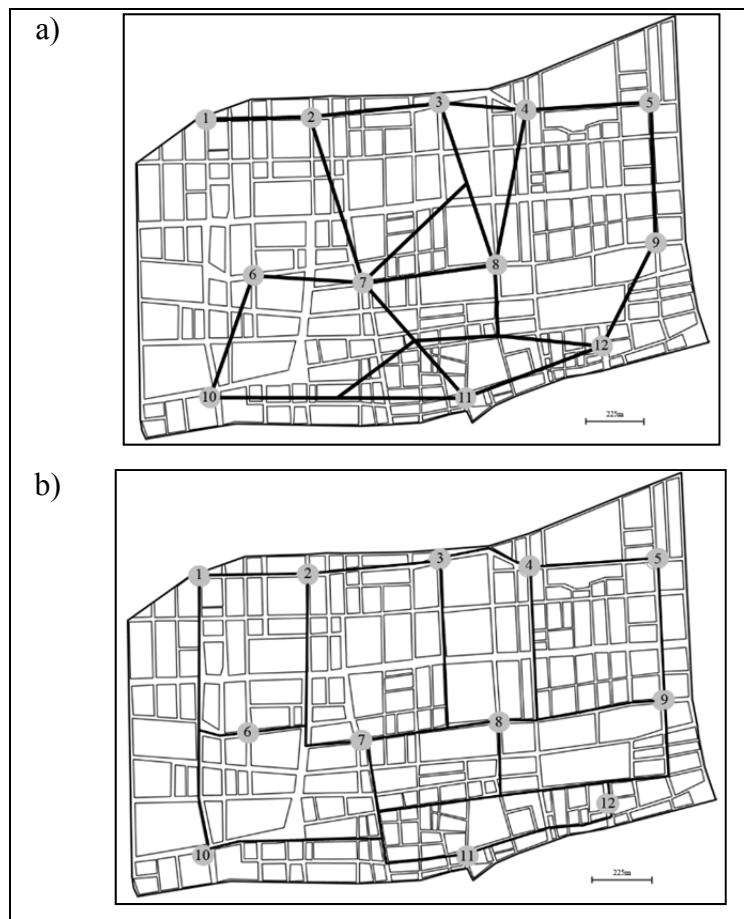


Figure 4.1 a) Réseau P.p.5 juxtaposé à la trame urbaine de Montréal et b) configuration adaptée à la situation urbaine

La configuration du réseau adapté (RA) à la situation urbaine de Montréal présente les mêmes caractéristiques que le réseau P.p.5 évalué comme étant le plus performant. Tout en respectant les critères mentionnés précédemment, la configuration du RA est faite de manière à minimiser la distance de marche afin d'atteindre une ligne. Celle-ci est calculée à partir du centre de chaque boucle, se situe entre 85 mètres et 465 mètres. La distance moyenne à parcourir afin d'atteindre un tronçon est de 261 mètres $\pm$ 94 mètres, ce qui correspond à un réseau ayant une bonne accessibilité. (STM, 2007) Ainsi, le RA est construit à partir de lignes courtes afin d'offrir des trajets directs, tout en liant les stations de métro présentes sur le quadrilatère dans le but d'encourager la multimodalité. De plus, le RA présente une configuration complètement maillée ce qui permet une grande flexibilité dans les déplacements.

4.1.2 Étude du réseau selon les indicateurs de performance

L'analyse du réseau adapté (RA) est faite afin d'évaluer sa performance. Tout d'abord, les caractéristiques graphiques et les résultats pour les indicateurs de performance sont présentés et comparés aux valeurs moyennes des modèles AMS, *P.p.* et CCD. Le tableau 4.1 présente les résultats pour tous les indicateurs.

Tableau 4.1 Caractéristiques graphiques et indicateurs de performance

	DT (m)	DM (m)	DS	B	TT	R	C
AMS	5 453	340	1,41	0	66	0,73	0,73
<i>P.p.</i>	8 744	474	1,14	5	1 187	0,91	0,57
CCD	6 893	448	1,29	2	211	0,85	0,67
RA	11 130	383	0,75	8	7 227	0,98	0,48

La distance moyenne permet d'évaluer si la configuration du réseau est construite à partir de lignes courtes et simples. Le tableau 4.1 indique que la configuration présentant une DM la plus faible est l'AMS, point référentiel minimum, suivi du réseau adapté (RA) à la situation urbaine avec 340 et 383 mètres respectivement, tandis que le modèle *P.p.* présente la valeur

la plus élevée. Ainsi, le RA répond à la première condition afin d'obtenir un réseau efficace, tout en étant plus performant que les autres réseaux générés par le modèle *P.p.* et CCD.

Par la suite, le degré de séparation (DS) permet d'évaluer si le réseau connecte les points de manière directe. C'est la configuration RA qui présente le plus faible DS avec 0,75, suivi du modèle *P.p.* avec 1,14. Le DS moyen pour le modèle CCD se situe au troisième rang avec 1,29, tandis que l'AMS présente le plus haut DS avec 1,41. Ainsi, le réseau adapté à partir du modèle *P.p.5* est considéré comme le plus direct où, pour n'importe quelle paire de points i et j , le trajet le plus court ne nécessite que rarement le croisement d'un autre point situé sur la carte. Un faible DS est également le témoin d'une forte connectivité entre les points, permettant un plus grand nombre de trajets alternatifs, réduisant ainsi la valeur de DS. Par ailleurs, le RA est la seule configuration où tous les points sont liés par au moins deux (2) tronçons, créant ainsi un réseau fermé.

La valeur de TT informe sur les possibilités de trajets offertes par les différentes configurations. La valeur de TT pour RA est six (6) fois plus élevée que la valeur moyenne du modèle *P.p.*. Ceci s'explique par le fait que la configuration du RA présente un réseau complètement fermé. Cette relation entre la forme graphique et le nombre de TT influence également R et C où R augmente lorsque les TT augmentent, tandis que C diminue.

Afin d'évaluer la performance du RA, une étude multicritère est réalisée avec le pointage des trois configurations considérées comme étant les plus performantes. Le tableau 4.2 présente le pointage lié au classement des caractéristiques graphiques et des indicateurs de performance pour les réseaux *P.p.1*, *P.p.5* et *P.p.6* et RA.

Tableau 4.2 Pointage lié au classement des indicateurs de performance

	DT	DM	DS	B	TT	R	C	Total
P.p.1	12	9	4	3	4	4	4	40
P.p.5	14	13	5	1	2	2	2	39
P.p.6	10	12	2	4	5	6	6	45
RA	15	3	1	1	1	1	1	23

Le réseau adapté (RA) a le pointage le plus élevé pour la DT, ce qui indique que cette configuration présente la plus grande DT. La distance moyenne (DM) de RA se classe en troisième position par rapport aux autres configurations. Par ailleurs, le RA présente le degré de séparation (DS) le plus faible, le nombre de boucles (B) le plus élevé, le nombre de trajets potentiels totaux (TT) le plus haut, la meilleure résilience (R) et le coût (C) le plus faible. Ainsi, le pointage total pour RA indique que cette configuration est la plus performante, et ce, tout indicateur confondu. Ainsi, il est vrai de dire que malgré une DT élevée, un réseau présentant une configuration complètement maillée et un nombre de boucles élevé sera plus performant.

Ainsi, la configuration RA est plus performante que les réseaux formés par le modèle *P.p.*, CCD et AMS, et ce, dû à la configuration ininterrompue du réseau. Il est donc avantageux de créer un réseau en boucle fermée et fortement maillé, ce qui permet d'obtenir une meilleure résilience et pour un coût plus avantageux.

4.2 Applications du modèle en milieu urbain

La présente étude cherche à créer une configuration de réseau optimale et performante, pouvant servir à l'implantation d'un STC au centre-ville de Montréal, afin de répondre aux besoins en mobilité de type « multiple-multiple ». Étant fortement achalandée, une telle zone est propice aux déplacements courts, directs et divers. De plus, le développement des centres-villes étant axé sur la densification résidentielle, le développement commerciale et culturel, ne fait qu'augmenter l'achalandage. Ce type d'espace se voit actif tout au long du jour et de la nuit. Toutes ces conditions sont favorables à l'utilisation d'un STC où le service offert permet de répondre au besoin en déplacements sur de courtes et moyennes distances. De plus, un tel réseau permet de lier facilement les divers systèmes de transports en commun déjà en place, ce qui accroît l'accessibilité des divers types de transports en commun. Disponibles en tout temps, les STC permettent de répondre à la demande de mobilité grandissante dans ces quartiers animés, tout en réduisant les effets indésirables qu'un tel achalandage peut causer lorsque les déplacements sont effectués en automobile.

Ainsi, l'implantation d'un tel système apporte plusieurs avantages tels que la réduction des GES, l'amélioration de la santé et de la qualité de l'environnement, une meilleure gestion et utilisation de l'espace urbain, une diminution de la consommation d'énergie, la réduction de la congestion routière, une meilleure équité sociale, la revitalisation et la requalification des espaces urbains denses et l'accroissement de la compétitivité. (Boucher et Fontaine, 2011) Tous ces avantages vont dans le sens du Plan d'action de développement durable 2008-2015 afin d'améliorer et de réduire la consommation d'énergie en matière de transports, tout en répondant à la Politique québécoise du transport collectif qui veut augmenter la part modale du transport en commun, et ce, en encourageant l'augmentation de l'offre et de la qualité du service. (Lavoie, 2011)

De surcroît, l'implantation et l'exploitation d'un tel système s'avèrent moins coûteuses que celui des autobus. Ainsi, un réseau STC de type Serpentine suivant le tracé du réseau adapté illustré à la figure 4.1 b) totalise un peu plus de 11 km, ce qui se traduit par un investissement estimé à près de 1,25 milliards de dollars, comparativement à 2,78 milliards pour un réseau d'autobus opérant sur le même tracé. (Lavoie, 2011) Par ailleurs, les voitures se trouvant sur le réseau ne voyagent que rarement à vide, tandis que les autobus, trains et autres services de transport en commun ne peuvent éviter cette réalité. Ainsi, les coûts liés aux déplacements sont toujours optimisés pour un réseau de STC. Les voitures, étant autoguidées, elles ne nécessitent pas de chauffeur, ce qui contribue également à la diminution des coûts d'exploitation du service. Un autre facteur avantageux concerne la consommation d'énergie par kilomètre. Le véhicule, propulsé par un moteur électrique, consomme une équivalence de 0,3 litre au 100 km versus 50 litre au 100 km pour les autobus. (Lavoie, 2011) Réduisant ainsi la consommation d'énergie, le STC n'émet qu'une très faible quantité d'émissions polluantes, soit 0,0073 kg de CO₂ par personne contre 0,0711 pour les autobus, et 0,0061 de NO_x (g/litre) versus 0,26 respectivement. (Lavoie, 2011)

4.3 Les perspectives

Les perspectives qu'offrent les modèles *P.p.* et CCD dans la conception d'un réseau de transport sont abordées en discutant de l'utilisation du modèle en tant qu'outil de référence lors de la conception d'un réseau de transport. Puis, les perspectives par rapport à l'évaluation de la performance selon l'utilisation et les variations des flux sont dégagées.

4.3.1 Outil de référence et d'aide à la prise de décision

L'organisme *Physarum polycephalum* est déjà utilisé par plusieurs chercheurs afin de comparer et mesurer l'efficacité des réseaux déjà en place. En effet, les travaux de Tero *et al.* (2010) font une comparaison entre le réseau ferroviaire de Tokyo et la configuration créée en laboratoire par *Physarum polycephalum*. Le réseau formé par l'organisme présente une forte ressemblance au réseau construit en termes de coût, d'efficacité et de résilience. Le même type de recherche a été effectuée pour le Mexique, le Royaume-Unie, les Pays-Bas, et pour la péninsule Ibérique. (Adamatzky et Alonso-Sanz, 2011) Dans tous les cas, les réseaux formés par *Physarum polycephalum* affichent des fortes ressemblances avec les réseaux ferroviaires et routiers des pays étudiés. Par contre, les configurations ne correspondent pas parfaitement aux infrastructures en place étant donné l'aspect économique et politique qui influencent le tracé de celles-ci mais qui ne sont pas considérés par le modèle biologique ou informatique. Comme dans la présente recherche, il est difficile d'obtenir un tracé qui répond aux contraintes géographiques, physiques ou topographiques de la zone à l'étude. De plus, la plupart des études analogues portant sur les réseaux de transport portent sur l'échelle nationale plutôt qu'urbaine, étant donné les particularités de la trame des villes. Étant très raffiné, il est laborieux de créer un substrat pouvant modéliser les rues tout en étant navigable pour l'organisme. C'est pourquoi le réseau présentant la meilleure performance a été adapté à la situation urbaine de la zone à l'étude.

Par ailleurs, les usages du modèle développé sont variés. En effet, les réseaux générés à partir du modèle *P.p.* et CCD peuvent être utilisés comme un point de référence lors de la conception de réseaux ferroviaires ou routiers et peuvent être appliqués à l'échelle nationale, régionale ou urbaine, au transport en commun ou aux pistes cyclables. Le modèle peut également être transposé à n'importe quel autre type de réseau comme les réseaux d'alimentation électrique ou encore de télécommunication. Par ailleurs, dépendamment des critères correspondants aux différentes caractéristiques et indicateurs de performance (distance total, distance moyenne, degré de séparation, boucle de rétroaction, trajets totaux potentiels, résilience et coût), il est possible de choisir la configuration qui convient le mieux aux besoins spécifiques selon le type d'infrastructure. La performance du réseau peut être évaluée par l'entremise d'une analyse multicritère en faisant varier le poids des indicateurs selon la performance recherchée, le type du réseau de transport ou les besoins en déplacements. Le modèle peut également servir de point de départ afin de connaître le tracer le plus performant en termes de résilience et de coût. Par la suite, un réajustement du tracé, comme dans le cas de la présente recherche, peut être effectué afin de répondre à certaines conditions spécifiques de la zone à l'étude qui ne peuvent être transposées au modèle *P.p.* et CCD.

4.3.2 Évaluation de la performance du réseau en situation d'utilisation

Bien que l'évaluation de la performance par le biais d'une analyse multicritère soit possible, l'efficacité du réseau en situation d'utilisation reste inconnue. En effet, les modèles utilisés ont généré des configurations pour un flux constant, où les sources de nourriture utilisées lors des expériences en laboratoire présentent toutes le même poids et la même valeur d'attractivité dans le cas du modèle informatique. Par contre, lorsque transposés à la réalité de l'usage d'un STC en milieu urbain dense comme le centre-ville d'une métropole, l'achalandage et l'attractivité des points à desservir varient constamment. Certains lieux sont plus attracteurs que d'autres, et ce, dépendamment de l'heure du jour et de la nuit, des saisons ou des années. L'échelle de temps peut également faire varier l'utilisation du STC, pouvant créer des engorgements sur le réseau. Afin d'évaluer l'efficacité du réseau à

supporter de telles variations, l'achalandage peut être simulé en faisant varier la quantité de nourriture présente pour le modèle *P.p.* et la valeur d'attractivité pour CCD, ce qui permettrait d'ajuster la configuration du réseau selon les besoins spécifiques de la zone à l'étude. Afin de tester l'impact de la variation de l'achalandage et du temps sur les configurations obtenues, différents scénarios peuvent être établis, soit selon l'attractivité des lieux à desservir, l'heure du jour et de la nuit, la saison ou selon un portrait global des déplacements quotidiens

De plus, les STC peuvent être utilisés pour le transport des personnes, des marchandises, des matières résiduelles ou pour les opérations de déneigement. La configuration optimale pour des réseaux prendra une forme différente selon l'utilisation qui en est faite. Par ailleurs, l'usage de divers scénarios permettrait d'évaluer si la performance du réseau est adaptée aux besoins d'utilisation. Les usages peuvent également varier selon une échelle temporelle, où le transport des personnes peut être priorisé durant le jour et celui des marchandises la nuit par exemple. Ainsi, le modèle informatique peut être adapté selon le type de contenu que le STC transporte en créant des conditions et des variables supplémentaires afin d'en faire varier les valeurs d'attractivité et de répulsion. Par contre, ce type d'intervention ne peut être transposé au modèle biologique.

CONCLUSION

L'utilisation des véhicules privés en milieu urbain dense est particulièrement problématique. Ainsi, le transport en commun permet de réduire les impacts négatifs liés à l'utilisation de la voiture. Par contre les réseaux linéaires associés à ce type de transport ne peuvent permettre la liberté de déplacement qu'offre un réseau routier complètement maillé. Par ailleurs, la qualité du système de transport en commun passe par le service offert, la connectivité de celui-ci aux autres modes de transports en place, mais également par la configuration du réseau afin d'offrir une réponse appropriée aux besoins en déplacement de type « multiple-multiple ». Un réseau de transport urbain performant présente un faible degré de séparation entre chaque nœud et une faible distance moyenne des tronçons afin d'offrir des trajets directs et rapides, un nombre élevé de trajets potentiels totaux permettant une plus grande flexibilité dans les déplacements, une forte résilience face aux ruptures aléatoires afin d'éviter les interruptions de service, et ce, pour un coût avantageux par rapport à la distance totale.

L'objectif de la recherche est de concevoir un réseau présentant toutes ces caractéristiques. Celui-ci a été atteint par l'entremise du modèle naturel basé sur l'organisme *Physarum polycephalum*. En effet, les expériences effectuées ont permis d'obtenir une configuration résiliente pour un coût avantageux par rapport à la distance totale du réseau, tout en offrant une grande flexibilité dans les trajets. Une fois adapté à la trame urbaine du centre-ville de Montréal, le réseau présente une meilleure performance par rapport aux autres configurations, tout modèle confondu. Ainsi, le réseau conçu lors de l'étude présente une résilience élevée avec un indicateur de 0,98, un faible coût avec un taux de 0,48 malgré le fait que la configuration ait la distance totale la plus élevée. Le modèle biologique prouve que le maillage d'un réseau permet d'augmenter sa performance générale. En effet, le réseau adapté présente une performance globale près de 70% plus élevée que la configuration évaluée comme étant la plus efficace. Le modèle biologique sur lequel se base le réseau adapté à la situation urbaine permet de concevoir des configurations où la résilience est élevée, et ce, grâce à la présence de maille offrant un plus grand nombre de trajets potentiels totaux. Le

modèle *P.p.* présente en moyenne un nombre de TT correspondant à 1 187 trajets comparativement à 211 pour le modèle CCD. La résilience moyenne pour les configurations du modèle *P.p.* est également plus élevée que pour le modèle CCD avec 0,91 et 0,85 respectivement, et ce, pour un coût plus faible avec 0,57 pour *P.p.* et 0,67 pour CCD.

Le réseau adapté est configuré de manière complètement maillée, accessible à moins de 400 mètres de marches, lie tous les lieux attracteurs de la zone à l'étude entre eux et aux différents types de transports en commun déjà en place comme la gare centrale et les stations de métro, et ce, pour un coût avantageux malgré une distance totale élevée, tout en ayant une résilience supérieure aux autres configurations. Par ailleurs, l'utilisation d'un STC peut également être transposée au transport des marchandises, des opérations de déneigement et à la collecte des matières résiduelles. Un STC aménagé selon la configuration du RA permettrait de désengorger le réseau routier, d'augmenter l'accessibilité aux transports en commun, tout en étant moins coûteux et moins polluant qu'un système de transport en commun conventionnel.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Adamatzky, et al. 2010. Approximating Mexican highways with slime mould. arXiv:1010.0557v1 [nlin.PS] <http://arxiv.org/abs/1010.0557>.
- AMT. 2003. Enquête Origine-Destination 2003 : La mobilité des personnes dans la région de Montréal. En ligne. 171 p.
<http://www.amt.qc.ca/uploadedFiles/AMT/Site_Corpo/L%60AMT/Portrait_de_la_mobilite%C3%A9/Enquete-OD-2003-resultats-presentation.pdf>. Consulté le 1 août 2013.
- AMT. 2008. Enquête Origine-Destination 2008 : La mobilité des personnes dans la région de Montréal. En ligne. 205 p.
<[http://www.amt.qc.ca/uploadedFiles/AMT/Site_Corpo/L%60AMT/Portrait_de_la_mobilite%C3%A9/Enquete-OD-2008-resultats-presentation\(1\).pdf](http://www.amt.qc.ca/uploadedFiles/AMT/Site_Corpo/L%60AMT/Portrait_de_la_mobilite%C3%A9/Enquete-OD-2008-resultats-presentation(1).pdf)> Consulté le 1 août 2013.
- Baumeister Dayna *et al.*. 2012. *Biomimicry Resource Handbook*. Biomimcry 3.8 : Missoula, Etats-Unis. 22 p.
- Bonnafeous Alain. 1996. « Le système des transports urbains ». *Economie et Statistique*, N°294-295, p. 99-108.
- Bonnafeous, Alain et Hugues Puel. 1983. *Physionomies de la ville*. Paris : Ed. Ouvrières. (série Initiation économique) 165 p.
- Bonnet Michel et Patrice Aubertel. 2006. *La ville aux limites de la mobilité*, Presses Universitaires de France, France, 316 p.
- Boucher, Isabelle et Nicolas Fontaine. 2011. L'aménagement et l'écomobilité, Guide de bonnes pratiques sur la planification territoriale et le développement durable. Coll. « Planification territoriale et développement durable », MARMOT. Ministère des Affaires municipales, des Régions et de l'Occupation du territoire, 232 p.
- Campbell Neil et Jane Reece. 2005. « The Origins of Eukaryotic Diversity ». Dans *Biology*. 7th ed. Sans Francisco (Cal): Pearson/Benjamin Cummings.
- Caselli, Grazielle, Gillaume Wunsch et Jacques Vallin. 2006. *Demography: Analysis and Synthesis, Volume 1*. Burlington (MA): Academic Press. p. 871
- Chandler Tertuis. 1987. *Four Thousand Years of Urban Growth: An Historical Census*. 2ème éd. New York (NY): Edwin Mellen. p. 656
- Degobert P. et S. o. A. Engineers. 1992. *Automobile and Pollution*. Paris : Éd. Technip. p. 516

Da Cunha, Antonio, et al. 2005. *Enjeux du développement urbain durable : transformation urbaines, gestion des ressources et gouvernance*. Lausanne: Presse polytechniques et universitaires romandes, 471 p.

Direction de la santé publique, Agence de la santé et des services sociaux de Montréal. 2006. « Le transport urbain, une question de santé. Rapport annuel 2006 sur la santé de la population montréalaise ». En ligne. 132 p.
< http://publications.santemontreal.qc.ca/uploads/tx_asssmpublications/2-89494-491-8.pdf > Consulté le 1 août 2013.

Dromard, Danièle et Dominique Seret. 2010. *Architecture des réseaux*. 2ième ed. Paris (Fr) : Pearson Education France, 250 p.

Fredman, Michael Lawrence et Robert E. Tarjan. 1984. « Fibonacci heaps and their uses in improved network optimization algorithms ». In *25th Annual Symposium on Foundations of Computer Science*, (Singer Island, 24-26 Oct. 1984) p. 338-346. IEEE.

Fichter, Donn. 1964. *Individualized Automated Transit and the City*. Chicago, (IL) : B.H. Sikes. 162 p.

Glaus, Mathias. 2007. « Approche multimodale de la mobilité urbaine : développement d'un outil d'aide à la prise de décision ». Thèse de doctorat en sciences de l'environnement, Montréal, Université du Québec à Montréal, 186 p.

Grava, Sigurd. 2003. *Urban Transportation Systems : Choices of Communities*. New York : McGraw-Hill Professional, 840 p.

Haskins, Edward F. et Diana Wrigley de Basanta. 2008. « Methods of agar culture of myxomycetes: an overview ». *Revista mexicana de micología* vol. 27, p. 1-7.

Harouel, Jean-Louis. 1981. *Histoire de l'urbanisme*. 1^{ière} ed. Paris : Presses Universitaire de France, 127 p.

Héran, Frédéric. 2011. « Pour une approche systémique des nuisances liées aux transports en milieu urbain ». *Les Cahiers Scientifiques du Transport* N° 59. p. 83-112

Irving, Jack H, Harry Bernstein, C.L. Olson et al. 1978. *Fundamentals of Personal Rapid Transit*. Lexington (Massachusetts) : Lexington Books, 332 p.

Kenworthy, Jeffrey R., Laube Felix B. et Peter Newman. 1999. Chapter 3 : An international sourcebook of automobile dependence in cities, 1960–1990. Boulder, (Colo) : University Press of Colorado, 704 p.

- Lavoie, Marie-Claude. 2011. « Étude de faisabilité et d'impacts portant sur l'implantation d'un réseau de transport en commun alternatif ». Mémoire de maîtrise en génie de l'environnement, Montréal, École des technologies supérieures, 91 p.
- Lowson, Martin. 2004. « Idealised models for public transport systems ». *International Journal of Transport Management* 2, UK : Elsevier, p.135-147
- Montréal en statistiques. 2013. « Profil économique : Ville de Montréal Arrondissement de Ville-Marie ». En ligne. 30 p.
<http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/PAGE/MTL_STATS_FR/MEDIA/DOCUMENTS/PE_VILLE-MARIE_2012.PDF > Consulté le 1 août 2013.
- Nakagaki, Toshiyuki, Yamada, Hiroyasu et Agota Toth. 2000. « Intelligence: Maze-solving by an amoeboid organism ». *Nature*. Vol. 407, no. 6803, p. 470.
- Nakagaki, Toshiyuki, Yamada, Hiroyasu et Tetsuo Ueda. 2000. « Interaction between cell shape and contraction pattern in the *Physarum plasmodium* ». *Biophysical Chemistry* vol. 84, no. 3, p. 195-204.
- Nakagaki, Toshiyuki, Yamada, Hiroyasu et Agota Toth. 2001. « Path finding by tube morphogenesis in an amoeboid organism ». *Biophysical Chemistry* vol. 92, no. 1, p. 47-52.
- Nakagaki, Toshiyuki, Yamada, Hiroyasu et Masahiko Hara. 2004. « Smart network solutions in an amoeboid organism ». *Biophysical Chemistry* vol. 107, no. 1, p. 1-5.
- Nakagaki, Toshiyuki, et al. 2004. « Obtaining multiple separate food sources: behavioural intelligence in the *Physarum plasmodium* ». *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences* vol. 271, no. 1554, p. 2305-2310.
- Newman, Peter et Jeffrey Kenworthy. 1999. « Sustainability and Cities : overcoming Automobile Dependence ». Edition 2, Washington (DC) : Island Press, 442 p.
- Nielsen, Gustav et al. 2005. *Public Transport : Planning the Networks*. « HiTrans Best Practice Guide 2 », Stavanger (Norway) : European Union Interreg III and HiTrans, 180 p.
- OCDE. 2007. *Transport, formes urbaines et croissance économique*. Coll. « Rapport de la cent trente septième table ronde d'économie des transports. », Paris (France) : Conférence européenne des ministres des Transports (CEMT)/Centre de recherche sur les transports, 163 p.
- OCDE. 2010. « Gérer la congestion urbaine, Édition OCDE ». En ligne. 343 p.
< <http://dx.doi.org/10.1787/9789282101315-fr> >. Consulté le 1 août 2013.

- OEE, Ressources naturelles Canada. 2011. « Guide de données sur la consommation d'énergie 1990 à 2008 (no M141-11/2008F-PDF) ». En ligne. 188 p. < <http://oee.nrcan.gc.ca/publications/statistiques/guide10/pdf/guide10.pdf> >. Consulté le 1 août 2013.
- ONU, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. 2011. « World Urbanization Prospects: The 2011 Revision ». En ligne. 50 p. <http://esa.un.org/unup/pdf/WUP2011_Highlights.pdf>. Consulté le 1 août 2013.
- O'Sullivan Sean et John Morrall. 1996. « Walking Distances to and from Light-Rail Transit Stations ». Transport Research Record, National Academy of Sciences, no 1538, p.19-26
- Papillon, Benoît Mario. 2004. « La concentration spatiale de l'urbanisation : un problème de développement ? L'émergence de Montréal au 19ème siècle ». Revue d'Économie Régionale & Urbaine vol. 2, p. 223-238.
- Semmler, Niklas B. 2011. « Emergent networks: A slime mold simulation ». Thèse de baccalauréat en informatique, Amsterdam, University of Amsterdam, 20 p.
- SDEV, Société de développement économique Ville-Marie. 2008. « Statistiques sur le centre-ville de Montréal. En ligne. 1 p. < <http://www.arrondissement.com/tout-get-document/t1/u3745-statistiques-centre-ville-montreal> > Consulté le 1 août 2013.
- Scott Wilson Planning & Environment. 2006. Strategic Environmental Assessment of the Proposed Revisions to the Mayor's Transport Strategy and the Mayor's Air Quality Strategy to Introduce a Low Emission Zone Environmental. Coll. « Improving Performance in a Complex Environments ». London : Environmental report : Non-technical Summary. 17 p.
< <http://www.tfl.gov.uk/assets/downloads/roadusers/lez/LEZ/LEZ-strategy-revisions-environmental-report-summary-0601.pdf> > consulté le 5 juin 2013
- Statistique Canada. 2006. « Habitudes de navettage et lieux de travail des Canadiens, Recensement de 2006 (no 97-561) ». En ligne. 44 p. <<http://www12.statcan.ca/census-recensement/2006/as-sa/97-561/pdf/97-561-XIF2006001.pdf>>. Consulté le 1 août 2013.
- Statistique Canada. 2006. « Portrait de la population canadienne en 2006, Recensement 2006 (no 97-550-XIF) ». En ligne. 46 p. <<http://www12.statcan.ca/census-recensement/2006/as-sa/97-550/pdf/97-550-XIF2006001.pdf>>. Consulté le 1 août 2013.
- Statistique Canada. 2009. « Enquête sur les véhicules au Canada : annuelle (no 53-223-X) ». En ligne. 45 p. < <http://www.statcan.gc.ca/pub/53-223-x/53-223-x2009000-fra.pdf> >. Consulté le 1 août 2013.

- STM. 2007. « Guide d'aménagement pour le transport en commun ». Montréal (Qc) : Société de transport de Montréal. 48 p. < http://www.stm.info/sites/default/files/pdf/fr/guide-amenagement_2007.pdf >. Consulté le 1 août 2013.
- Takamatsu Atsuko, Takaba, Eri et Ginjiro Takizawa. 2008. « Environment-dependent morphology in plasmodium of true slime mold *Physarum polycephalum* and a network growth model ». *Journal of Theoretical Biology*. Vol. 256, no. 1, p. 29-44.
- Taylor, Nigel. 1998. *Urban Planning Theory since 1945*. 1^{ière} ed. Londres (R.-U.) : Sage Publications, 184 p.
- Tero, Atsushi, Kobayashi, Ryo et Toshiyuki Nakagaki. 2006. « *Physarum* solver: A biologically inspired method of road-network navigation ». *Physica A Statistical Mechanics and its Applications* vol. 363, no. 1, p. 115.
- Tero, Atsushi, Kobayashi, Ryo et Toshiyuki Nakagaki. 2007. « A mathematical model for adaptive transport network in path finding by true slime mold ». *Journal of Theoretical Biology* vol. 244, no. 4, p. 553.
- Tero, Atsushi, et al. 2010. « Rules for Biologically Inspired Adaptive Network Design ». *Science* vol. 327, no. 5964, p. 439-442.
- Records & Information Managment (RIM), Transportation planning, City of Calgary. 2011. *A Parking Policy Framework for Calgary*. ISC Unrestricted : Calgary, Canada. 26 p.
- Turcotte, Martin. 2011. *Se rendre au travail : résultats de l'Enquête sociale générale de 2010*. no 11-008. Ottawa (On.) : Statistique Canada, 39 p.
- Wiel, Marc. 1999. *La transition urbaine ou le passage de la ville pedestre à la ville motorisée*. Belgique : Architecture + Recherche / Pierre Mardaga, 149 p.
- Weitz J. S., P. N. Benfey et N. S. Wingreen. 2007. « Evolution, interactions, and biological networks ». *PLoS Biol* vol. 5, no 1, p. 11
- Wolfram, Marc et al. 2005. *Sustainable Urban Transport Plans (SUTP) and urban environment policies, effects, and simulations*. Coll. « Review of European references regarding noise, air quality and CO2 emissions », Rupprecht Consult/Forschung & Beratung GmbH, Germany, 240 p.

