



Titre: Modélisation de "belles" tournées opérationnelles
Title:

Auteur: Simon Lemarbre
Author:

Date: 2006

Type: Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

Référence: Lemarbre, S. (2006). Modélisation de "belles" tournées opérationnelles [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie.
Citation: <https://publications.polymtl.ca/7893/>

 **Document en libre accès dans PolyPublie**
Open Access document in PolyPublie

URL de PolyPublie: <https://publications.polymtl.ca/7893/>
PolyPublie URL:

Directeurs de recherche: Martin Trépanier, & André Langevin
Advisors:

Programme: Non spécifié
Program:

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÉLISATION DE « BELLES » TOURNÉES OPÉRATIONNELLES

SIMON LEMARBRE

DÉPARTEMENT DE MATHÉMATIQUES ET DE GÉNIE INDUSTRIEL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

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

AOÛT 2006

© Simon Lemarbre, 2006.



Library and
Archives Canada

Bibliothèque et
Archives Canada

Published Heritage
Branch

Direction du
Patrimoine de l'édition

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence

ISBN: 978-0-494-19312-9

Our file Notre référence

ISBN: 978-0-494-19312-9

NOTICE:

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

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

AVIS:

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

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

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

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

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

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


Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MODÉLISATION DE « BELLES » TOURNÉES OPÉRATIONNELLES

présenté par : LEMARBRE Simon

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

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

M. BAPTISTE Pierre, Doctorat, président

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

M. LANDEVIN André, Ph.D., membre et codirecteur de recherche

M. MARZOLF Fabien, ing. M.Sc.A., membre

REMERCIEMENTS

L'aboutissement de ce mémoire n'aurait pu se faire sans les conseils méthodologiques et techniques des professeurs Martin Trépanier et André Langevin. Merci pour votre support (académique et financier), de votre patience et surtout de m'avoir communiqué votre goût pour la recherche.

Finalement, un grand merci à ma famille, ma copine et mes amis pour m'avoir soutenu et encouragé à terminer cette longue et passionnante aventure.

RÉSUMÉ

Depuis plus d'un siècle, le problème de tournée de véhicules ne cesse de captiver l'attention de la communauté scientifique à la recherche de modèles mathématiques développés pour la résolution de problèmes de plus en plus complexes. Longtemps analysé d'un point de vue mathématique, les dernières percées technologiques (SIG, GPS) ont permises à d'autres sphères scientifiques comme la logistique et les transports d'attaquer ce type de problème. Les algorithmes mathématiques sont utilisés afin de minimiser les distances, mais ils ont comme résultat des tournées ayant des formes qui ne sont pas toujours acceptables d'un point de vue opérationnel pour les utilisateurs.

L'objet de ce mémoire est de démontrer qu'il est possible d'incorporer des données informationnelles à un algorithme robuste de construction de tournée, en ayant comme objectif l'obtention de « belles » tournées qui sont opérationnellement utilisables dans le cadre des activités de monitoring du Ministère des Transports du Québec (MTQ). Ces activités quotidiennes consistent à parcourir le réseau afin de détecter rapidement des anomalies ou incidents qui pourraient mettre en danger la viabilité du réseau ainsi qu'à intervenir lors d'événements imprévus.

La première étape de cette analyse est de définir ce que signifie pour les utilisateurs une « belle » tournée. Pour le personnel du MTQ, cette notion de tournées acceptables ou de « belles » tournées est définie comme suit : une tournée évitant les allers-retours non nécessaires et les virages en U, gardant le plus possible la même direction et ayant comme résultante une tournée ayant une forme de cercle ou de double goutte d'eau contrairement à une forme d'arbre ou d'arêtes de poisson normalement obtenue à l'aide d'optimisation mathématique.

Afin de rencontrer à la fois les contraintes opérationnelles et les exigences humaines, la deuxième étape est le développement et l'implantation d'une méthode « Look-ahead » bonifiée. Cet algorithme base sa construction à l'examen d'un ou des critère(s) sur une suite d'arcs adjacents possibles afin d'évaluer la direction la plus avantageuse à emprunter. Elle sacrifie donc le minimum local du prochain arc afin d'emprunter la direction qui optimisera au mieux l'objectif sur un plus grand horizon.

La flexibilité de la méthode a été testée en expérimentant une situation de construction initiale et l'une de reconstruction de tournées suite à des incidents. Pour assurer la validité de la méthode de construction, les expérimentations ont été effectuées avec différents horizons d'évaluation. Ces derniers ont aussi été comparés à un algorithme classique de tournée sur les arcs avec capacité (PTAC) et finalement, à certaines tournées créées manuellement par les planificateurs du MTQ.

Les résultats obtenus suite aux expérimentations démontrent que la méthode est en mesure de créer des tournées respectant les différentes contraintes et exigences humaines en plus de produire de « belles » tournées. L'allure des tournées générées avec la méthode « Look-ahead » supprime celle obtenue à l'aide de l'algorithme PTAC et se compare même aux tournées créées manuellement. Par contre, comme prévu, l'efficacité de la méthode comparativement à celle du PTAC est moindre du point de vue de l'optimalité de la couverture du réseau. Les résultats démontrent aussi que l'efficacité de la méthode augmente avec l'horizon d'évaluation. Par contre, au-delà d'un certain horizon, l'efficacité des tournées a tendance à se détériorer graduellement.

Finalement, cette heuristique offre certes un potentiel fort appréciable pour atteindre l'objectif de construction de « belles » tournées. Avec ces résultats encourageants, des études futures pourront continuer à rechercher l'obtention de « belles » tournées tout en améliorant l'optimalité de la couverture des réseaux.

ABSTRACT

For over a century, the arc routing problem has not ceased captivating the attention of the scientific community in the search of mathematical models developed to solve increasingly complex problems. Analyzed extensively from a mathematical point of view, the last technological breakthroughs (GIS, GPS) allowed other scientific communities such as logistics and transportation to tackle this type of problem. Mathematical algorithms are used in order to minimize distances but they often result in solutions which are operationally impractical for the end users.

The purpose of this thesis is to demonstrate that informational data can be incorporated into a robust arc routing algorithm to design « nice » routes which are operationally acceptable within the framework of the monitoring activities of the Ministère des Transports du Québec (MTQ). These daily activities consist in traveling the network in order to rapidly detect anomalies or incidents which could endanger the viability of the network and to intervene in case of unforeseen events.

The first step of this analysis is to define the concept of « nice » routes for MTQ employees. For the workforce of the MTQ, this concept of an acceptable routes or « nice » routes means a route that avoid back and forth trip or U turns, keeps the same direction as much as possible and has shape of a circle or a double drop of water, as opposed to the tree or fish bone shapes normally obtained through mathematical optimization.

To satisfy both the operational constraints and human requirements, the second step of this analysis is the development and implementation of an enhanced « Look-ahead » method. This algorithm bases its construction on the examination of one or several criteria on a succession of possible adjacent arcs to determine the most advantageous

direction to travel. It thus sacrifices the local minimum of the next arc in order to travel the direction that optimizes, as much as possible greater horizon.

The flexibility of the methodology was experimentally tested in a situation of initial construction and one of rebuilding routes following incidents. To assure the validity of the methodology, the experiments were conducted with different evaluation horizons. They were also compared to a classical capacitated arc routing problem algorithm (CARP) and to some routes manually designed by the MTQ planners.

The results of the experiments demonstrated that the methodology can produce routes that respect the different constraints and human requirements in addition to producing « nice » routes. The shape of the routes generated with the look-ahead methodology are superior to those obtained using the CARP algorithm and compare favourably to those created manually. On the other hand, as expected, the Look-ahead methodology is less efficient than the CARP with respect to network coverage optimisation. In addition, the results demonstrate that the efficiency increases with the evaluation horizon. However, route efficiency tends to gradually deteriorate after certain horizon thresholds.

In conclusion, these encouraging results form a stepping stone for future study in the generation of « nice » routes while improving the optimization of network coverage.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	iv
RÉSUMÉ.....	v
ABSTRACT	vii
TABLE DES MATIÈRES	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	xi
LISTE DES FIGURES	xii
LISTE DES ANNEXES	xv
INTRODUCTION.....	1
CHAPITRE 1 - CONTEXTE DE RÉALISATION.....	4
1.1 Mise en situation	4
1.2 Activités de monitoring.....	6
CHAPITRE 2 - REVUE DE LA LITTÉRATURE	8
2.1 Le problème du postier chinois	9
2.1.1 Résolution du Problème du Postier Chinois	11
2.2 Le problème du postier rural.....	14
2.2.1 Résolution du Problème du Postier Rural.....	14
2.3 Les problèmes de tournées sur les arcs avec capacité	16
2.4 Résumé.....	18
2.5 Concept de « belles » tournées.....	20
CHAPITRE 3 - MODÉLISATION MATHÉMATIQUE DES « BELLES » TOURNÉES.....	21
3.1 Modélisation mathématique de la construction de « belles » tournées opérationnelles	21
3.1.1 Problématique de la construction des « belles » tournées	22
3.1.2 Idée générale de construction simple.....	24
3.1.3 La stratégie « Look-ahead »	29
3.2 Indicateurs de performance	43
CHAPITRE 4 - IMPLANTATION	49
4.1 Réseau de l'Estrie.....	49

4.1.1	Présentation du réseau	50
4.1.2	Contraintes du réseau	55
4.2	Description de l'application informatique.....	57
4.2.1	L'interface	58
4.2.2	Stockage des données.....	59
4.2.3	L'approche Look-ahead	63
4.3	Contexte d'utilisation.....	78
4.3.1	Construction de tournées réalisables à partir de zéro	78
4.3.2	Traitement de la poursuite des activités lors d'événements	79
CHAPITRE 5 - EXPÉRIMENTATION ET RÉSULTATS		80
5.1	Protocole expérimental.....	80
5.1.1	Description	80
5.1.2	Évaluation de la performance	82
5.2	Résultats.....	83
5.2.1	Construction de tournées réalisables à partir de zéro	83
5.2.2	Traitement de la poursuite des activités lors d'événements	95
5.2.3	Critiques	99
5.2.4	Avantages.....	100
CONCLUSION.....		102
RÉFÉRENCES.....		105
ANNEXES.....		108

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1-1. Catégorie des tâches reliées au monitoring de réseau routier	6
Tableau 2-1. Tableau récapitulatif des différents problèmes traités au chapitre 2	19
Tableau 3-1. Exemple "Look-ahead" – ensemble des itérations.....	35
Tableau 3-2. Comparaison des résultats - construction simple vs "Look-ahead"	36
Tableau 3-3. Synthèse des indicateurs de performance.....	48
Tableau 4-1. Caractéristiques de la région de l'Estrie	49
Tableau 4-2. Caractéristiques des nœuds	50
Tableau 4-3. Caractéristiques des liens	52
Tableau 4-4. Différentes classes de routes	53
Tableau 4-5. Caractéristiques générales du réseau.....	54
Tableau 4-6. Caractéristiques des circuits prédéterminés.....	54
Tableau 4-7. Paramètres reliés au Monitoring.....	55
Tableau 4-8. Exemple Coût - Caractéristiques des arcs	68
Tableau 4-9. Exemple Coût - Résultats.....	68
Tableau 4-10. Caractéristiques du plus court chemin entre les nœuds et le dépôt (en km)	73
Tableau 5-1. Paramètres d'expérimentation I	80
Tableau 5-2. Paramètres d'expérimentation II.....	81
Tableau 5-3. Capacité moyenne après 15 tournées (ICMLT).....	83
Tableau 5-4. Pourcentage de couverture du réseau après 15 tournées (ICCA).....	85
Tableau 5-5. Pourcentage de couverture des classes après 15 tournées (ICMLCU)	87
Tableau 5-6. Nombre d'allers-retours après 15 tournées (ICAR)	88
Tableau 5-7. Moyenne de l'allure après 15 tournées (ICBT).....	94
Tableau 5-8. Sommaire des indicateurs de performance - expérimentation II.....	97
Tableau A 1: Caractéristiques des nœuds.....	108
Tableau A 2: Caractéristiques des liens.....	113

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1. Hiérarchie des méthodes mathématiques développées par Marzolf (2003).....	5
Figure 2-1. Les types de problèmes de tournées.....	9
Figure 2-2. Les sept ponts de Königsberg	10
Figure 2-3. Exemple de transformation d'un graphe en un graphe Eulérien.....	13
Figure 3-1. Exemple de graphe en arêtes de poisson	22
Figure 3-2. Exemple de belle tournée	23
Figure 3-3. Exemple de base - graphe initial.....	25
Figure 3-4. Exemple de base - graphe étape 1 de 3.....	25
Figure 3-5. Exemple de base - graphe étape 2 de 3.....	26
Figure 3-6. Exemple de base - graphe itérations 2 à 19	27
Figure 3-7. Exemple de carence de la méthode simplifiée	28
Figure 3-8. Exemple "Look-ahead" - graphe initial	30
Figure 3-9. Exemple "Look-ahead" - graphe quantifié	31
Figure 3-10. Exemple "Look-ahead" - itération 1 de 12.....	32
Figure 3-11. Exemple "Look-ahead" - itération 2 de 12.....	34
Figure 3-12. Exemple 2 "Look-ahead" - graphe initial	38
Figure 3-13. Exemple 2 "Look-ahead" - Ensemble des tournées.....	41
Figure 4-2. Représentation du réseau.....	51
Figure 4-3. Interface de visualisation.....	58
Figure 4-4. Interface d'affichage des circuits.....	59
Figure 4-5. Feuille de données - Liens.....	60
Figure 4-6. Modèle relationnel de données (MRD)	61
Figure 4-7. Requête SQL - nombre d'arc dans les circuits	61
Figure 4-8. Requête avec l'outil MS Access - nombre d'arc dans les circuits	62
Figure 4-9. Lien entre les logiciels	62
Figure 4-10. Interface de départ "Look-ahead"	63
Figure 4-11. Algorithme "Look-ahead"	64
Figure 4-12. Hiérarchie des sous-programmes - Algorithme "Look-ahead"	65
Figure 4-13. Programme - LooAH - partie I.....	66
Figure 4-14. Sous-programme fonctionCout	67
Figure 4-15. Programme - LooAH - partie II	69

Figure 4-16. Sous-programme redrawNodeDepot	70
Figure 4-17. Fonction chemin	71
Figure 4-18. Sous-programme fonctionCout_unit	72
Figure 4-19. Distribution cumulative des PCC.....	73
Figure 4-20. Comparaison des PCC moyen et médian sur le facteur de risque	75
Figure 4-21. Fonction LookAhead.....	76
Figure 4-22. Fonction LookAheadIn.....	77
Figure 4-23. Création à partir de zéro	78
Figure 4-24. Poursuite de tournée lors d'événements.....	79
Figure 5-1. Capacité des tournées.....	84
Figure 5-2. Comparaison couverture totale des différents scénarios.....	86
Figure 5-3. Comparaison tournée 1 des différents scénarios.....	90
Figure 5-4. Comparaison tournée 2 des différents scénarios.....	91
Figure 5-5. Comparaison tournée 3 des différents scénarios.....	92
Figure 5-6. Comparaison tournée 10 des différents scénarios	93
Figure 5-7. Comparaison de l'aspect de 2 tournées.....	94
Figure 5-8. Situation de la tournée lors de l'événement	95
Figure 5-9. Comparaison tournées interrompues.....	96
Figure 5-10. Comparaison tournée 8 & 15.....	98
Figure 5-11. Circuit manuel (gauche) vs Circuit généré (droite) I.....	100
Figure 5-12. Circuit manuel (gauche) vs Circuit généré (droite) II.....	101
Figure B 1: Circuit 1	127
Figure B 2: Circuit 2	127
Figure B 3: Circuit 3	128
Figure B 4: Circuit 4	128
Figure B 5: Circuit 5	129
Figure B 6: Circuit 6.....	129
Figure B 7: Circuit 7	130
Figure B 8: Circuit 8	130
Figure B 9: Circuit 9	131
Figure B 10: Circuit 10	131
Figure B 11: Circuit 11	132
Figure B 12: Circuit 12	132
Figure B 13: Circuit 13	133
Figure B 14: Circuit 14.....	133

Figure B 15: Circuit 15	134
Figure B 16: Circuit 16	134
Figure B 17: Circuit 17	135
Figure B 18: Circuit 18	135
Figure B 19: Circuit 19	136
Figure B 20: Circuit 20	136
Figure B 21: Circuit 21	137
Figure B 22: Circuit 22	137
Figure C 1: Comparaison tournée 1 des différents scénarios.....	138
Figure C 2: Comparaison tournée 2 des différents scénarios.....	139
Figure C 3: Comparaison tournée 3 des différents scénarios.....	140
Figure C 4: Comparaison tournée 4 des différents scénarios.....	141
Figure C 5: Comparaison tournée 5 des différents scénarios.....	142
Figure C 6: Comparaison tournée 6 des différents scénarios.....	143
Figure C 7: Comparaison tournée 7 des différents scénarios.....	144
Figure C 8: Comparaison tournée 8 des différents scénarios.....	145
Figure C 9: Comparaison tournée 9 des différents scénarios.....	146
Figure C 10: Comparaison tournée 10 des différents scénarios.....	147
Figure C 11: Comparaison tournée 11 des différents scénarios.....	148
Figure C 12: Comparaison tournée 12 des différents scénarios.....	149
Figure C 13: Comparaison tournée 13 des différents scénarios.....	150
Figure C 14: Comparaison tournée 14 des différents scénarios.....	151
Figure C 15: Comparaison tournée 15 des différents scénarios.....	152
Figure C 16: Comparaison couverture totale des différents scénarios	153
Figure D 1: Comparaison tournées 6 - interrompues	154
Figure D 2: Comparaison tournées 7 - interrompues	155
Figure D 3: Comparaison tournées 8 - interrompues	156
Figure D 4: Comparaison tournées 9 - interrompues	157
Figure D 5: Comparaison tournées 10 - interrompues	158
Figure D 6: Comparaison tournées 11 - interrompues	159
Figure D 7: Comparaison tournées 12 - interrompues	160
Figure D 8: Comparaison tournées 13 - interrompues	161
Figure D 9: Comparaison tournées 14 - interrompues	162
Figure D 10: Comparaison tournées 15 - interrompues	163
Figure D 11: Comparaison couverture totale - interrompues.....	164

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A -	Définition des arcs et liens	108
ANNEXE B -	Circuits prédéterminés.....	127
ANNEXE C -	Circuits construits – Situation initiale	138
ANNEXE D -	Circuits construits – Situation d’incident.....	154

INTRODUCTION

Le ministère des Transports du Québec (MTQ) a parmi ses responsabilités d'assurer la sécurité et la viabilité du réseau autoroutier québécois dont il a la charge. Les tâches effectuées par le MTQ pour assumer cette responsabilité peuvent être classifiées en deux catégories, soit la surveillance et l'entretien du réseau routier. Chacune de ces catégories regroupe un certain nombre d'activités qui nécessitent la planification et la gestion de circuits de véhicules afin de permettre une couverture optimale de l'ensemble de son réseau routier.

La surveillance de ce gigantesque réseau routier, aussi appelée activité de monitoring, est une activité journalière qui consiste à parcourir le réseau afin de détecter rapidement des anomalies ou incidents qui sont susceptibles de mettre en danger la sécurité des automobilistes ou qui nécessitent simplement l'intervention d'une équipe responsable de l'entretien (travaux, signalisation). La catégorie des activités d'entretien regroupe des tâches aussi variées que l'entretien de la signalisation, les opérations de marquage et les activités de déneigement.

Bien qu'a priori ces activités semblent pouvoir être gérées de manière quasi statique étant donné que le réseau reste toujours le même, les conditions climatiques ainsi que la variabilité des incidents rencontrés tant au niveau de leurs fréquences, de leurs natures, des heures d'occurrence et de leurs localisations rendent la gestion et la planification des activités très délicates. De plus, pour ajouter à la complexité, il ne faut pas négliger la présence d'une forte interaction entre la planification des activités de monitoring et les activités d'entretien.

Le MTQ dispose bien entendu de systèmes d'information géographique (SIG), d'équipements embarqués ainsi que des systèmes de positionnement géographique (GPS) permettant non seulement de faire le suivi et la caractérisation des tâches, mais

aussi, de récolter une quantité importante de données pouvant être extrêmement précieuses pour la gestion et la planification future. Malgré les grands avancements dans ce domaine, certains défis restent encore bien réels autant au niveau technologique, mathématique, informationnel qu'humain.

Les récents développements, d'un point de vue mathématique, s'intéressent aux problèmes de tournée de véhicule sur réseau routier, tant sur les nœuds que sur les arcs. Ils sont de plus en plus orientés vers l'intégration d'un certain niveau de dynamisme, que ce soit en utilisant des métaheuristiques de plus en plus complexes ou encore en incorporant des composants stochastiques à des algorithmes déjà très évolués. Ces algorithmes ont souvent comme objectif de trouver des circuits optimaux, circuits qui n'ont pas nécessairement des qualités opérationnelles. Du point de vue de la recherche en transport, de nombreux efforts sont dirigés vers un traitement plus efficace de quantités importantes d'information pour faciliter l'intégration avec les activités de planification. Cependant, peu de travaux portent actuellement sur la création de circuits offrant un fort niveau de dynamisme et qui sont aussi utilisables du point de vue opérationnel, puisque basés sur une construction de circuit en accord avec les données récoltées d'activités effectivement réalisées.

L'objet de ce mémoire est de démontrer qu'il est possible d'incorporer des données informationnelles à un algorithme robuste, mais tout de même assez simple, de construction de circuits, en ayant comme objectif l'obtention de « belles » tournées qui sont opérationnellement utilisables, c'est-à-dire qu'elles rencontrent à la fois les contraintes opérationnelles et les exigences humaines. Les exigences humaines envers les tournées définissent une « belle » tournée comme étant une tournée évitant les allers-retours non nécessaires et les virages en U et empruntant une forme de cercle ou de double gouttes d'eau.

Pour ce faire, le modèle d'Amponsah & Salhi (2004) sera amélioré et implanté dans le contexte du réseau autoroutier du MTQ. Ce mémoire sera développé autour de cinq chapitres qui sont eux-mêmes divisés en sous-sections. Dans ces sections, des brefs rappels des concepts évoqués par Marzolf (2003) pertinents à la compréhension de cet ouvrage seront offerts sans toutefois en faire une couverture très approfondie. Tout d'abord, une mise en contexte de ce mémoire sera présentée, suivie d'une revue de littérature ayant pour but d'exposer les différents concepts et algorithmes mathématiques utilisés lors de la confection de tournée de véhicules afin de permettre une meilleure compréhension de la mécanique de résolution. Le cœur de l'ouvrage débute par la présentation au chapitre 3 de la modélisation du problème. L'accent de ce chapitre sera porté sur l'analyse des différentes contraintes opérationnelles et mathématiques relatives à la construction de « belles » tournées. Une attention particulière sera apportée aux modèles et méthodes mathématiques utilisées pour la confection des tournées. Les deux derniers chapitres proposent une méthode de résolution ainsi que l'expérimentation basée sur un cas réel de monitoring du réseau routier de la région de l'Estrie au Québec. Une analyse détaillée des différentes situations traitées ainsi que les résultats obtenus seront présentés.

CHAPITRE 1 - CONTEXTE DE RÉALISATION

1.1 Mise en situation

L'objet de ce mémoire fait suite aux travaux de Marzolf (2003) intitulé « *Modélisation informationnelle et mathématique des opérations de surveillance du réseau routier* ». Le but de l'auteur était de développer une méthodologie d'analyse et de résolution de la problématique de planification des activités de monitoring avec prise en compte des activités opérées¹. Cet ouvrage a premièrement établi des balises pour formaliser l'ensemble des données nécessaires à l'utilisation d'outils de planification opérationnelle de tournées à l'aide d'analyse de flux de données ainsi que l'approche orientée-objet en transport. Il s'est ensuite attaqué à l'intégration de ce formalisme à des méthodes mathématiques de planification de tournées ayant des degrés de dynamisme différents. Il a développé trois approches basées sur la résolution d'un programme linéaire d'affectation de circuits à des quarts de travail :

1. Confection initiale de l'horaire avec une affectation de circuits prédéterminés;
2. Confection à l'aide d'une re-planification périodique de circuits prédéterminés;
3. Confection à l'aide d'intégration d'arcs (augmentation des circuits prédéterminés)

Toutes ces méthodes sont classées par ordre croissant de degré de dynamisme. La Figure 1-1 présente les trois méthodes qu'il a développées. Dans la catégorie à plus fort dynamisme, il a aussi inclus, en n'en faisant qu'une présentation théorique, une quatrième méthode qui serait basée sur la reconstruction continue des circuits en tenant compte des activités réalisées.

¹ : Sujet tirée MARZOLF, F. (2003). *Modélisation informationnelle et mathématique des opérations de surveillance du réseau routier*. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal. 260 p.

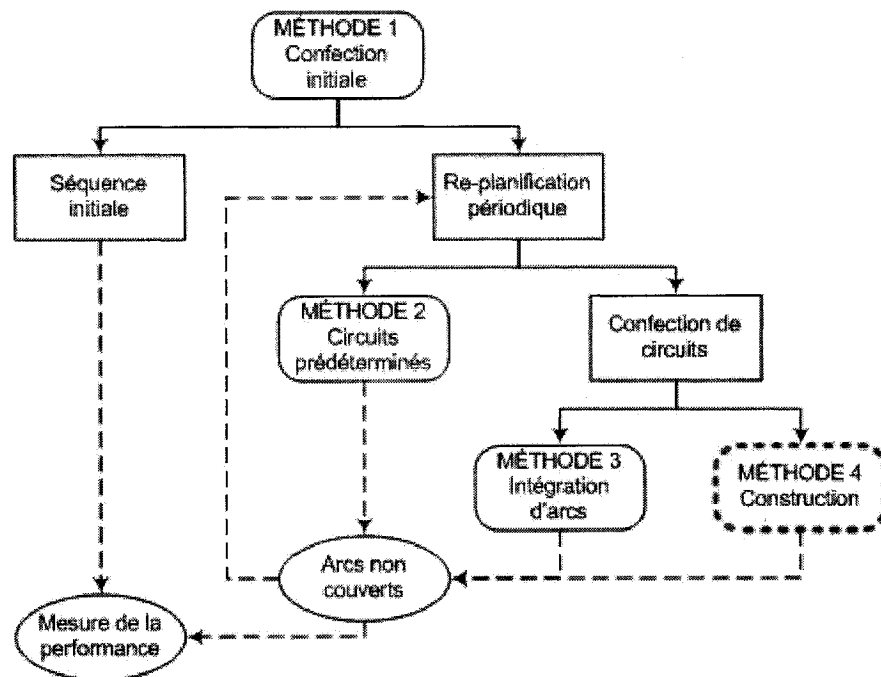


Figure 1-1. Hiérarchie des méthodes mathématiques développées par Marzolf (2003)

Les algorithmes de construction utilisés par Marzolf (2003) minimisaient la distance mais les résultats donnaient des formes qui n'étaient pas acceptables par les utilisateurs. La quatrième méthode de construction de circuits opérationnels offre à la fois un fort degré de dynamisme, ce qui est très recherché des applications opérationnelles et un énorme potentiel de recherche qui n'est jusqu'à maintenant que trop peu exploré, ce qui est le point de départ de ce mémoire. N'abordant pas les thèmes de formalisme informationnel des GIS, GPS et de la re-planification de circuits existants, que Marzolf (2003) a couverts, ce mémoire a pour objectif d'explorer la construction de « belles » tournées opérationnelles, à l'aide d'algorithmes robustes, mais simples, qui pourront à la fois générer des tournées à partir de zéro ou bien compléter des tournées déjà amorcées.

Les problématiques du traitement des données recueillies par les systèmes de positionnement géométrique (précision des données, erreur d'alignement, etc.) et de l'intégration des données opérationnelles avec les applications des créations des circuits

ayant été analysées par Marzolf pour ce même sujet avec le MTQ, ce document ne couvrira pas cet aspect. Même s'il est extrêmement important dans le contexte de construction dynamique de circuits, l'hypothèse sera que les données utilisées pour la création de tournées sont des données justes, précises et réelles.

1.2 Activités de monitoring

Il est important d'expliquer ce qu'est le monitoring puisque l'objectif de ce mémoire est de réaliser une application permettant la construction de « belles » tournées opérationnelles pour les activités de surveillance de réseau routier. La compréhension des besoins du MTQ pour le monitoring a été rendue possible au moyen de rencontres avec le MTQ ainsi que de l'étude des flux d'information intervenant dans la gestion de la planification des activités de monitoring effectuée par Marzolf lors d'une visite au centre de service de Sherbrooke. Selon Marzolf, l'ensemble des activités afférentes au monitoring peuvent se catégoriser en quatre tâches présentées dans le Tableau 1-1 :

Tableau 1-1. Catégorie des tâches reliées au monitoring de réseau routier

Catégorie de tâche	Description
Planification des opérations	Création de l'horaire de travail (circuit à faire chaque jour) permettant au patrouilleur de parcourir l'ensemble du réseau routier. La construction des 18 circuits utilisés pour la confection des horaires a été basée sur l'expérience des planificateurs. Les circuits tiennent compte de plusieurs facteurs (capacité, nombre de passages, etc.) qui ont été déterminés il y plus de 5 ans. Ils ont aussi des thématiques, qui ne sont rien de moins que des aspects à vérifier (éclairage, signalisation, etc.)
Monitoring	Surveillance de l'ensemble du réseau routier afin d'en assurer la bonne condition. Le patrouilleur doit aussi identifier /rapporter ou intervenir lors d'incidents sur le réseau. Les incidents sont très variés : bris d'un élément du réseau, l'intervention lorsqu'un objet encombre la chaussée ou simplement l'assistance aux automobilistes en panne.

Traitements des incidents	Processus nécessaire lorsque des incidents ne peuvent pas être solutionnés par le patrouilleur. Le patrouilleur demande donc une action externe, et l'information est ainsi transmise au département concerné.
Analyse des activités	Processus d'évaluation des activités opérationnelles versus les activités planifiées, analyse des traces GPS réalisées, études des arcs non couverts. Synthèse des incidents rapportés pour aider à établir les thématiques des prochaines tournées.

La concrétisation de ce document touche plus particulièrement la catégorie de la planification des opérations. Par contre, il ne faut pas négliger les autres tâches, puisque le succès d'une bonne construction est avant tout reliée aux données utilisées.

Maintenant que le but et le contexte de réalisation de ce mémoire sont exposés, la revue de la littérature du chapitre 2 aidera à la compréhension des mécanismes de résolution des algorithmes classiques utilisés pour la confection de tournée de véhicules.

CHAPITRE 2 - REVUE DE LA LITTÉRATURE

Les problèmes de tournées retiennent l'attention de plusieurs chercheurs de partout dans le monde et ce, depuis de nombreuses années. Depuis 1832, date du premier livre traitant de ce sujet (*Lawler et al., 1985*), la littérature reliée à ce type de problèmes ne cesse d'augmenter. La présente revue ne tente pas de couvrir tous les écrits de ce domaine, mais particulièrement les plus récents et les plus étroitement liés à la problématique. Plusieurs auteurs ont réalisé des revues littéraires extrêmement complètes qui dressent un tableau global des problèmes de tournées. Parmi ceux-ci figurent entre autres celles de H. A. Eiselt, M. Gendreau, G. Laporte (*Arc Routing Problems, Part I & II, 1995*), pour les problèmes sur les arcs ou celles de Laporte (1992a, 1992b, 1993) pour les problèmes de tournées de véhicules.

Les problèmes de tournées sont orientés autour de deux axes principaux. Le premier, nommé problème de tournée de véhicules (*Vehicule Routing Problems (VRP)*), englobe les défis concernant la minimisation du coût de distribution de produits entre un dépôt et des clients. Le deuxième, appelé problème de tournée sur les arcs, consiste à déterminer le coût minimum pour couvrir, en partie ou en totalité, les arcs ou arêtes d'un graphe en satisfaisant un ensemble de contraintes. Ce dernier est employé dans une grande variété de situations pratiques comme, par exemple, la construction de circuits pour le balayage de rues, la collecte des ordures, le déneigement ou l'élaboration de tournée pour les facteurs ou les préposés chargés de la lecture des compteurs d'électricité.

La Figure 2-1 représente graphiquement chacune des deux catégories des problèmes de tournées.

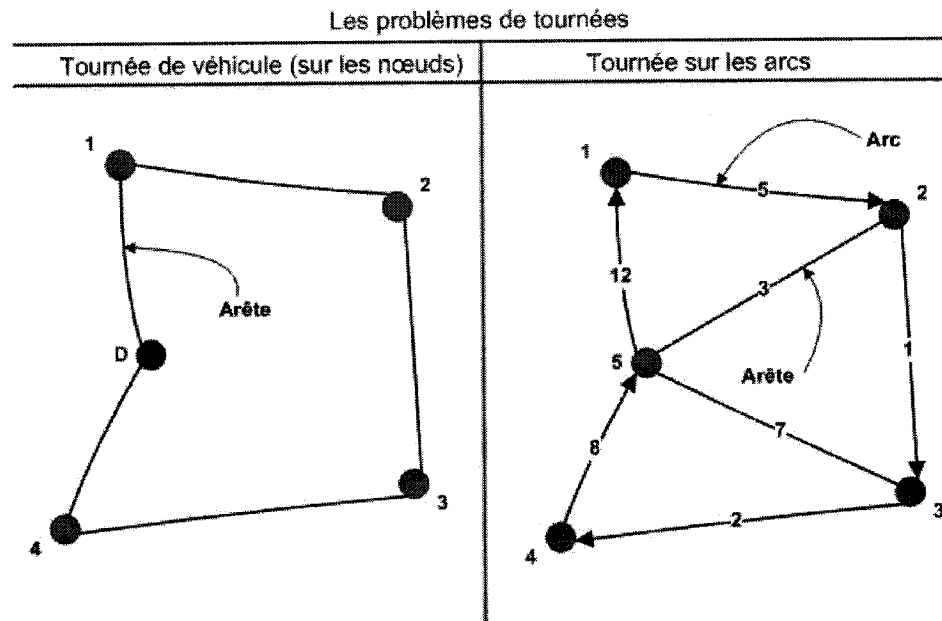


Figure 2-1. Les types de problèmes de tournées

La problématique de cet ouvrage touche uniquement le problème de tournée sur les arcs, donc seul ce type de problème de tournée sera abordé dans cette revue de littérature. Pour faciliter la compréhension, la revue de la littérature sera divisée selon la perspective historique du problème de tournée sur les arcs, c'est-à-dire : le problème du postier chinois, le problème du postier rural et le problème de tournée sur les arcs avec capacité.

2.1 Le problème du postier chinois

Le plus célèbre et le plus ancien problème de tournée sur les arcs est celui du postier chinois (PPC). Il fut introduit pour la première fois par le mathématicien chinois Meigu Guan en 1962. Le problème avait été simplement énoncé de la manière suivante (Guan 1962): *"A mailman has to cover his assigned segment before returning to the post office. The problem is to find the shortest walking distance for the mailman."* Ce qui revient à trouver le chemin le plus court qui traverse au moins une fois chaque arc ou arête d'un graphe. Le graphe est défini de la façon suivante : $G = (V, E \cup A)$ où $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ est un ensemble de nœuds, E est un ensemble d'arêtes (non orienté) et A un

ensemble d'arcs (orienté) . De plus, un coût c_{ij} est associé à chaque arrête et/ou arc du graphe. Le graphe G doit habituellement être fortement connexe, ce qui signifie qu'il existe toujours un chemin entre chaque paire de nœuds. De plus, pour obtenir un résultat pour le PPC, il est nécessaire et suffisant que le graphe connexe soit dans l'une des situations suivantes:

- Si G est non orienté, donc $A = \emptyset$, chaque nœud doit être de degré pair, c'est-à-dire que le nombre d'arêtes incidentes doit être pair. Cette condition a été prouvée par Euler (1736). (graphe pair)
- Si G est orienté, donc $E = \emptyset$, le nombre d'arcs entrants de chaque nœud doit être égale au nombre d'arcs sortants. (graphe symétrique)
- Si G est mixte, donc $E \neq \emptyset$ et $A \neq \emptyset$, chaque nœud doit être incident à un nombre paire d'arêtes et d'arcs et pour toute partitions des nœuds $\{N,S\}$, | arêtes $\{N,S\} | \geq | \text{arcs } \{N \rightarrow S\} | - | \text{arcs } \{S \rightarrow N\} |$. (graphe équilibré)

Lorsqu'un graphe valide l'un de ces situations, ce graphe peut être appelé graphe eulérien. La notion de graphe eulérien a été introduite pour la première fois par Euler en 1736 pour la résolution d'un problème, aujourd'hui historique, qui est à l'origine de la théorie des graphes, soit *Les sept ponts de Königsberg* (Figure 2-2).

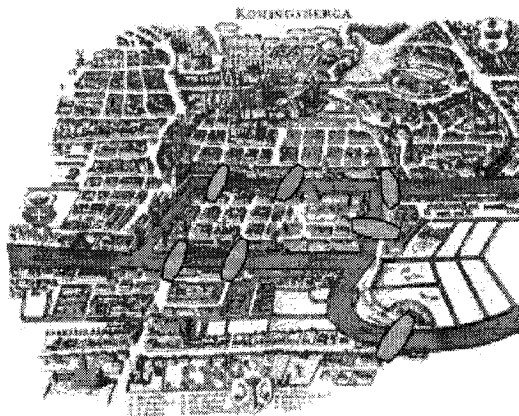


Figure 2-2. Les sept ponts de Königsberg²

² http://fr.wikipedia.org/wiki/Probl%C3%A8me_des_sept_ponts_de_K%C3%B6nigsberg

Le problème était le suivant :

Trouver un chemin permettant, à partir d'un point de départ au choix, d'emprunter une et une seule fois chaque pont et de revenir à son point de départ.

La résolution de ce problème consiste à démontrer que le graphe de Königsberg est eulérien ou non (c'est-à-dire qu'il existe une chaîne passant par toutes les arêtes du graphe une et une seule fois, revenant à son point de départ). Ce problème illustre bien qu'il est impossible d'obtenir un graphe eulérien puisque ce dernier possède au moins un sommet de degré impair.

2.1.1 Résolution du Problème du Postier Chinois

Dans le cadre de ce mémoire, seul le cas orienté sera considéré. Dans la situation précise (orientée et fortement connexe), le problème du postier chinois peut être résolu polynomialement en un maximum de deux étapes. En effet, si le graphe est symétrique, seule la deuxième étape est nécessaire à la résolution du PPC. Par contre, si le graphe est asymétrique, les deux étapes suivantes seront nécessaires à la résolution du problème :

1. Rendre le graphe eulérien
2. Déterminer le chemin sur le graphe obtenu à l'étape 1

La première étape consiste à rééquilibrer les nœuds de degré impair en ajoutant des copies de certains arcs existants à moindre coût. Les arcs à dupliquer peuvent être déterminés en résolvant un problème de transport (Edmonds&Johnson 1973 et Orloff 1974) entre les nœuds excédentaires et les nœuds déficitaires.

Soit :

- I est l'ensemble de nœud v_i pour lesquels les nœuds sont déficitaires, c'est-à-dire que le nombre d'arcs entrants excède le nombre d'arcs sortants;
- J est l'ensemble de nœuds v_j pour lesquels les nœuds sont excédentaires, c'est-à-dire que le nombre d'arcs sortants excède le nombre de nœuds entrants;
- s_i signifie l'offre et correspond à l'excédant d'arcs entrants;
- d_j signifie la demande et correspond à l'excédant d'arcs sortants;
- c_{ij} est la distance du plus court chemin entre v_i et v_j

$$\text{Minimiser } \sum_{v_i \in I} \sum_{v_j \in J} c_{ij} x_{ij}$$

S.C.

$$\sum_{v_j \in J} x_{ij} = s_i, \quad (v_i \in I)$$

$$\sum_{v_i \in I} x_{ij} = d_j, \quad (v_j \in J)$$

$$x_{ij} \geq 0, \quad (v_i \in I, v_j \in J)$$

Le résultat obtenu par la résolution de ce problème de transport implique x_{ij} fois la copie de l'arc (i,j) . Un exemple du résultat de cette transformation d'un graphe déséquilibré en un graphe eulérien est représenté à la Figure 2-3.

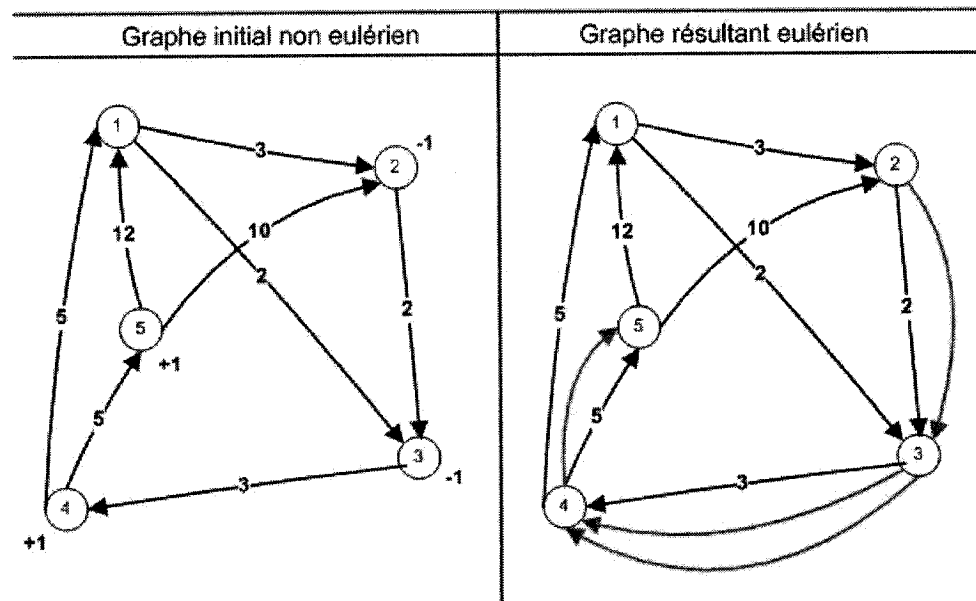


Figure 2-3. Exemple de transformation d'un graphe en un graphe Eulérien

La deuxième étape de la résolution du PPC consiste à élaboration d'une tournée à partir de nœuds prédéterminés. Plusieurs approches peuvent être utilisées pour la construction de cette tournée telle que l'adaptation de l'algorithme de Fleury pour les cas non orienté (Christofides 1975) ou bien, l'adaptation de l'algorithme Hierholzer. Une alternative intéressante à ces adaptations de problèmes non orientés a été proposée par Van Aardenne-Ehrenfest et Bruijn (1951). Elle a ensuite été décrite par Edmonds&Johnson 1973 et ses étapes sont les suivantes :

1. Construire une anti-arborescence de recouvrement qui a pour origine n'importe quel nœud v du graphe augmenté G ;
2. Ordonner et numéroté les arcs sortant de v de façon arbitraire. Ordonner et numéroté les arcs sortant de chaque sommet appartenant à G de telle sorte que le dernier arc numéroté soit un arc utilisé dans l'anti-arborescence;
3. Construire une tournée T partant de v en utilisant toujours, pour quitter le sommet, l'arc sortant ayant le plus petit numéro.

2.2 Le problème du postier rural

Le problème du postier rural (PPR) a aussi un graphe défini de la façon suivante : $G = (V, E \cup A)$ où $V = \{v_1, \dots, v_n\}$ est un ensemble de nœuds, E est un ensemble d'arêtes (non orienté) et A un ensemble d'arcs (orienté). Mais contrairement au PPC où tous les éléments de $E \cup A$ doivent être traversés, cette fois-ci seulement les éléments du sous ensemble R de $E \cup A$ doivent être parcourus. En effet, rares sont les problèmes réels qui obligent à parcourir tous les segments d'un réseau. Par exemple, le déneigement, la collection des déchets, le balayage des rues ou l'itinéraire d'autobus scolaires sont des secteurs d'application du problème où la couverture de tous les segments d'un réseau n'est pas nécessaire. Le PPR consiste donc à déterminer un circuit de longueur minimum passant une fois au moins par chaque arc ou arête de R . Les éléments ne faisant pas partie de R seront nommés arcs ou arêtes facultatifs. Ce problème introduit par Orloff (1974) et repris dans plusieurs travaux depuis est une généralisation du problème de postier chinois décrit précédemment. Ainsi, lorsque $R = E \cup A$, le PPR peut être résolu comme un PPC.

2.2.1 Résolution du Problème du Postier Rural

Il a été démontré par Lenstra et Rinnooy (1976) que le PPR est NP-dur. Toutefois, si G_R (sous graphe partiel de G induit par R , $G_R = (V_R, R)$) est connexe, qu'il soit orienté ou non, le PPR peut se résoudre polynomialement.

Comme il a été spécifié pour le PPC, seule la résolution du cas orienté sera abordée. La réussite de la résolution du problème du postier rural repose donc sur deux principes :

1. Obtenir un graphe connexe ;
2. Obtenir un graphe eulérien.

Le deuxième principe, celui d'obtenir un graphe Eulérien, est similaire à celui cité à la section précédente (problème du postier chinois) et il peut être résolu pas un simple problème de transport. La difficulté principale de résolution de ce problème repose donc sur le premier principe soit la nécessité d'obtenir un graphe connexe. Effectivement, il

est assez improbable que l'ensemble d'arcs obligatoires choisis représentent un graphe avec les caractéristiques voulues ci-dessus. Il faut donc ajouter des arcs du graphe initial afin d'obtenir un graphe connexe.

Il existe différentes méthodes de résolution par la méthode exacte à l'aide de modélisation mathématique sous forme de programme linéaire (Christofides 1986), mais ce type de résolution devient de plus en plus difficile à utiliser lorsque la taille du problème augmente. Le besoin de résoudre des problèmes de grande taille a ouvert le chemin au développement d'heuristiques ce qui facilite la résolution de ces problèmes de façon efficace et en un temps raisonnable. Parmi ces heuristiques, voici celle de Christofides et al. (1986) qui donne de très bons résultats.

- Le graphe d'origine est défini par $G = (V, A)$;
- $R \subset A$ défini l'ensemble des arcs obligatoires;
- Le graphe $G' = (V', A')$ est le graphe des plus courts chemins;
- $G_1, \dots, G_p$ représente les composantes connexes induites par les arcs obligatoires.

Ensuite, il faut accomplir les étapes suivantes:

1. Construire une arborescence de longueur minimale, ayant un nœud de départ choisi arbitrairement, reliant les composantes connexes. Soit $\bar{G}$ le graphe résultant.
2. Obtenir un graphe Eulérien en ajoutant des arcs de façon minimale pour équilibrer les nœuds (Problème de transport).
3. Déterminer une tournée sur le graphe obtenu à l'étape précédente (Circuit Eulérien).

2.3 Les problèmes de tournées sur les arcs avec capacité

Les problèmes de tournées sur les arcs avec contrainte de capacité (PTAC, ou en anglais CARP pour Capacited Arc Routing Problem), sont définis dans la littérature comme étant une généralisation des problèmes présentés précédemment soit le problème du postier chinois et le problème du postier rural. Le PTAC considère habituellement un réseau non orienté dans lequel toutes les arêtes ont un coût associé C_{ij} . Une flotte homogène de véhicules, d'un nombre pouvant être fixe ou variable et où chacun des véhicules a une capacité limitée Q , est basée à un nœud dépôt. Comme dans le cas du PPR, un sous-ensemble R d'arêtes doit être desservi (clients), c'est-à-dire qu'une demande positive notée q_{ij} est associée à l'arête (ij) et qu'une demande nulle est associée aux éléments qui ne font pas partie du sous-ensemble R . Dans ce type de problème, une tournée admissible est un cycle ou un circuit commençant et se terminant au dépôt en ayant desservi des clients dont la demande totale ne dépasse pas la capacité totale des véhicules. La résolution du PTAC consiste donc à rechercher un ensemble de tournées admissibles dont la longueur (coût) totale est minimale et tel que chaque élément de R soit traversé au moins une fois par un véhicule. Il est à noter que lorsque la capacité totale de chaque véhicule est plus grande que la demande totale des clients, le PTAC devient un problème du postier rural.

Le PTAC se définit donc de façon similaire aux problèmes dont il est la généralisation (PPC & PPR), mais une contrainte sur la capacité totale des véhicules est ajoutée. L'ajout de cette contrainte ne fait qu'augmenter la difficulté de résolution du problème qui est déjà ardue. Le caractère NP-dur du problème a poussé les chercheurs à développer des heuristiques qui peuvent être regroupées en trois catégories : les méthodes de construction simple, les méthodes constructives à deux phases et les adaptations de méta-heuristique. Voici une brève description des principales méthodes et ce, pour chacune des catégories.

- **Les méthodes de construction simple**

Ces types d'heuristiques sont parmi les plus simples à utiliser pour la construction de tournées admissibles.

« **Construct-Strike** », proposé par Christofides en 1973, consiste à construire une tournée admissible, qui lorsqu'elle est retirée du graphe, ne le déconnecte pas. Une fois cette tournée trouvée, elle est enlevée du graphe initial et on réitère la recherche d'une autre tournée avec les arêtes restantes. Ce processus est répété jusqu'à ce que toutes les arêtes soient desservies.

« **Path-Scanning** » utilisé par Golden et al. en 1983, consiste à construire, arête par arête, les tournées admissibles en choisissant toujours l'arête qui satisfait le mieux le critère de sélection choisi. Lorsque qu'on ne peut plus insérer de client dans la tournée, le retour au dépôt est fait en utilisant le plus court chemin.

« **Augment-Merge** » proposé par Golden et Wong en 1981 est, quant à lui, inspiré de l'algorithme de Clarke et Wright (1964), utilisé pour le problème de tournées sur les sommets avec capacité. Débutant avec un ensemble de tournées ne desservant chacune qu'une seule arête, le nombre de tournées est réduit en transférant les arêtes d'une tournée vers une autre ou en fusionnant deux tournées.

« **Parallel-Insert** », proposé par Chapleau et al. en 1984, est inspiré des procédures utilisées pour la résolution du problème de voyageur de commerce. Cette fois, deux stratégies d'insertion complémentaires sont utilisées : déterminer l'arête qui minimise le détour provoqué par l'insertion et déterminer quel client non desservi doit être inséré. Il est à noter qu'en plus des contraintes de capacité, une limite sur la longueur des tournées est imposée.

« **Augment-Insert** », proposé par Pearn en 1991, combine les principes utilisés dans « *Augment-Merge* » et dans « *Parallel-Insert* ». La première phase de construction est semblable à l'étape de transfert d'arêtes d'une tournée à l'autre de la méthode « *Augment-Merge* ». Pour ajouter les arêtes non traitées, la deuxième phase de construction utilise les stratégies d'insertion de la méthode « *Parallel-Insert* ».

- **Les méthodes constructives à deux phases**

Les méthodes appartenant à cette classe peuvent être séparées en deux catégories. La première se nomme « route first-cluster second » et elle regroupe les algorithmes qui construisent une seule grande tournée incluant tous les clients à visiter et qui par la suite, partagent cette tournée en plusieurs tournées admissibles (ULUSOY, 1985). La deuxième catégorie appelée « cluster first- route second » englobe les heuristiques qui, à prime à bord, forment des grappes de clients où la capacité n'est pas dépassée. Ensuite, elles créent pour chacune des grappes un circuit desservant les clients (BENAVENT, 1990). Dans chacune des deux approches, la construction de tournées se fait généralement à l'aide de la résolution d'un problème de postier rural.

- **Les adaptations de méta-heuristiques**

Ces méthodes ont grandement évolué ces dernières années. Ce sont généralement des méthodes de recherche locale (méthode tabou, recuit simulé) qui sont les plus performantes pour la résolution de problème de tournées sur les arcs avec capacité (EGLESE, 1994 et HERTZ, 2002).

2.4 Résumé

Voici un tableau récapitulatif des divers types de problèmes de tournées sur les arcs présentés dans cette section. Les informations du tableau sont tirées du tableau présenté par Assad et Golden (1995).

Notons que ce tableau suppose un graphe $G = (V, E \cup A)$ fortement connexe ou simplement connexe pour $A = \emptyset$, R est l'ensemble des arcs à desservir et le tiret (-) signifie que le choix des arêtes ou des arcs est arbitraire tout en respectant la connexité du graphe.

Tableau 2-1. Tableau récapitulatif des différents problèmes traités au chapitre 2

Problème	A	E	R	Complexité	Remarque
<i>PPC non orienté</i>	$\emptyset$	-	$R=E$	<i>Polynomial</i>	<i>Résolu à l'aide d'un algorithme de couplage en $O(V ^3)$.</i>
<i>PPC orienté</i>	-	$\emptyset$	$R=A$	<i>Polynomial</i>	<i>Résolu à l'aide d'un problème de flot en $O(V ^3)$.</i>
<i>PPR non orienté</i>	$\emptyset$	-	$R \subset E$	<i>NP-dur</i>	<i>Peut-être résolu polynomialement si G_R est connexe.</i>
<i>PPR orienté</i>	-	$\emptyset$	$R \subset A$	<i>NP-dur</i>	<i>Peut-être résolu polynomialement si G_R est connexe</i>
<i>PTAC non-orienté</i>	$\emptyset$	-	$R \subset E$	<i>NP-dur</i>	<i>Tous les véhicules ont la même capacité</i>

Les problèmes présentés dans le chapitre 2 sont des problèmes de base qui ne sont que très peu utilisés directement lors de la résolution de problèmes réels. Ils sont par contre grandement utilisés comme base pour l'élaboration d'heuristiques et/ou d'algorithmes nécessitant des contraintes additionnelles indispensables à la résolution des problèmes réels. L'explication de ces problèmes classiques est en plus nécessaire à la compréhension des algorithmes qui seront traités tout au long de ce mémoire sur la confection de tournées de véhicules.

2.5 Concept de « belles » tournées

Le concept de « belle » tournée est encore très peu étudié ou mentionné dans la littérature scientifique. La grande majorité des publications est orientée vers la recherche de coûts optimaux de transport, la couverture totale du réseau en un minimum de tournées, la minimisation de la longueur des tournées de couverture, etc. Par contre, très peu de publications mentionnent l'importance de créer des tournées opérationnellement réalisables.

Cette réalité a été soulignée par le Ministère des Transports du Québec, en mentionnant que les algorithmes de création de tournée de monitoring avaient tous le même défaut. Ils créent certes des tournées optimales sur le plan des distances totales, mais les utilisateurs ne veulent jamais les utiliser parce qu'elles n'avaient aucune qualité opérationnelle. Les défauts mentionnés sont entre autres la création de tournées en arrêtes de poisson ou en arbres avec de nombreux retours ou virages en U. Le MTQ définit les deux principales qualités d'une tournée pour que leur utilisateur la trouve attrayante :

- utilise de longs segments, c'est-à-dire des tournées se dirigent le plus possible dans la même direction;
- évite les allers-retours non nécessaires et les virages en U.

Dans son ouvrage, Marzolf (2003) mentionne que la difficulté de création de « belles » tournées reste un frein à l'acceptation des tournées par les patrouilleurs du MTQ. Il suggère aussi que de « belles » tournées devraient tenter de prendre la forme de cercle ou de double goutte d'eau pour ainsi s'approcher des tournées créées manuellement avec l'expérience des patrouilleurs. Il qualifie même cette caractéristique de fondamentale.

Le prochain chapitre présentera la modélisation du problème de création de « belles » tournées abordé dans cet ouvrage.

CHAPITRE 3 - MODÉLISATION MATHÉMATIQUE DES « BELLES » TOURNÉES

La modélisation est l'étape critique de la résolution d'un problème. Elle permet de représenter par un modèle bien défini le fonctionnement du problème qui est étudié. La définition de ce modèle permet de structurer l'ensemble de l'information disponible et nécessaire de manière à obtenir un résultat satisfaisant l'objectif visé qui est, dans le cas présent, une tournée utilisable à des fins opérationnelles. Ce chapitre a comme objectif d'exposer le modèle mathématique qui permettra de satisfaire aux contraintes reliées au monitoring.

Cette présentation sera faite en deux temps. Premièrement, une explication globale de la modélisation mathématique ainsi que des raisons du choix de ce modèle sera fournie. Deuxièmement, une méthode d'évaluation selon certains critères de performance sera définie. Ces critères serviront à mesurer l'efficacité des solutions obtenues par la résolution du problème à l'aide du modèle mathématique.

3.1 Modélisation mathématique de la construction de « belles » tournées opérationnelles

Cette section est consacrée à la présentation du modèle mathématique. La première partie identifiera les problèmes rencontrés lors de la construction de tournées; ce qui rend la plupart des solutions non acceptables d'un point de vue opérationnel et ainsi justifier le choix de la stratégie choisie. Par la suite, l'idée générale retenue pour la construction de tournées opérationnellement acceptables sera exposée pour ensuite expliquer en détail l'approche de la stratégie du « Look-ahead ».

3.1.1 Problématique de la construction des « belles » tournées

La complexité de construction de belles tournées est d'une part reliée aux méthodes mathématiques utilisées, et d'une autre part reliée à l'importance non négligeable des prises de décision nécessaires à l'obtention d'une bonne solution. Ces deux aspects de la construction sont extrêmement difficiles à combiner à l'intérieur d'un même modèle. Ceci explique qu'il existe dans la littérature plusieurs modèles qui optimisent au maximum une solution mathématique et d'autres modèles qui, eux, laissent une grande place à la prise de décision. Très peu de modèles, combinent les deux aspects de manière satisfaisante.

Les méthodes de construction présentes dans la littérature sont à quelques exceptions près basées sur le critère du plus court chemin, puisque l'objectif est habituellement la minimisation des distances. L'utilisation d'un tel critère combiné à l'objectif de minimisation des chemins a tendance à créer des itinéraires en forme « d'arêtes de poisson » tel que représenté à la Figure 3-1.

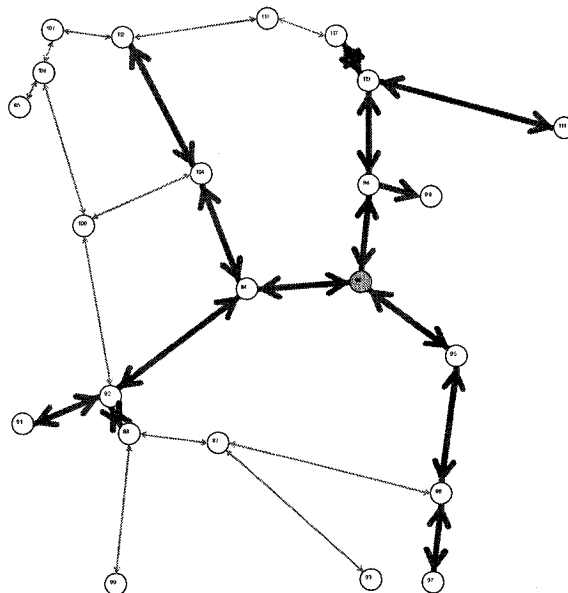


Figure 3-1. Exemple de graphe en arêtes de poisson

Ce type de résultat est sans doute près de l'optimal d'un point de vue mathématique, puisque la structure en arêtes de poisson a tendance à minimiser la distance parcourue, mais le nombre d'aller-retour produits par cette solution rend l'itinéraire pratiquement inutilisable dans la réalité. Par contre, le circuit de la Figure 3-2, a sensiblement la même distance de parcours (205 km versus 206 km), mais a une allure plus attrayante. Ce circuit contient des allers-retours que sur les portions du graphe qui l'obligent, c'est à dire sur des arcs qui mènent à des impasses. Il a de plus une structure qui ressemble à deux gouttes d'eau ou un 8 ayant le dépôt comme point de rencontre.

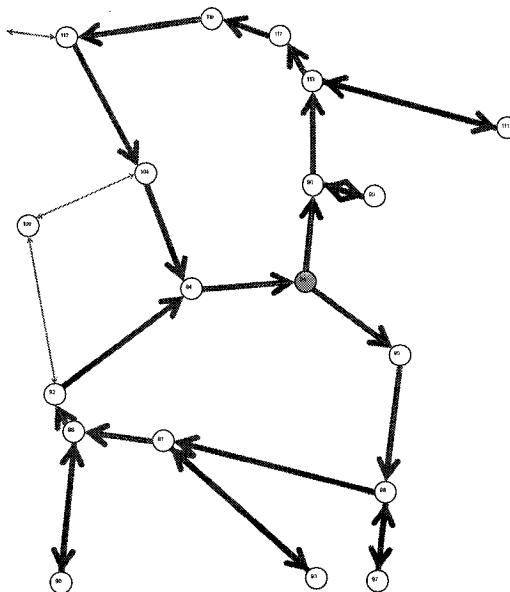


Figure 3-2. Exemple de belle tournée

Ce genre de circuit sont jusqu'à maintenant construit manuellement avec l'expérience des planificateurs et dont la structure recherchée se rapproche plus de la double goutte d'eau que de l'arête de poisson, ne peut avoir comme seul critère la minimisation globale de la distance parcourue. Le modèle idéal de construction de ce type de tournée doit permettre une certaine flexibilité ou même une modification vis-à-vis les critères de minimisation, c'est-à-dire que la décision de la continuation de la tournée doit pouvoir se faire sur d'autres critères que celui de la minimisation globale.

3.1.2 Idée générale de construction simple

Le type d'algorithme qui donnerait la flexibilité espérée pour la construction de « belles » tournées inclurait d'examiner un critère sur les arcs³ adjacents aux nœuds possibles afin d'évaluer la direction la plus avantageuse à emprunter. L'algorithme ira d'un nœud à un nœud adjacent à chaque itération. De cette manière, les critères peuvent varier d'itération en itération selon les besoins. Cette sorte d'algorithme est bien connue et s'intègre dans la famille des algorithmes « *Path-Scanning* ». Voici l'algorithme de base simplifié de cette méthode :

où C_{ij} : un critère de choix quelconque pour l'exemple suivant

Étape 1 : Pour chaque arc sortant du nœud i calculer : C_{ij}

Étape 2 : Trouver (i, j_m) où $j_m = \arg[\min\{C_{ij}\}]$,

- S'il existe un arc (i, j_d) où $(d=1,2,\dots,k)$ non couvert qui mène à une impasse, ajouter l'arc (i, j_d) et (j_d, i)
- Sinon, ajouter l'arc (i, j_m) et définir $i = j_m$

Étape 3 : Répéter l'étape 1 et 2 jusqu'à ce que tous les arcs aient été couverts.

Maintenant, regardons cet algorithme simplifié à l'aide d'un exemple. La Figure 3-3 représente le graphe théorique sur lequel l'exemple est basé. L'objectif recherché sera de couvrir entièrement le réseau avec un coût minimum. Afin de mieux comprendre l'exemple ci-dessous, voici quelques éléments des figures :

- Le nœud grisé est le prochain nœud d'évaluation des options. 
- L'option (arc) sélectionnée sera représentée par un trait gras  C_{ij}
- Les arcs couverts sont représentés par un trait continu.  C_{ij}
- Les arcs non couverts sont représentés par un trait pointillé.  C_{ij}

³ L'idée est applicable autant à un graphe comportant des arêtes et/ou des arcs. L'utilisation du mot arcs sera privilégiée pour la suite du document évitant ainsi la redondance et la lourdeur de la double mention.

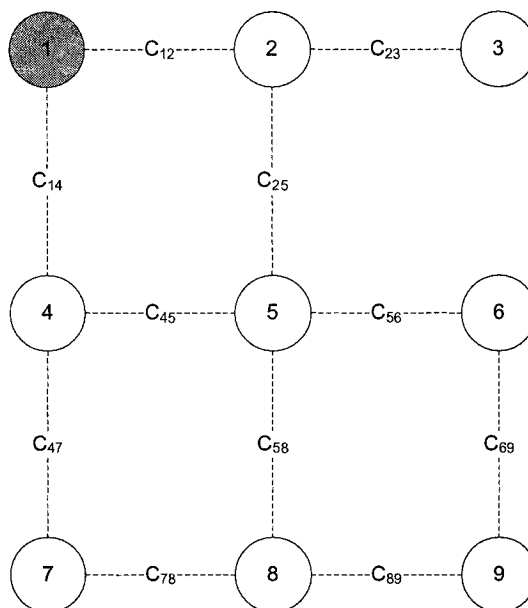


Figure 3-3. Exemple de base - graphe initial

À l'étape 1, représentée à la Figure 3-4, le coût C_{ij} est calculé pour chacun des arcs du graphe. Pour les fins de cet exemple, la valeur attribuée à chacun des arcs a été générée aléatoirement pour reproduire toutes les étapes de l'algorithme simplifié.

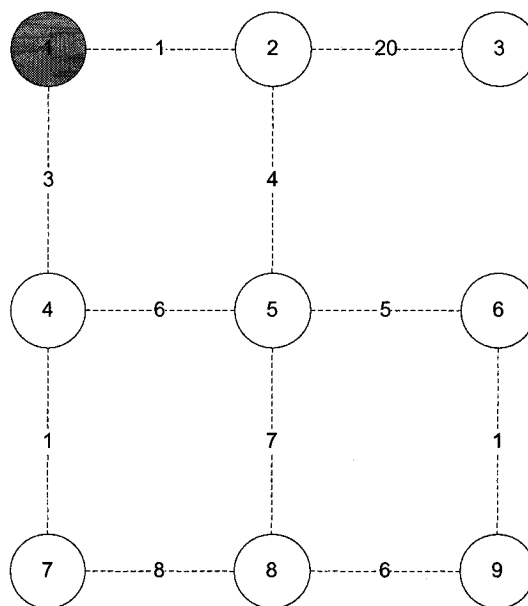


Figure 3-4. Exemple de base - graphe étape 1 de 3

Une fois que tous les arcs ont été associés à un coût et que le nœud d'évaluation a été choisi, il faut trouver l'arc sortant ayant la valeur minimale. Cet arc est par la suite ajouté à l'itinéraire et le nœud opposé défini comme étant le prochain nœud d'évaluation. Cette deuxième étape est représentée à la Figure 3-5. On peut y observer que l'arc (1,2) a été choisi puisque son coût égal à 1 est inférieur à celui de l'arc (1,4) qui est égal à 3 et ainsi, le nouveau nœud d'évaluation est maintenant le nœud 2.

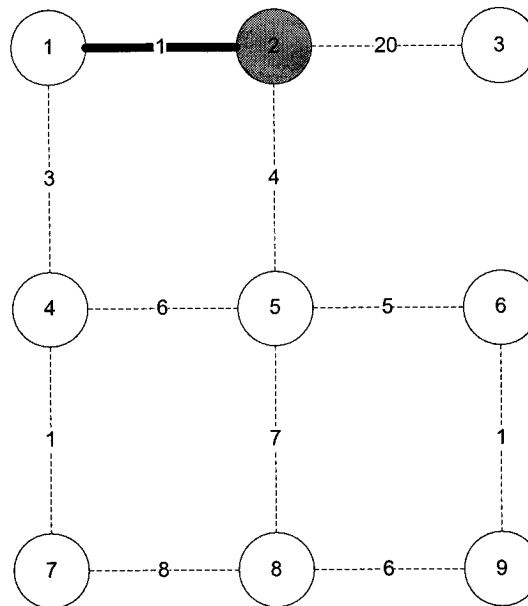


Figure 3-5. Exemple de base - graphe étape 2 de 3

Par la suite, il faut répéter les étapes 1 et 2 jusqu'à ce que tous les arcs aient été couverts. Les itérations 2 à 19 nécessaires à la couverture complète du graphe sont représentées à la Figure 3-6. L'étape numéro 1 de l'algorithme permet de modifier le coût des arcs. Dans cet exemple cette modification permettra d'augmenter le coût des arcs couverts en les multipliant par 10 pour empêcher les allers-retours sur le même arc. La situation d'impasse de l'étape 2 est représentée à l'itération 3. Sans la condition pour couvrir les impasses de l'étape 2, le choix aurait été l'arc (2,5), mais puisque l'arc (2,3) mène à une impasse, c'est ce dernier qui est choisi.

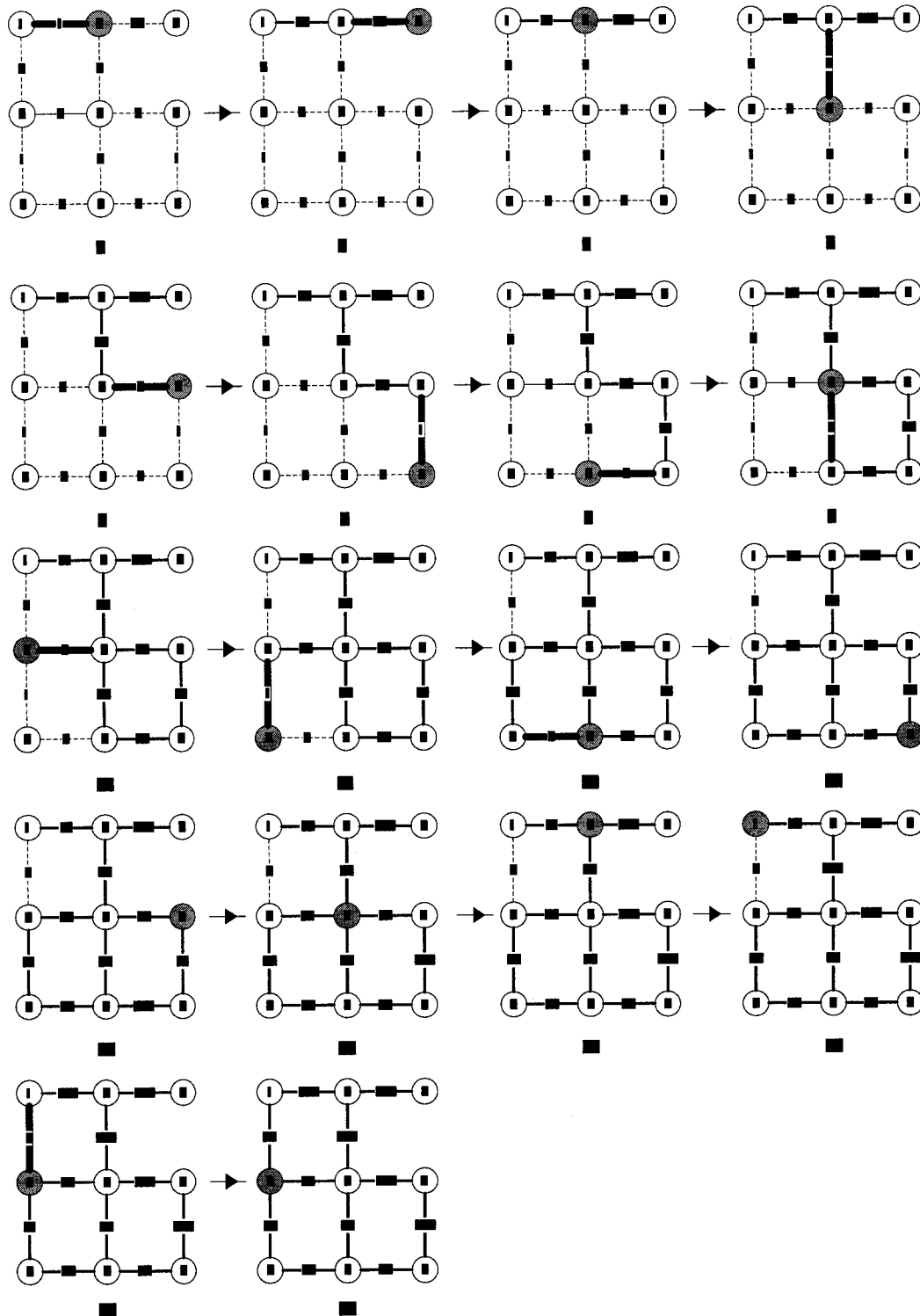


Figure 3-6. Exemple de base - graphe itérations 2 à 19

Une fois que tous les arcs sont couverts, le résultat de cet algorithme est le suivant :

Chemin : (1,2); (2,3); **(3,2)**; (2,5); (5,6); (6,9); (9,8); (8,5); (5,4); (4,7); (7,8); **(8,9)**; **(9,6)**;
(6,5); **(5,2)**; **(2,1)**; (1,4)

Coût Total : $1 + 20 + \mathbf{200} + 4 + 5 + 1 + 6 + 7 + 6 + 1 + 8 + \mathbf{60} + \mathbf{10} + \mathbf{50} + \mathbf{40} + \mathbf{10} + 3$
 $= 432$

Les éléments en caractère gras sont des chemins empruntés sans avoir de valeur ajoutée, c'est-à-dire que ces arcs avaient déjà été couverts précédemment dans l'itinéraire.

La carence principale de cet algorithme est qu'il est possible qu'un arc ait une valeur minimale pour un critère choisi, mais que les arcs subséquents ne sont pas nécessairement intéressants. L'exemple de la Figure 3-7, exprime bien cette situation. En utilisant l'algorithme de base, l'arc (1,2) sera choisi ayant un coût inférieur. Par contre le nouveau nœud d'évaluation offre des alternatives peu intéressantes. En sacrifiant le minimum local de la première itération, il aurait donc été possible d'optimiser les itérations subséquentes.

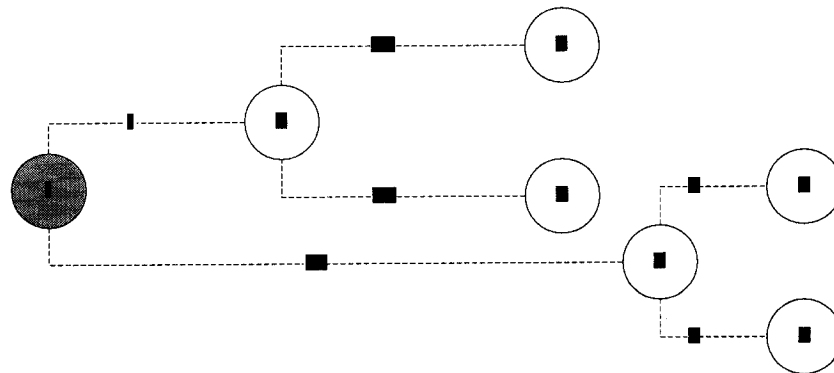


Figure 3-7. Exemple de carence de la méthode simplifiée

Une manière simple et efficace de pallier cette carence est de prendre en considération une suite possible d'arcs dont la longueur peut varier. La section suivante présentera la méthode « Look-ahead » qui comble ce manque.

3.1.3 La stratégie « Look-ahead »

L'idée de cette méthode basée sur le modèle de Amponsah & Salhi (2004) est d'examiner un ou des critère(s) sur une suite d'arcs adjacents possibles afin d'évaluer la direction la plus avantageuse à emprunter. L'algorithme va toujours d'un nœud à un nœud adjacent à chaque itération, mais cette fois-ci l'évaluation se fait en considérant un horizon plus grand. Cet horizon est constitué de chaînes temporaires qui serviront à choisir la meilleure option selon le ou les critère(s) choisi(s). La chaîne temporaire choisie sera celle qui optimise notre objectif. L'évaluation se base sur la valeur de chacun des éléments d'une chaîne temporaire, mais ce ne sont pas toutes ses composantes qui sont ajoutées à la tournée, mais seulement l'arc adjacent au nœud à l'étude. Par exemple, si la chaîne (A, B, C, D) est choisie, alors l'arc (A, B) est celui ajouté à la tournée et ensuite le processus reprend avec comme nœud d'évaluation le nœud B.

Voici l'algorithme de cette stratégie :

- Soit :
- J_c^n le nœud (jonction) à l'étude;
 - H l'horizon d'évaluation;
 - n position du nœud dans l'horizon d'évaluation; $n = 1, \dots, H$;
 - c le nombre de nœuds adjacents au nœud d'évaluation; $c = 0, \dots, r$;
 - $J_1^{n+1}, J_2^{n+1}, \dots, J_r^{n+1}$ les r nœuds adjacents au nœud d'évaluation;
 - Des chaînes d'arcs temporaires de longueur H, c'est-à-dire :
 $(J_c^n, J_1^{n+1}, \dots, J_1^{n+H}), (J_c^n, J_2^{n+1}, \dots, J_2^{n+H}), \dots, (J_c^n, J_r^{n+1}, \dots, J_r^{n+H})$;
 - $\delta_{J_c^n J_m^{n+1}}$ le coût d'emprunt d'un arc (J_c^n, J_m^{n+1}) où $m \in \{c, c+1, \dots, r\}$.

Étape 1 : À chaque itération, recalculer les critères et considérer toutes les r chaînes temporaires $(J_c^n, J_1^{n+1}, \dots, J_1^{n+H}), \dots, (J_c^n, J_r^{n+1}, \dots, J_r^{n+H})$ possibles du nœud à l'étude

Étape 2 : S'il existe un arc (J_c^n, J_m^{n+1}) , où $m \leq r$, qui doit être servi et qui mène à une impasse, ajouter l'arc (J_c^n, J_m^{n+1}) et revenir à J_c^n pour continuer la tournée.

Étape 3 : Pour chaque J_m^{n+1} , trouver $J_m^{n+2} = [\max_b \{ \delta_{J_m^{n+1} j_{b=1,2,\dots,u_m}} \}]$ où u_m est le nombre de noeuds adjacents à J_m^{n+1} ; $m = 1, 2, \dots, r$

Étape 4 : Trouver $\max_{m=1,2,\dots,r} \{ \delta_{j_c^n j_m^{n+1}} + \delta_{j_m^{n+1} j_m^{n+2}} \}$, par exemple $\max_{m=1,2,\dots,r} \{ \delta_{j_c^n j_1^{n+1}} + \delta_{j_1^{n+1} j_1^{n+2}} \}$ et ajouter l'arc (J_c^n, J_1^{n+1}) à la tournée.

Étape 5 : Définir $J_c^n = J_1^{n+1}$

Étape 6 : Retourner à l'étape 2 jusqu'à ce que tous les arcs soient servis.

Voici une application numérique de la méthode « Look-ahead » qui en facilitera la compréhension. Le graphe utilisé pour la représentation de l'algorithme de base simplifié de la section précédente sera repris pour cet exemple afin de permettre une comparaison des résultats obtenus entre ces approches.

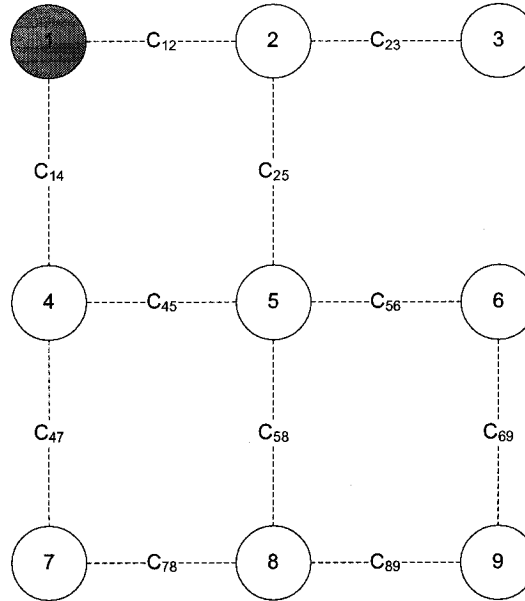


Figure 3-8. Exemple "Look-ahead" - graphe initial

L'intention de cet exercice n'étant pas la génération des coûts des arcs, ceux-ci seront les mêmes que ceux de l'exemple de la section précédente afin de ne pas biaiser la comparaison des deux algorithmes. Comme dans l'exemple précédent l'objectif sera de minimiser le coût de couverture complet du graphe. La Figure 3-9 représente le graphe initial affecté des coûts pour chacun des arcs.

L'horizon de recherche sera fixé à deux (donc $H = 2$) pour ne pas compliquer sans raison l'exercice. Ceci signifie qu'à chacune des itérations, le choix de l'arc qui sera ajouté à l'itinéraire sera basé sur le coût des chaînes temporaires composées de deux segments.

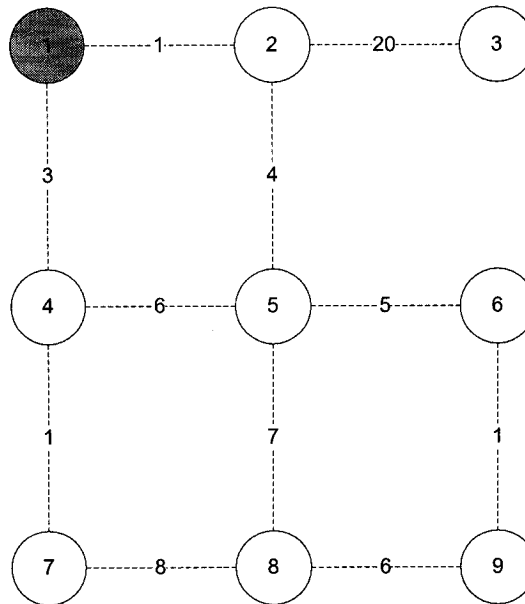


Figure 3-9. Exemple "Look-ahead" - graphe quantifié

La deuxième et la troisième étape de l'algorithme peuvent être regroupées à l'intérieur de la même phase de sélection. Il s'agit simplement de vérifier la condition de l'étape 2 à chaque itération de l'étape 3. Lors de la première phase, il faut construire toutes les chaînes temporaires de longueur 2 possibles à partir du nœud d'évaluation. Le nombre de chaînes temporaires est égal au nombre d'arcs sortants. Dans le cas du nœud 1, le

nombre de chaînes temporaires est égal à 2. Il faut choisir entre ajouter à l'itinéraire l'arc (1,2) ou l'arc (1,4). Voici donc le calcul de création des chaînes temporaires :

- Nœud d'évaluation = 1
 - Première chaîne :
 - $(1, 2, 3) = 1 + 20 = 21$
 - $(1, 2, 5) = 1 + 4 = 5$
 - On choisit la chaîne temporaire minimale $(1, 2, 5) = 5$
 - Deuxième chaîne :
 - $(1, 4, 5) = 3 + 5 = 8$
 - $(1, 4, 7) = 3 + 1 = 4$
 - On choisit la chaîne temporaire minimale $(1, 4, 7) = 4$

Les deux chaînes temporaires étant sélectionnées, l'étape suivante est de les comparer afin de choisir celle qui optimise l'objectif. La chaîne temporaire (1, 4, 7) ayant un coût inférieur à la chaîne (1, 2, 5), c'est donc l'arc (1,4) qui est ajouté à la tournée.

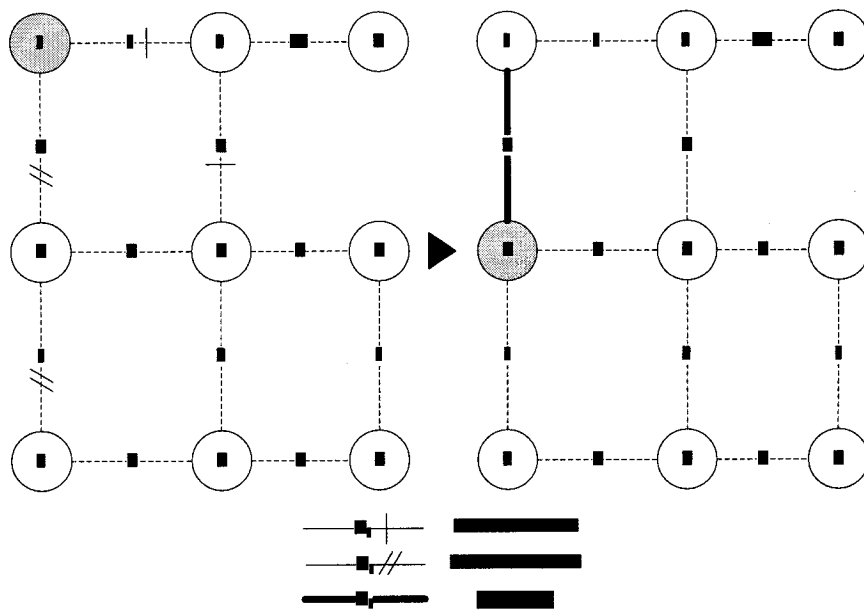


Figure 3-10. Exemple "Look-ahead" - itération 1 de 12

Une fois l'arc ajouté à la tournée, le nœud opposé adjacent à l'arc choisi est le nouveau nœud d'évaluation. La nouvelle itération permet de recalculer les coûts des arcs pour empêcher les allers-retours sur le même arc. Comme dans l'exemple précédant, le coût des arcs couverts est multiplié par 10. Les calculs de la deuxième itération sont les suivants :

- Nœud d'évaluation = 4
 - Première chaîne :
 - $(4, 1, 2) = 30 + 1 = 31$
 - On choisit la chaîne temporaire minimale **$(4, 1, 2) = 31$**
 - Deuxième chaîne :
 - $(4, 5, 2) = 6 + 4 = 10$
 - $(4, 5, 6) = 6 + 5 = 11$
 - $(4, 5, 8) = 6 + 7 = 13$
 - On choisit la chaîne temporaire minimale **$(4, 5, 2) = 10$**
 - Troisième chaîne :
 - $(4, 7, 8) = 1 + 8 = 9$
 - On choisit la chaîne temporaire minimale **$(4, 7, 8) = 9$**

Cette fois-ci, trois chaînes temporaires sont nécessaires (égal aux nombre d'arcs sortant du nœud d'évaluation) pour examiner toutes les alternatives possibles. La chaîne temporaire $(4, 7, 8)$ est la direction la plus avantageuse à emprunter comparativement aux chaînes $(4, 1, 2)$ et $(4, 5, 2)$, c'est donc l'arc $(4,7)$ qui est ajouté à la tournée. La Figure 3-11 présente graphiquement les différentes possibilités étudiées lors de la deuxième itération.

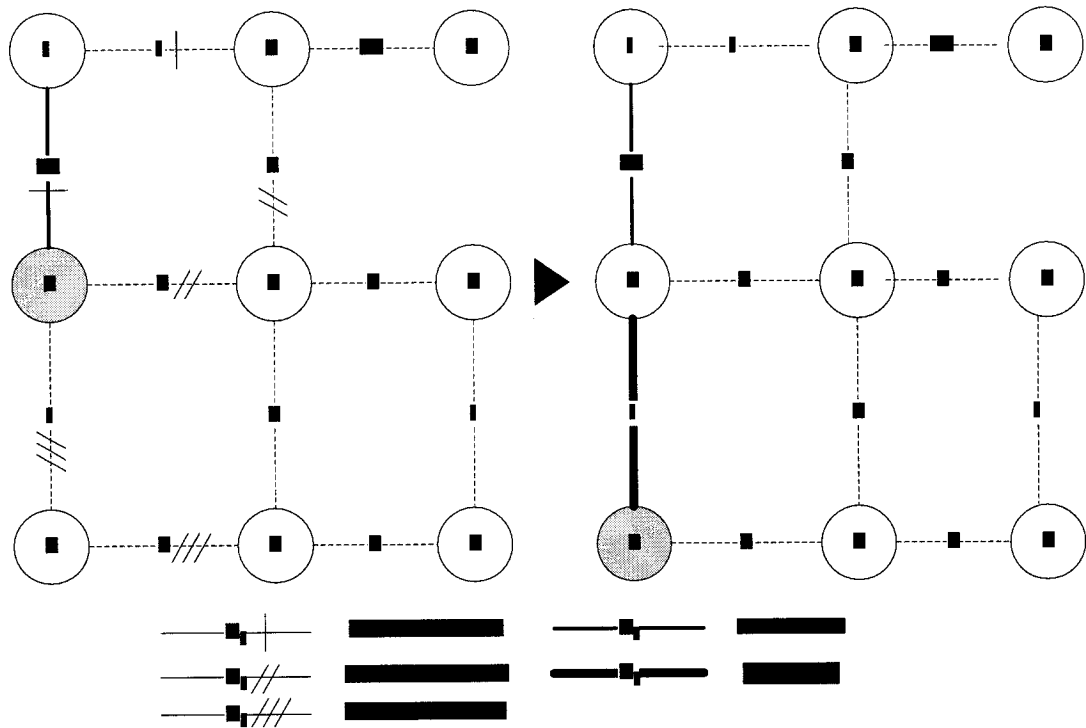


Figure 3-11. Exemple "Look-ahead" - itération 2 de 12

L'algorithme « Look-ahead » complète la couverture du graphe en 12 itérations. Le détail de ces itérations est présenté au Tableau 3-1.

Tableau 3-1. Exemple "Look-ahead" – ensemble des itérations

Itération	Chaînes temporaires	Coût	Arc choisi	Coût	Itération	Chaînes temporaires	Coût	Arc choisi	Coût
1	(1,2,5)	5	(1, 4)	3	7	(5,2,1)	5	(5, 2)	4
	(1,4,7)	4				(5,4,7)	16		
2	(4,1,2)	31	(4, 7)	1		8 ⁴	(5,8,9)		
	(4,5,2)	10			(2, 3)		20		
	(4,7,8)	9			(2,5,4)		46		
3	(7,4,5)	16	(7, 8)	8	9	(2,1,4)	31	(2, 1)	1
	(7,8,9)	14				(2,5,4)	46		
4	(8,7,4)	90	(8, 9)	6	10	(2,1,4)	31	(1, 4)	30
	(8,5,2)	11				(1,2,5)	50		
	(8,9,6)	7				(1,4,5)	36		
5	(9,8,5)	67	(9, 6)	1	11	(4,1,2)	40	(4, 5)	6
	(9,6,5)	6				(4,5,7)	13		
6	(6,9,8)	70	(6, 5)	5		12 ⁵	(4,7,8)		
	(6,5,2)	9			(5, 8)		7		

L'itinéraire fourni pour la couverture du réseau par la méthode « Look-ahead » est le suivant :

Chemin⁶ : (1,4); (4,7); (7,8); (8,9); (9,6); (6,5); (5,2); (2,3); **(3,2)**; (2,1); **(1,4)**; (4,5); (5,8)

Coût Total : 3 + 1 + 8 + 6 + 1 + 5 + 4 + 20 + **200** + 1 + **30** + 6 + 7 = 292

Les éléments en caractère gras sont des chemins empruntés sans valeur ajoutée, c'est-à-dire que ces arcs avaient déjà été couverts précédemment dans l'itinéraire.

⁴ L'arc (2,3) a été choisi puisqu'il satisfaisait les conditions de l'étape 2. Le coût associé est donc de l'aller (2,3) et le retour (3,2), soit 20 + 200 = 220.

⁵ L'arc (5,8) a été sélectionné puisqu'il était le dernier arc non couvert du graphe.

⁶ On compte 13 arcs dans le chemin, mais seulement 12 itérations. A l'étape de couverture des arcs menant à une impasse, on ajoute l'arc d'aller et de retour dans la même itération.

Il est maintenant possible de comparer les résultats de la méthode de construction simple avec ceux de la méthode « Look-ahead ». Le Tableau 3-2 présente ce parallèle basé sur les propriétés du graphe initial. Les méthodes sont évaluées par des critères très simples en quantité absolue ainsi qu'en pourcentage de surplus par rapport au graphe initial lorsque possible. Les critères établis sont le nombre d'arcs que chacun des itinéraires comportent, le nombre d'allers-retours créés et bien sûr le coût. Compte tenu que l'aller-retour obligatoire (2,3)-(3,2) ajoutait un coût élevé dans les deux algorithmes, un indicateur pour les coûts sans l'aller-retour (AR) est présenté.

Tableau 3-2. Comparaison des résultats - construction simple vs "Look-ahead"

	Graphe initial	Algorithme de construction simplifié	Algorithme "Look-ahead"	Différence entre les algorithmes
Chemin	-	(1,2); (2,3); (3,2); (2,5); (5,6); (6,9); (9,8); (8,5); (5,4); (4,7); (7,8); (8,9); (9,6); (6,5); (5,2); (2,1); (1,4)	(1,4); (4,7); (7,8); (8,9); (9,6); (6,5); (5,2); (2,3); (3,2); (2,1); (1,4); (4,5); (5,8)	-
Nombre d'arc de l'itinéraire	11	17	13	4
% de Surplus d'arc	-	54	18	36
Nombre d'aller-retour	-	1	1	0
Coût	62	432	292	140
% Surplus de coût	-	496	371	125
Coût Sans Aller-retour	62	232	92	140
% Surplus de coût sans AR	-	274	48	226

L'étude d'un horizon plus grand pour le choix de la meilleure direction à prendre diminue considérablement le coût ainsi que la longueur des chemins. La méthode « Look-ahead » supprime son opposante dans toutes les catégories, et parvient même à couvrir le graphe en réutilisant seulement un arc si, bien sûr, l'on exclut l'aller-retour.

Cette méthode manifeste donc un potentiel très intéressant dans le contexte de création de belles tournées opérationnelles. L'exploration des options possibles dans le futur est une perspective non négligeable puisque si l'on veut construire de « beaux » itinéraires, on ne peut se baser uniquement sur le plus court chemin ou le coût minimum.

Le potentiel est intéressant, mais lorsque cette approche est utilisée avec un seul critère, il est manifestement impossible de tenir compte de la capacité des tournées. Pour contourner ce problème, il est donc nécessaire de l'utiliser avec deux ou plusieurs critères selon la situation. Par exemple, si l'on prend la situation de construction de tournées de véhicules avec retour au dépôt, la combinaison des deux critères suivants a donné de bons résultats selon Amponsah & Salhi (2004) :

- 1- Si la capacité du camion est moins de 50 %, choisir le nœud j qui maximise la distance la plus courte entre j et le dépôt en incluant l'arc (i,j)
- 2- Sinon, choisir le nœud qui minimise la distance la plus courte entre j et le dépôt en incluant l'arc (i,j)

Dans la situation qui nous intéresse soit la création de « belles » tournées pour le monitoring, il faut non seulement tenir compte de la capacité de la tournée, mais aussi de l'impact du choix d'un arc qui sera inséré dans celle-ci ainsi que des contraintes opérationnelles. La capacité des tournées peut être facilement contrôlée à chaque itération à l'aide de comparaisons avec la distance qui sépare le nœud évalué et le dépôt. Pour ce qui est des deux critères établi par Amponsah & Salhi (2004), il faut donc considérer une série de paramètres reliés aux activités de monitoring et les inclure dans un nouveau modèle mathématique qui permettra de modifier la pondération des arcs selon la situation. La définition complète et l'explication de ces paramètres sera présentée au chapitre suivant, mais voici un exemple de paramètres qui pourraient être utilisés :

- 1- Coût des arcs tenant compte que le tronçon a déjà été couvert ou non, de sa longueur, du nombre de fois qu'il doit être couvert et de la vitesse réglementaire.
- 2- À chaque itération, évaluer l'éloignement du nœud d'évaluation par rapport au dépôt avec la distance du plus court chemin et si la différence entre les deux est près de 0, accorder plus de poids aux arcs de l'anti-arborescence.

Voici un exemple utilisant des paramètres supplémentaires. Dans cet exemple, le critère supplémentaire considéré sera la capacité de la tournée. Pour ce faire, un minimum de deux paramètres est nécessaire. Premièrement, la capacité de la tournée qui sera pour les fins de l'exemple égale à 100 unités. Ensuite, un paramètre contenant la valeur du chemin le plus court entre le nœud et le dépôt sera ajouté à chaque nœud du graphe afin de comparer l'éloignement du nœud. Comme dans les exemples précédents l'intention n'étant pas la génération des coûts des arcs, la valeur attribuée à chacun des arcs a été générée aléatoirement. L'objectif de cet exemple est donc de générer plusieurs circuits d'environ 100 unités qui couvriront un maximum d'arcs.

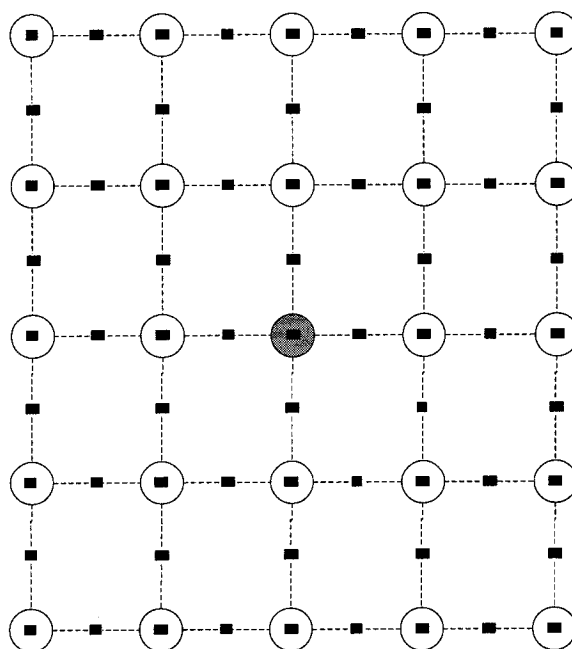


Figure 3-12. Exemple 2 "Look-ahead" - graphe initial

La Figure 3-12 représente le graphe initial affecté des coûts (en unité) pour chacun des arcs. Le dépôt, étant pour cet exemple le point de départ/arrivé, est situé cette fois-ci au centre du graphe (nœud grisé). L'horizon de recherche sera fixé à deux (donc $H = 2$) pour ne pas compliquer sans raison l'exercice. Ceci signifie qu'à chacune des itérations, le choix de l'arc qui sera ajouté à l'itinéraire sera basé sur le coût des chaînes temporaires composées de deux segments.

La stratégie du « Look-ahead » expliquée à l'exemple précédant doit être bonifiée, une étape supplémentaire est ajoutée à l'algorithme afin de considérer la capacité des tournées.

- Soit :
- J_c^n le nœud (jonction) à l'étude;
 - H l'horizon d'évaluation;
 - n la position du nœud dans l'horizon d'évaluation; $n = 1, \dots, H$;
 - c le nombre de nœuds adjacents au nœud d'évaluation; $c = 0, \dots, r$;
 - $J_1^{n+1}, J_2^{n+1}, \dots, J_r^{n+1}$ sont les r nœuds adjacents au nœud d'évaluation;
 - Des chaînes d'arcs temporaires de longueur H , c'est-à-dire :
 $(J_c^n, J_1^{n+1}, \dots, J_1^{n+H}), (J_c^n, J_2^{n+1}, \dots, J_2^{n+H}), \dots, (J_c^n, J_r^{n+1}, \dots, J_r^{n+H})$;
 - $\delta_{J_c^n J_m^{n+1}}$ le coût d'emprunt d'un arc (J_c^n, J_m^{n+1}) où $m \in \{c, c+1, \dots, r\}$;
 - Q la capacité de la tournée;
 - k la valeur du plus court chemin entre le nœud à l'étude et le dépôt;
 - p la somme des unités de la tournée en construction.

Étape 1 : À chaque itération, recalculer les critères et considérer toutes les r chaînes temporaires $(J_c^n, J_1^{n+1}, \dots, J_1^{n+H}), (J_c^n, J_2^{n+1}, \dots, J_2^{n+H}), \dots, (J_c^n, J_r^{n+1}, \dots, J_r^{n+H})$ possibles du nœud à l'étude

Étape 2 : S'il existe un arc (J_c^n, J_m^{n+1}) , où $m \leq r$, qui doit être servi et qui mène à une impasse, ajouter l'arc (J_c^n, J_m^{n+1}) et revenir à J_c^n pour continuer la tournée.

Étape 3 : Pour chaque J_m^{n+1} , trouver $J_m^{n+2} = \left[\max_b \left\{ \delta_{J_m^{n+1} J_b^{n+2}} \right\} \right]$ où u_m est le nombre de nœuds adjacents à J_m^{n+1} ; $m = 1, 2, \dots, r$

Étape 4 : Trouver $\max_{m=1,2,\dots,r} \{\delta_{j_c^n j_m^{n+1}} + \delta_{j_m^{n+1} j_m^{n+2}}\}$, par exemple $\max_{m=1,2,\dots,r} \{\delta_{j_c^n j_1^{n+1}} + \delta_{j_1^{n+1} j_1^{n+2}}\}$
et ajouter l'arc (J_c^n, J_1^{n+1}) à la tournée.

Étape 5 : Définir $J_c^n = J_1^{n+1}$

Étape 6 : Pour J_c^n évaluer $(Q - p) / (k + \epsilon)$.

- Si $(Q - p) / (k + \epsilon) \geq \text{facteur de risque}$; Retourner à l'étape 2 ;
- Si $(Q - p) / (k + \epsilon) < \text{facteur de risque}$; retourner au dépôt avec le plus court chemin et commencer une nouvelle tournée si nécessaire.

La valeur ϵ est ajoutée au dénominateur de l'expression $(Q - p) / (k + \epsilon)$ pour éviter les divisions par zéro lorsque le nœud d'évaluation est le dépôt. De plus, le facteur de risque de l'expression est fixé à 1,5 pour les fins de l'exemple, mais peut être modifiées selon l'importance du respect de la contrainte de capacité de tournée (facteur de risque). Plus le facteur de risque se rapproche de la valeur 1, plus la probabilité d'obtenir des tournées supérieures à la contrainte est grande. Le nombre de tournées générées est fixé à 10 pour les fins de cet exemple.

La Figure 3-13 représente l'ensemble des tournées générées à l'aide de l'algorithme présenté ci-dessus. Plusieurs observations qualitatives peuvent être tirées de ces résultats. Tout d'abord, les formes des tournées sont assez satisfaisantes, c'est-à-dire que plusieurs tournées sont en forme de cercle et non en arêtes de poisson, et ce en visitant tous les arcs du réseau. Les retours au dépôt par le chemin le plus court ont causé tous les allers-retours générés par l'algorithme.

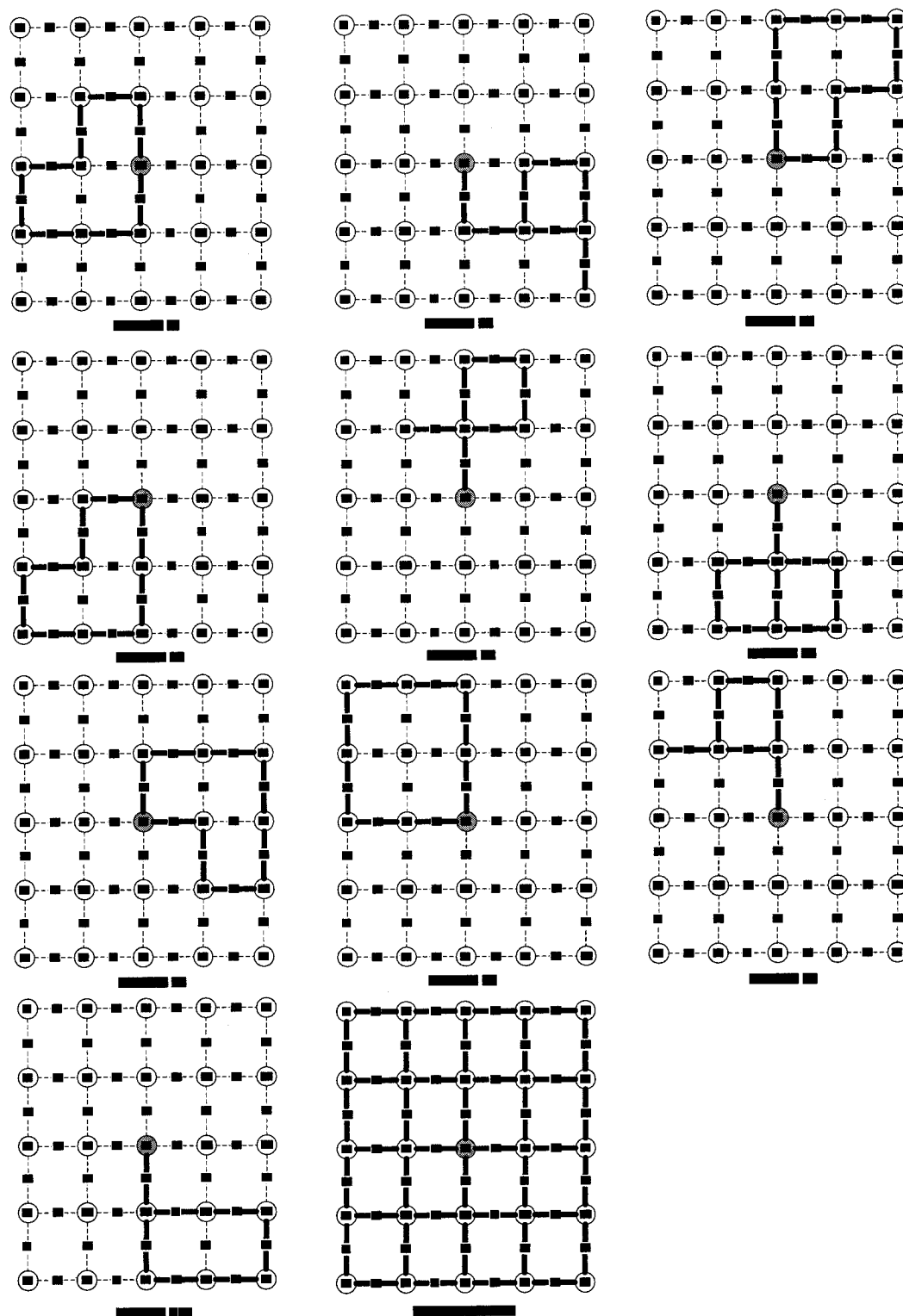


Figure 3-13. Exemple 2 "Look-ahead" - Ensemble des tournées

La flexibilité et la simplicité de l'algorithme « Look-ahead » lui permettent de prendre en considération plusieurs facteurs à la fois et même d'en modifier en cours de route si la situation l'oblige. De plus, lorsque l'heuristique est bien utilisée, ses qualités lui offrent la possibilité de construire un circuit à partir de zéro ou bien de continuer une tournée déjà amorcée. Cette latitude est très importante dans le contexte de ce mémoire puisque autant la construction initiale et que le traitement de la poursuite des activités lors d'un évènement sont étudiés.

La prochaine section présente différents indicateurs de performance qui aidera à mieux évaluer les résultats de l'algorithme.

3.2 Indicateurs de performance

Pour tout processus, qu'il soit opérationnel ou mathématique, la phase la plus difficile est toujours son évaluation. Les résultats recherchés varient énormément d'un décisionnaire à un autre. Ceci complique grandement les analyses puisque les objectifs de chacun sont souvent contradictoires. Pour éviter ce genre de différend, à savoir si un résultat est satisfaisant non, il est important, voire indispensable, de définir des indicateurs de mesure de la performance qui devront être utilisés par tous les acteurs afin d'avoir une base commune d'analyse.

Dans son analyse des activités de monitoring, Marzolf (2003) a défini les trois classes d'indicateurs suivants :

1. les indicateurs de performance des méthodes de planification;
2. les indicateurs de performance des activités réalisées;
3. les indicateurs de performance des acteurs.

L'objet de ce mémoire focalise sur la confection de tournées, ce qui s'incorpore dans la première classe d'indicateurs cités par Marzolf (2003). Cependant, certains indicateurs des trois classes peuvent être combinés et transformés pour obtenir une forte balise d'analyse afin de mesurer le rendement des tournées créées face aux besoins opérationnels.

La performance d'une méthode est mesurée par son efficacité à rencontrer les contraintes et exigences opérationnelles imposées. Il faut donc, dans un premier temps, s'assurer que les tournées créées respectent la capacité en distance demandée : **(Indication de Construction Longueur Tournée)**

$$ICLT_t = \frac{\sum_{A[t]} \text{Longueur arc}}{\text{Longueur max imale}}$$

$A[t]$ est l'ensemble des arcs
compris dans la tournée t

Par exemple, un $ICLT_1 = 0.95$ et $ICLT_2 = 1.10$ signifie que la longueur de la tournée 1 respecte la contrainte de capacité tandis que la tournée 2 la surpasse de 10 %. L'indicateur $ICLT_i$ l'utilise comme étant la longueur maximale souhaitée d'une tournée.

Ce type d'indicateur est intéressant puisqu'il permet de contrôler le respect d'une exigence pour chacun des circuits créés par l'outil, mais comme ce même outil permet de générer plusieurs tournées à la fois, une vision plus globale serait sans doute préférable afin d'être en mesure de juger l'ensemble de l'œuvre réalisée. L'agrégation de ces données, sous forme de moyenne ou autre, peut donc permettre d'avoir une bonne vue d'ensemble à l'aide d'une seule mesure. Toutefois, elle ne doit pas être employée seule puisqu'elle peut fausser quelque peu les données. (Indication de Construction Moyenne Longueur Tournée)

$$ICMLT_i = f \left[\frac{\sum_{A[i]} \text{Longueur Arc}}{\text{Longueur maximale}} \right] = f[ICLT_i]$$

f est une fonction d'agrégation (exemple : une moyenne)

Cette agrégation peut être adaptée afin de permettre de mesurer la capacité de l'outil à couvrir le réseau entier lors de la création de plusieurs tournées au cours d'un seul cycle. Bien évidemment, cet indicateur peut être exprimé en fonction de la distance : (Indication de Construction Capacité Longueur)

$$ICCL = \frac{\sum_T \text{Longueur tournée}}{\text{Longueur Réseau}} \quad \begin{array}{l} T \text{ est l'ensemble} \\ \text{des tournées construites} \end{array}$$

Il peut aussi s'exprimer en fonction de la distance unitaire. C'est-à-dire qu'un arc couvert plusieurs fois n'apparaît qu'une seule fois, ce qui donne une meilleure visibilité de la proportion du réseau réellement couvert. (Indication de Construction Capacité Longueur Unitaire)

$$ICCLU = \frac{\sum_T \text{Longueur Tournée Unitaire}}{\text{Longueur Réseau}}$$

Il peut aussi être représenté en termes de couverture, donc en fonction du nombre d'arcs visités préférablement qu'en fonction de la distance. (Indication de Construction Capacité Arcs)

$$ICCA = \frac{\sum_T \text{Nombre Arc Tournée}}{\text{Nombre Arc Réseau}}$$

Pour le même résultat de l'algorithme, la combinaison des trois indicateurs donne une plus grande possibilité d'analyse. Par exemple, avec simplement un ICCL = 1, la validité des itinéraires semble concluante, mais en ajoutant un ICCLU = 0,50 et un ICCA = 0,25, l'interprétation des résultats laisse plutôt anticiper une couverture d'un petit nombre d'arcs ayant de longues distances.

Dans le contexte du monitoring de réseau routier, la hiérarchisation des routes est extrêmement importante puisque certains tronçons doivent être visités plus souvent que d'autres. Par exemple, le Ministère du Transport du Québec catégorise ses routes comme étant de classe 1, 2 ou 3. Dans son analyse du problème de monitoring Marzolf (2003) a défini plusieurs indicateurs utilisant la classification des routes afin de vérifier l'efficacité de ses outils de planification. Ses indicateurs offrent la possibilité de quantifier les visites des routes de chaque classe dans une période. Ils peuvent facilement être adaptés au contexte de construction de tournée, puisqu'au lieu de vérifier une période, il est possible de contrôler un circuit ou simplement vérifier l'agrégation lors de la création de plusieurs circuits.

Dans un premier temps, pour vérifier les contraintes de fréquence de passage sur les différentes classes : (Indication de Construction Arc Classe)

$$ICAC_{t,c} = \sum_{A[t]} \text{Nombre Arc Classe Tournée}$$

$$ICMAC_{t,c} = f \left[\sum_{A[t]} \text{Nombre Arc Classe Tournée} \right] = f[ICA_{t,c}]$$

Par exemple, un $ICA_{1,3} = 9$ signifie que 9 arcs de classe 3 sont inclus dans la tournée 1.

Ce même indicateur peut être transformé de sorte qu'il compare la longueur des arcs d'une tournée avec la longueur des arcs du réseau et ce pour chaque tournée ou bien pour un ensemble de tournées. (Indication de Construction Longueur Classe)

$$ICLC_{t,c} = \frac{\sum_{A[t]} \text{Longueur Arc Classe Tournée}}{\sum_A \text{Longueur Arc Classe}} \quad \text{A est l'ensemble des arcs}$$

$$ICMLC_{t,c} = f \left[\frac{\sum_{A[t]} \text{Longueur Arc Classe Tournée}}{\sum_A \text{Longueur Arc Classe}} \right] = f[ICL_{t,c}]$$

Ici, un $ICLC_{2,2} = 0,10$ signifie que 10% de la longueur totale des arcs de classe 2 est visitée par la tournée 2.

Le défaut de cet indicateur est qu'il ne vérifie pas si les arcs sont parcourus plus d'une fois à l'intérieur de la même tournée. Dans ce cas, l'indicateur pourrait faussement être favorable dans la situation de plusieurs allers-retours sur le même arc. Pour contrer cet

effet, la comptabilisation doit se faire qu'une seule fois par arc, d'où l'utilisation de la longueur unitaire. (**Indication de Construction Longueur Classe Unitaire**)

$$ICLCU_{t,c} = \frac{\sum_{A[t]} \text{Longueur Unitaire Arc Classe Tournée}}{\sum_A \text{Longueur Arc Classe}}$$

$$ICMLCU_{t,c} = f \left[\frac{\sum_{A[t]} \text{Longueur Unitaire Arc Classe Tournée}}{\sum_A \text{Longueur Arc Classe}} \right] = f[ICLCU_{t,c}]$$

Les allers-retours non nécessaires souvent créés par les outils mathématiques recherchant la création optimale de tournées d'un point de vue longueur est un facteur affectant grandement « l'allure » des tournées. Le contexte présent tente de construire de « belles » tournées ce qui force à mesurer l'impact de ces allers-retours non obligatoires sur l'allure des tournées. (**Indication de Construction Aller Retour**)

$$ICAR_t = \sum_{A[t]} \text{Nombre Aller Retour Tournée}$$

$$ICMAR_t = f \left[\sum_{A[t]} \text{Nombre Aller Retour Tournée} \right] = f[ICAR_t]$$

Enfin, le dernier indicateur est plutôt d'ordre qualitatif. Puisque la notion de « belles » tournées peut être difficilement évaluée uniquement avec des indicateurs quantitatifs, l'indicateur sur un aspect qualitatif $ICBT_t$ jugera de l'allure de la tournée t selon le critère suivant : la forme (goutte d'eau, en 8, etc.) sur une échelle entre 0 et 1. Ce jugement peut être porté par un utilisateur ou par un décideur. (**Indication de Construction Belles Tournées**)

$$ICBT_t = \text{Forme de la tournée}$$

$$ICMBT_t = f[ICBT_t]$$

Tableau 3-3. Synthèse des indicateurs de performance

Indicateurs	Description
$ICLT_t, ICMLT_t^*$	Pourcentage de la capacité en distance utilisée par les tournées construites.
ICCL	Pourcentage de la distance du réseau couverte par les tournées construites lors d'une itération.
ICCLU	Pourcentage de la distance unitaire du réseau couverte par les tournées construites lors d'une itération.
ICCA*	Pourcentage d'arcs du réseau couverts par les tournées construites lors d'une itération.
$ICAC_{t,c}, ICMAC_{t,c}$	Nombre d'arcs de classe c visités par tournée construite
$ICLC_{t,c}, ICMLC_{t,c}$	Pourcentage de la longueur des arcs de classe c couverte par tournées construites
$ICLCU_{t,c}, ICMLCU_{t,c}^*$	Pourcentage de la longueur unitaire des arcs de classe c couverte par tournées construites
$ICAR_t, ICMAR_t^*$	Nombre d'aller-retour non obligatoire par tournée construite
$ICBT_t, ICMBT_t^*$	Pourcentage de satisfaction de l'allure des tournées construites.

Le Tableau 3-3 résume l'ensemble des indicateurs présenté, mais puisque certains indicateurs se regroupent et donnent le même type de mesure, un sous-ensemble indiqué par un * sera retenu pour l'évaluation de l'approche.

Ce troisième chapitre présente un modèle d'algorithme qui contient les qualités nécessaires à l'atteinte de l'objectif de création de « belles » tournées opérationnelles. L'approche « Look-ahead » est à la fois simple et extrêmement flexible. Ce chapitre présente le modèle ainsi que les indicateurs qui seront utilisés pour juger de son efficacité. La modélisation n'étant pas la finalité de ce mémoire, les deux prochains chapitres présenteront l'application de cette approche dans un contexte réel. Le chapitre 4 présentera l'implantation du modèle tandis que le chapitre 5 présentera les résultats et les critiques de l'utilisation de cette approche dans la problématique du monitoring du réseau autoroutier de la région de l'Estrie.

CHAPITRE 4 - IMPLANTATION

L'objet de ce chapitre est de présenter la mécanique nécessaire afin de pouvoir tester l'approche de construction de « belles » tournées à l'aide des données du réseau autoroutier de la région de l'Estrie du Ministère des Transports du Québec.

Tout d'abord, le réseau autoroutier utilisé pour la modélisation ainsi que ses contraintes opérationnelles seront décrits. Par la suite, une description sommaire de l'outil informatique utilisé sera présentée. Finalement, avant d'entreprendre le dernier chapitre abordant les résultats d'expérimentation, la flexibilité de l'approche sera confrontée à deux situations particulières afin d'étudier sa faisabilité.

4.1 Réseau de l'Estrie

Le territoire de l'Estrie est borné par la frontière séparant le Canada des États-Unis au sud et à l'est, et est délimité au nord par les régions de la Mauricie–Bois-Francs et des Chaudière-Appalaches, alors qu'à l'ouest, la Montérégie la sépare du fleuve Saint-Laurent.

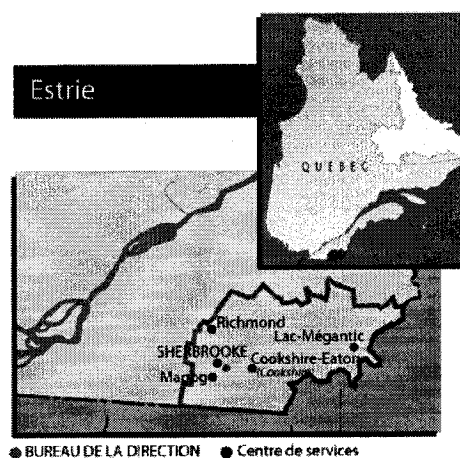


Figure 4-1. Limite territoriale de l'Estrie⁷

La densité de population de la région y est faible sauf dans la partie ouest, où la grande agglomération de Sherbrooke regroupe près de 50 % de la population.

Tableau 4-1. Caractéristiques de la région de l'Estrie⁷

Superficie du territoire	10 490 km ²	Nombre de municipalités	101
Population	290 497 habitants	Nombre de municipalités régionales de comté	7

⁷ Source : Ministère des transports du Québec : <http://www.mtq.gouv.qc.ca/fr/regions/estrie/index.asp>

4.1.1 Présentation du réseau

L'objet de cette section est de présenter le réseau utilisé lors de cette étude, ses caractéristiques principales et ses contraintes. L'étude a été réalisée à l'aide d'un réseau complètement orienté et hiérarchisé. Dans le contexte de cette étude, ces deux caractéristiques sont essentielles. Premièrement, un réseau orienté est absolument nécessaire afin de pouvoir représenter le passage dans les deux sens des différentes routes. Deuxièmement, la hiérarchisation est requise afin d'être en mesure de tenir compte des différentes exigences ou contraintes en matière de couverture d'arcs. Les caractéristiques et contraintes du réseau présenté dans cette section sont tirées d'information recueillies par le Ministère des transports du Québec ainsi que par l'étude de Marzolf (2003).

Le réseau est présenté géographiquement et mathématiquement à la Figure 4-2. Les définitions complètes des nœuds et liens (arcs) sont présentés à l'annexe A, mais la description de leurs caractéristiques est présentée au Tableau 4-2 pour les nœuds et au Tableau 4-3 pour les liens.

Tableau 4-2. Caractéristiques des nœuds

Nœud		
Caractéristique	Définition	Exemple
Id	Clé unique identifiant le nœud	101
PosX	Position en X du nœud (Pixel)	675,75
PosY	Position en Y du nœud (Pixel)	751,5
Nom	Nom du nœud	N101
Pcc	Valeur du plus court chemin vers le dépôt attribuée par l'algorithme	0
Dépôt	Valeur modifiée par l'algorithme si le nœud est sélectionné comme nœud de départ ou dépôt	0

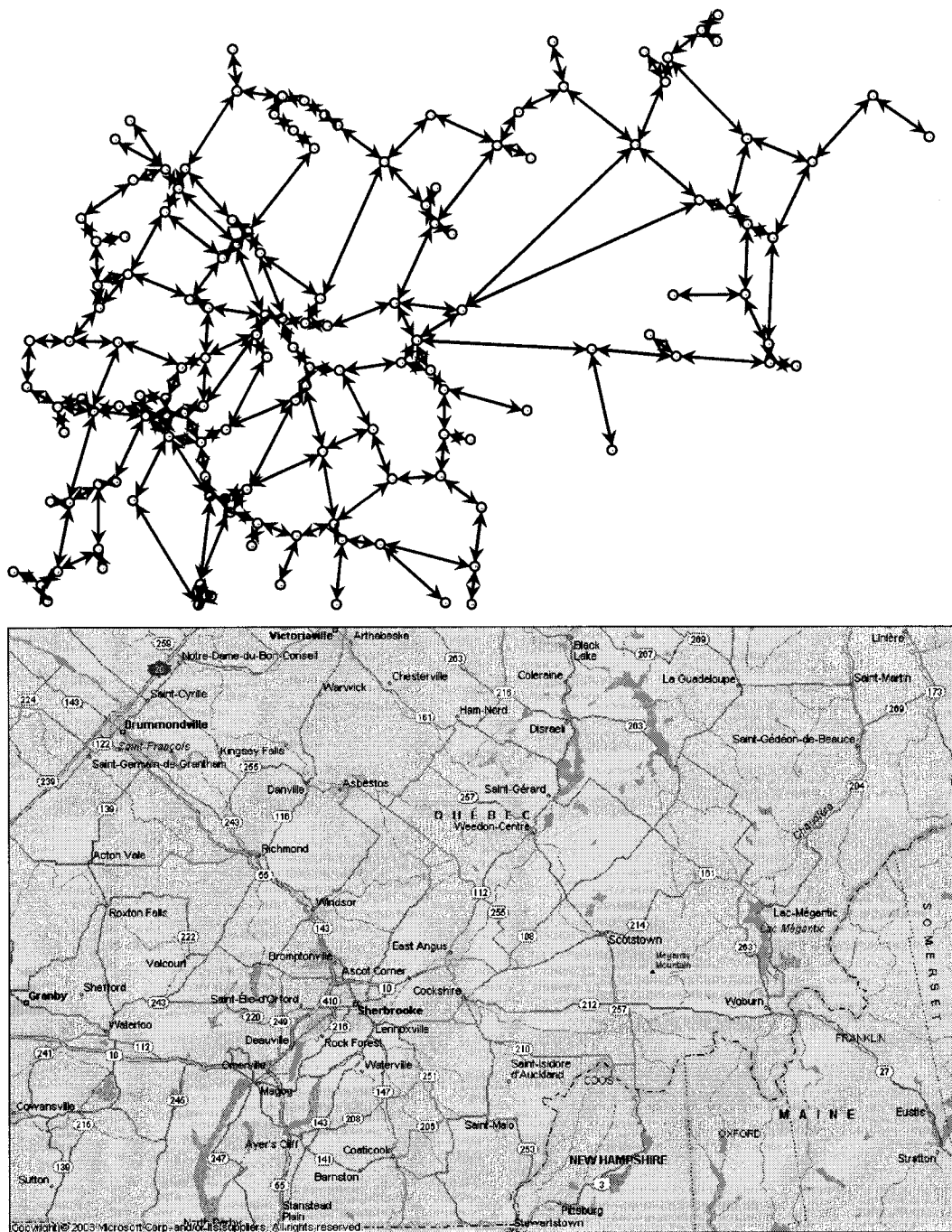


Figure 4-2. Représentation du réseau⁸

⁸ Source : Microsoft MapPoint 2004

Tableau 4-3. Caractéristiques des liens

Liens (Arcs)		
Caractéristique	Définition	Ex.
Id	Clé unique identifiant le lien	90
Source	Identificateur du nœud source	33
Target	Identificateur du nœud de destination	34
ca	Variable de coût, calculé par l'algorithme	0
obli	Variable indiquant que le lien est obligatoire (1) ou non obligatoire (10). Par défaut les liens sont non obligatoires.	10
Nom	Nom du lien	L402
Classe	Classe hiérarchique des liens (1, 2 ou 3)	1
Couverture	Variable indiquant si le lien a été couvert ou non. Par défaut, les liens sont non couverts.	1
penalite	Variable utilisé pour pénaliser les liens provoquant les allers-retours non obligatoires. Par défaut, la valeur est 1.	1
dist	Variable indiquant la longueur du lien. Cette variable peut être modifiée par l'algorithme si nécessaire.	3,6
distR	Variable indiquant la longueur réelle du lien. Cette variable est fixe et ne peut être modifiée par l'algorithme.	3,6
A__desservir	Variable indiquant que le lien est utilisé pour le retour au dépôt (1) ou non (0). Par défaut, la valeur est 0.	0
nbcircuit	Variable indiquant la quantité de fois que le lien est utilisé.	0

Chacun des liens du réseau appartient à une des classes de routes définies au Tableau 4-4.

Tableau 4-4. Différentes classes de routes⁹

Classes	Description
Autoroutes	Elles sont des voies de circulation rapide à accès limité ne comportant, sauf exception, aucun croisement à niveau. Elles sont numérotées de 0 à 99 et de 400 à 999
Routes nationales	Elles sont de grands axes interrégionaux et extra provinciaux, les liaisons entre les agglomérations urbaines principales (généralement de 25 000 habitants et plus), les corridors touristiques majeurs de même que les accès aux aéroports, ports et traverses maritimes d'importance internationale ou nationale.
Routes régionales	Elles comprennent les liaisons entre les agglomérations urbaines secondaires (généralement entre 5 000 et 25 000 habitants) de même qu'entre celles-ci et les agglomérations urbaines principales, les liaisons des centres ruraux (moins de 5 000 habitants) à caractère industriel, les accès aux stations touristiques majeures de même qu'aux aéroports, ports et traverses maritimes d'importance régionale. Les routes servant de seconde liaison entre deux agglomérations urbaines principales peuvent également faire partie de cette classe.
Routes collectrices	Elles comprennent les liaisons des centres ruraux (moins de 5 000 habitants) aux agglomérations urbaines et aux dessertes maritimes ou aériennes en région éloignée, de même que les principaux accès aux parcs gouvernementaux et aux stations touristiques d'importance régionale. Les routes servant de seconde liaison entre deux agglomérations urbaines secondaires peuvent également faire partie de cette classe.
Chemins d'accès aux ressources	Ils ont pour vocation exclusive de conduire à des zones d'exploitation forestière ou minière, à des installations hydroélectriques ou autres services publics, à des zones de récréation et de conservation de compétence provinciale ou fédérale, ou encore à ces carrières exploitées par le ministère des Transports.
Routes locales de niveau 1	Elles permettent de relier entre eux les centres ruraux (moins de 5 000 habitants) et de relier les autres concentrations de population d'une municipalité à son centre rural. En milieu rural, elles donnent également accès aux parcs industriels, aux industries lourdes, aux sites d'enfouissement sanitaire supra municipaux, aux principaux centres de ski locaux ainsi qu'aux traverses et aéroports locaux. Enfin, elles peuvent servir de seconde liaison entre les centres ruraux et les agglomérations urbaines
Routes locales de niveau 2	Elles donnent accès à la propriété rurale habitée en permanence (résidences, exploitations agricoles, industries, centres touristiques ou récréatifs, ports locaux, équipements municipaux, ou encore services de santé et d'éducation).
Routes locales de niveau 3	Elles donnent accès à la propriété rurale non habitée ou habitée uniquement en été (zones de villégiature). Aux fins de la classification fonctionnelle, les rues donnant accès à la propriété urbaine habitée font également partie de cette classe.

⁹ Source : Ministère des Transport du Québec : <http://www.mtq.gouv.qc.ca/fr/reseau/routes/classes.asp>

La hiérarchie du réseau utilisée n'est pas aussi détaillée que celle présentée par le Tableau 4-4 puisqu'une telle hiérarchie n'est pas nécessaire. Celle qui est utilisée pour cette étude est représentée par 3 classes d'arcs. La classe 1 représente les autoroutes, la classe 2 les routes nationales et la classe 3 les autres routes. Le Tableau 4-5 présente la proportion de chacune de ces classes dans le réseau. Le tableau fournit de plus des données statistiques concernant la longueur minimale, moyenne et maximale de chacune des catégories.

Tableau 4-5. Caractéristiques générales du réseau

	Nombre	Longueur (km)	Moyenne (km)	Longueur min (km)	Longueur max (km)
Nœuds	140				
Liens	374	2944	7.9	2.3	40.8
Liens classe 1	40	244	6.1	2.7	13.8
Liens classe 2	146	1126	7.7	2.3	37.4
Liens classe 3	188	1574	8.4	2.4	40.8

Puisque l'objectif de cette étude est de confectionner des circuits ayant une « allure » acceptable, l'utilisation de circuits déjà existants et créés manuellement avec l'expérience des planificateurs de circuits comme balise de comparaison est un atout important. L'ensemble des circuits prédéterminés utilisés par Marzolf (2003) sera utilisé comme balise. Les différents circuits, présentés en annexe B, possèdent les caractéristiques suivantes :

Tableau 4-6. Caractéristiques des circuits prédéterminés

Nombre de circuits	44 (22 + 22 inverses)		
	Moyenne	Minimum	Maximum
Nombre de liens par circuit	39	28	51
Longueur des circuits (km)	267.8	174.5	380.5

4.1.2 Contraintes du réseau

Le monitoring du réseau routier comporte plusieurs contraintes, que ce soit d'un point de vue opérationnel, contextuel ou relatif au réseau. Le Ministère des Transports du Québec a fourni une liste de paramètres qui peuvent contraindre les opérations de monitoring. Ces paramètres sont énoncés au Tableau 4-7.

Tableau 4-7. Paramètres reliés au Monitoring

Paramètres Monitoring	
Ponctuel	• Lieu Administratif • Destination • Itinéraire forcé (point) • Points noirs • Thématiques (éclairage, zone scolaire, etc.) • Mandats Spéciaux
Linéaire	• Itinéraire forcé (ligne) • Vitesse réglementaire
Réseau	• Classification fonctionnelle (autoroute, route nationale, etc.) • Type de chaussées • DJMA
Contextuel	• Région en situation d'urgence • Événements (chantier, permission de voirie, etc.) • Rupture de réseau • Période de l'année • Heures de pointe
Opérationnel	• Facteur de production en fonction des conditions climatiques • Couverture réseau • Trace de la tournée réalisée • Nombre de camion • Durée de l'intervention

Certains paramètres cités au tableau ci-dessus ne seront pas considérés dans cette étude. En effet, la grande majorité des contraintes demande une grande quantité d'information nécessitant une fréquence de mise à jour élevée, ce qui était difficile à obtenir. Par ailleurs, les paramètres en caractères gras sont d'une manière, directe ou non, considérés dans cette étude.

Les paramètres ponctuels sont représentés par le nœud de dépôt et le nœud de départ tandis que l'itinéraire forcé est traduit dans l'algorithme par la variable d'obligation. Les paramètres vitesse réglementaire et durée d'intervention sont combinés et représentés par la capacité maximale de la tournée. En effet, ayant une vitesse réglementaire de 50 kilomètres par heure durant des quarts de travail d'une durée de 7 heures, la durée ou longueur totale maximale de la tournée est de 350 kilomètres. Ce calcul est valide puisque contrairement aux problèmes de postier rural où les arcs non obligatoires sont parcourus plus rapidement (c'est-à-dire à une vitesse plus élevée) que les arcs obligatoires, tous les arcs appartenant au circuit dans ce problème sont dits obligatoires.

Pour ce qui est du facteur de la classification, il est intégré tel quel dans les paramètres de chacun des liens. Tant qu'au facteur de production en fonction des conditions climatiques, il est traduit par le facteur de risque de complétion de tournée. Il est utilisé pour évaluer si une tournée est au stade du retour au dépôt par le plus court chemin. Il peut donc être utilisé afin de gérer le taux de productivité selon les conditions climatiques en le mettant élevé lorsque les conditions sont mauvaises et bas lorsque la température semble plus clémente. Les tournées sont réalisées en tenant compte qu'un seul camion opère sur le réseau et que la couverture du réseau effectuée par ces tournées est mesurée avec des indicateurs de performance.

Le réseau étant défini, la prochaine section dévoilera les détails de l'application informatique créée pour cette étude.

4.2 Description de l'application informatique

La mise en œuvre de cette étude a été réalisée à l'aide des logiciels Microsoft Excel et Microsoft Access et des langages Visual Basic (VB) et Visual Basic pour application (VBA). Le cœur de l'application initialement créé par Trépanier (1999) donne entre autres la possibilité de visualiser les propriétés des réseaux. Cette application a ensuite été modifiée par Marzolf (2003) afin d'y ajouter des fonctionnalités reliées à la création et la visualisation de circuits. C'est dans le cadre des travaux d'Alberto Amaya avec le MTQ qu'une librairie en VB contenant des algorithmes classiques de recherche opérationnelle a été greffée à l'outil. Cette librairie permet donc d'effectuer certaines opérations de base comme la transformation d'un graphe en graphe eulérien, l'application des algorithmes du postier chinois, du postier rural, du calcul du plus court chemin selon les algorithmes de Bellman ou de Dijkstra pour n'en nommer que deux. Les fonctionnalités développées par Trépanier, Marzolf et Amaya ne seront pas expliquées en détails dans ce mémoire, sauf lorsque sa compréhension en dépend.

La grande force de cette application est qu'elle permet d'obtenir rapidement et plutôt facilement la visualisation des résultats obtenus, ce qui dans le cadre de cette étude est un facteur indispensable puisque l'allure et la forme des tournées sont au cœur de l'analyse. Outre l'algorithme en tant que tel, la réussite de cette étude repose sur la qualité et la simplicité de l'interface de visualisation ainsi que la capacité d'entreposer et d'analyser les données.

4.2.1 L'interface

L'interface présentée à la Figure 4-3 représente la visualisation générale d'un graphe.

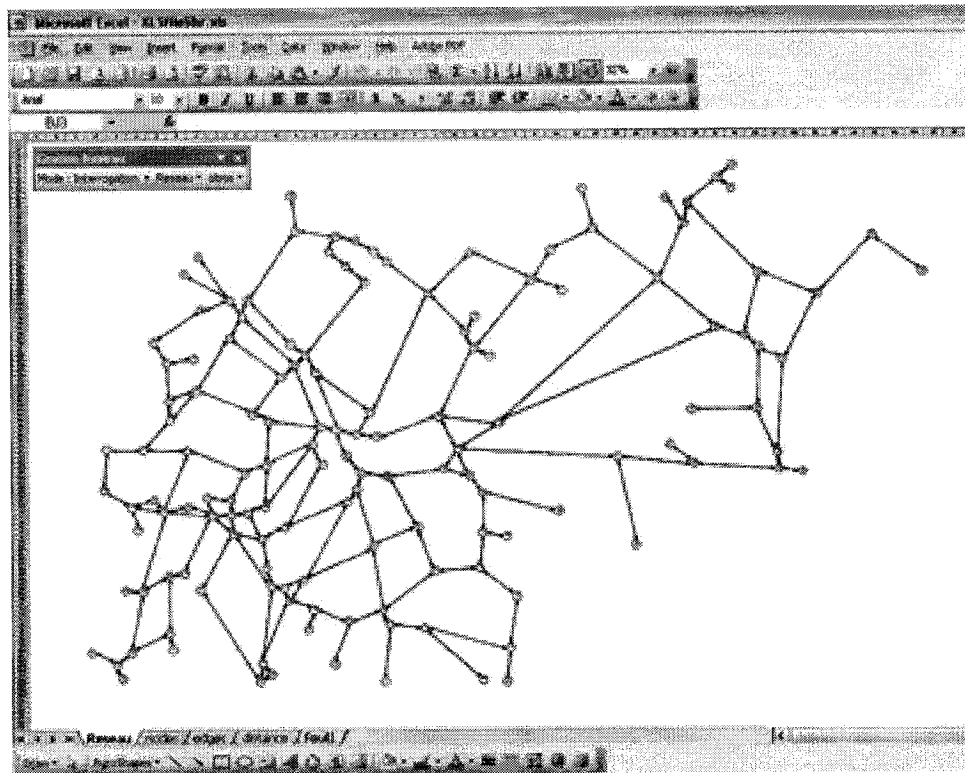


Figure 4-3. Interface de visualisation

La Figure 4-4 représente l'interface utilisée pour afficher les différents circuits résultant des algorithmes fournis par l'outil ou simplement des circuits créés manuellement.

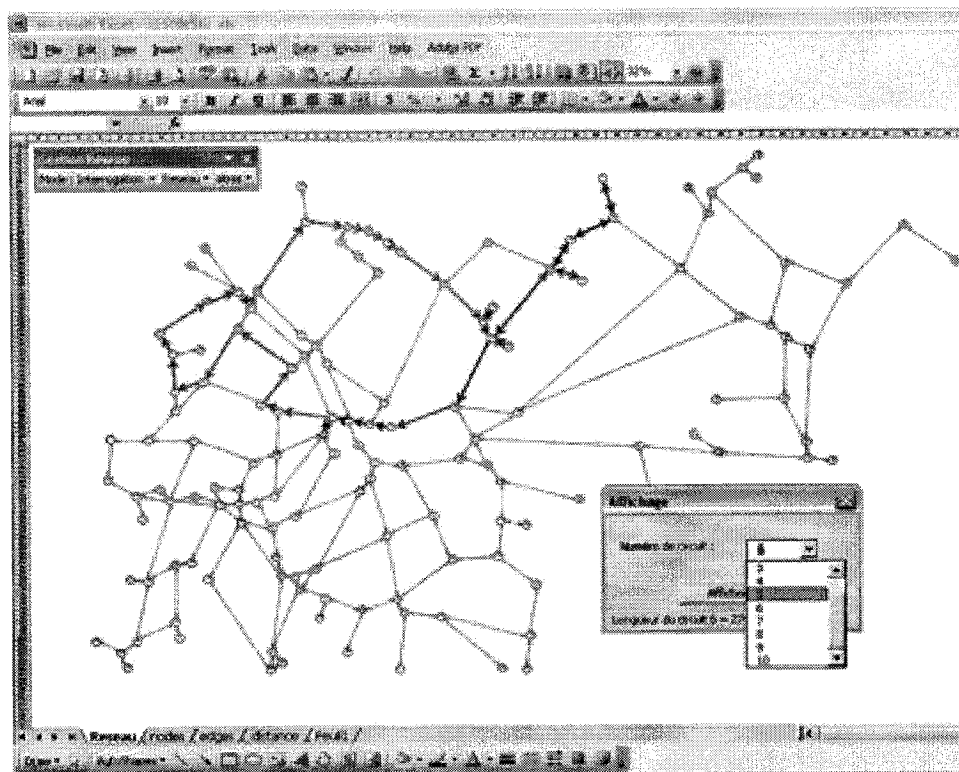


Figure 4-4. Interface d'affichage des circuits

4.2.2 Stockage des données

Puisque l'outil informatique ne maintient pas toutes les informations relatives au graphe en mémoire, il faut les stocker dans différentes feuilles de calculs. Au minimum deux feuilles sont nécessaires pour que tout fonctionne; l'une contient la définition des caractéristiques des nœuds et l'autre la définition des caractéristiques des liens (arcs). Un exemple de feuille de données représentant les caractéristiques des liens est présenté à la Figure 4-5.

Colonne 1	Colonne 2	Colonne 3	Colonne 4	Colonne 5	Colonne 6	Colonne 7	Colonne 8	Colonne 9	Colonne 10	Colonne 11	Colonne 12	Colonne 13	Colonne 14	Colonne 15	Colonne 16	Colonne 17	Colonne 18	Colonne 19	Colonne 20	Colonne 21	Colonne 22	Colonne 23	Colonne 24	Colonne 25	Colonne 26	Colonne 27	Colonne 28	Colonne 29	Colonne 30	Colonne 31	Colonne 32	Colonne 33	Colonne 34	Colonne 35	Colonne 36	Colonne 37	Colonne 38	Colonne 39	Colonne 40	Colonne 41	Colonne 42	Colonne 43	Colonne 44	Colonne 45	Colonne 46	Colonne 47	Colonne 48	Colonne 49	Colonne 50	Colonne 51	Colonne 52	Colonne 53	Colonne 54	Colonne 55	Colonne 56	Colonne 57	Colonne 58	Colonne 59	Colonne 60	Colonne 61	Colonne 62	Colonne 63	Colonne 64	Colonne 65	Colonne 66	Colonne 67	Colonne 68	Colonne 69	Colonne 70	Colonne 71	Colonne 72	Colonne 73	Colonne 74	Colonne 75	Colonne 76	Colonne 77	Colonne 78	Colonne 79	Colonne 80	Colonne 81	Colonne 82	Colonne 83	Colonne 84	Colonne 85	Colonne 86	Colonne 87	Colonne 88	Colonne 89	Colonne 90	Colonne 91	Colonne 92	Colonne 93	Colonne 94	Colonne 95	Colonne 96	Colonne 97	Colonne 98	Colonne 99	Colonne 100
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Figure 4-5. Feuille de données - Liens

Les informations stockées dans le chiffrier Excel sont les caractéristiques du réseau (position des nœuds, définition des liens, longueur des liens, etc.) ainsi que certaines variables et certains paramètres nécessaires à la résolution des différents algorithmes offerts (variable de coût, de couverture, du plus court chemin, etc.). Compte tenu de la particularité relationnelle qui unit les circuits et les liens (relation de type un à plusieurs), il est difficile d'exprimer facilement ce type de relation à l'aide de la plateforme Microsoft Excel. C'est pour remédier à cette lacune que la plateforme Microsoft Access a été utilisée pour le stockage de la définition des circuits. Cette plateforme permet de créer assez facilement un modèle relationnel de données (MRD) nécessaire à la définition des circuits. La Figure 4-6 présente le MRD complet utilisé dans le cadre de cette étude.

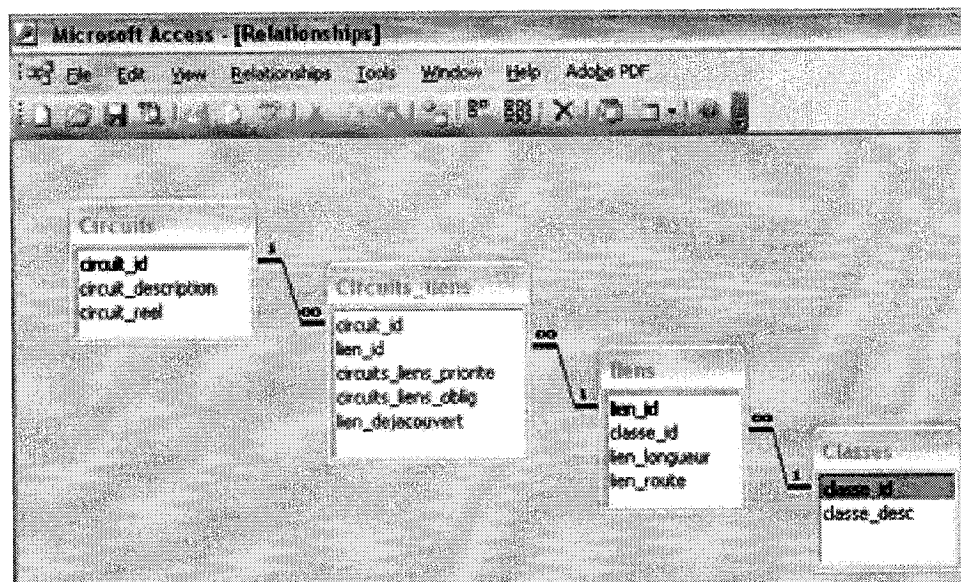


Figure 4-6. Modèle relationnel de données (MRD)

En plus de clarifier la structure des données, l'utilisation de la plateforme Microsoft Access facilite grandement la conception de requête afin de récolter de l'information sur les circuits, ce qui est essentiel à la construction des indicateurs de performance présentés à la section 3.2. Ces requêtes peuvent être conçues directement en langage SQL ou bien à l'aide de l'outil fourni par l'application. Par exemple, la requête présentée à la Figure 4-7 est utilisée pour obtenir le nombre d'arc dans les circuits.

```
SELECT Circuits_liens.circuit_id, Count(Circuits_liens.lien_id) AS CountOflien_id
FROM Circuits_liens
GROUP BY Circuits_liens.circuit_id;
```

Figure 4-7. Requête SQL - nombre d'arc dans les circuits

La même requête est présentée à la Figure 4-8, mais cette fois-ci avec l'outil fourni par l'application MS Access 2003.

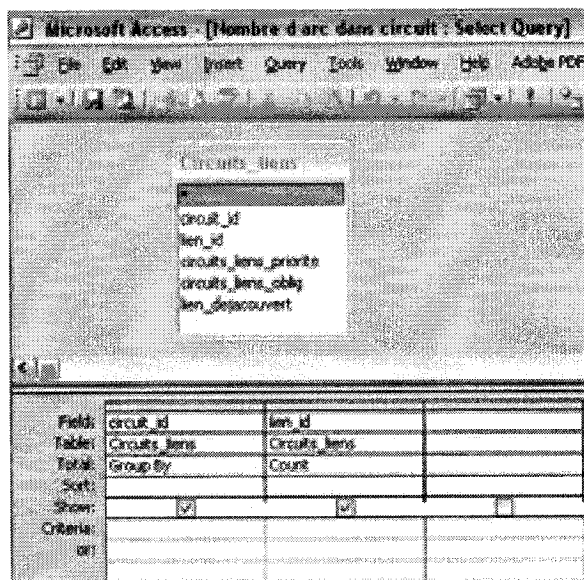


Figure 4-8. Requête avec l'outil MS Access - nombre d'arc dans les circuits

Puisque les données maîtresses du réseau se retrouvent dans les deux systèmes, il faut lors d'une modification apportée au réseau dans MS Excel, effectuer une synchronisation de la base de données.

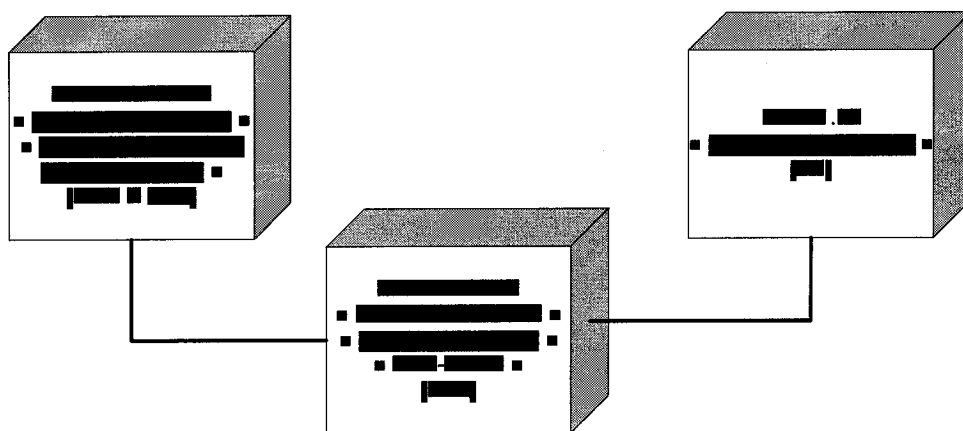


Figure 4-9. Lien entre les logiciels

4.2.3 L'approche Look-ahead

Cette section présente l'implantation de l'algorithme « Look-ahead ». Pour les fins de cette étude, l'interface nécessaire à l'exécution de l'algorithme est présentée à la Figure 4-10.

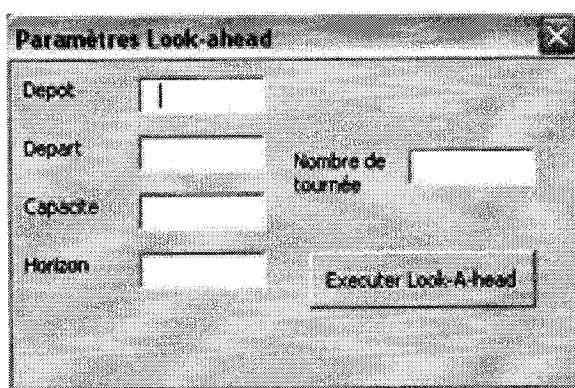


Figure 4-10. Interface de départ "Look-ahead"

Les paramètres de départ demandés sont les suivants :

- Dépôt : identification du nœud d'arrivée des tournées;
- Départ : identification du nœud de départ des tournées;
- Capacité : contrainte de capacité en kilomètre (km) pour une tournée;
- Horizon: nombre d'arcs à évaluer afin de choisir la direction la plus avantageuse;
- Nombre de tournée : Nombre de tournée que l'algorithme doit générer.

Ces paramètres sont tous des intrants indispensables permettant l'exécution du « Look-ahead ». L'algorithme logique est présenté à la Figure 4-11 tel qu'il avait été présenté à la section 3.1.3 pour faciliter la lecture de l'ouvrage.

- Soit :
- J_c^n le nœud (jonction) à l'étude;
 - H l'horizon d'évaluation;
 - n la position du nœud dans l'horizon d'évaluation; $n = 1, \dots, H$
 - c le nombre de nœuds adjacents au nœud d'évaluation; $c = 0, \dots, r$
 - $J_1^{n+1}, J_2^{n+1}, \dots, J_r^{n+1}$ les r nœuds adjacents au nœud d'évaluation
 - Des chaînes d'arcs temporaires de longueur H, c'est-à-dire :
 $(J_c^n, J_1^{n+1}, \dots, J_1^{n+H}), (J_c^n, J_2^{n+1}, \dots, J_2^{n+H}), \dots, (J_c^n, J_r^{n+1}, \dots, J_r^{n+H})$
 - $\delta_{J_c^n J_m^{n+1}}$ le coût d'emprunt d'un arc (J_c^n, J_m^{n+1}) où $m \in [c, r]$
 - Q la capacité de la tournée
 - k la valeur du plus court chemin entre le nœud à l'étude et le dépôt
 - p la somme des unités de la tournée en construction

Étape 1 : À chaque itération, recalculer les critères et considérer toutes les r chaînes temporaires $(J_c^n, J_1^{n+1}, \dots, J_1^{n+H}), (J_c^n, J_2^{n+1}, \dots, J_2^{n+H}), \dots, (J_c^n, J_r^{n+1}, \dots, J_r^{n+H})$ possibles du nœud à l'étude

Étape 2 : S'il existe un arc (J_c^n, J_m^{n+1}) , où $m \leq r$, qui doit être servi et qui mène à une impasse, ajouter l'arc (J_c^n, J_m^{n+1}) et revenir à J_c^n pour continuer la tournée.

Étape 3 : Pour chaque J_m^{n+1} , trouver $J_m^{n+2} = [\max_b \{ \delta_{J_m^{n+1} J_{b=1,2,\dots,u_m}^{n+2}} \}]$ où u_m est le nombre de nœuds adjacents à J_m^{n+1} ; $m = 1, 2, \dots, r$

Étape 4 : Trouver $\max_{m=1,2,\dots,r} \{ \delta_{J_c^n J_m^{n+1}} + \delta_{J_m^{n+1} J_m^{n+2}} \}$, par exemple $\max_{m=1,2,\dots,r} \{ \delta_{J_c^n J_1^{n+1}} + \delta_{J_1^{n+1} J_1^{n+2}} \}$ et ajouter l'arc (J_c^n, J_1^{n+1}) à la tournée.

Étape 5 : Définir $J_c^n = J_1^{n+1}$

Étape 6 : Pour J_c^n évaluer $(Q - p) / (k + \epsilon)$.

- Si $(Q - p) / (k + \epsilon) \geq$ facteur de risque; Retourner à l'étape 2 ;
- Si $(Q - p) / (k + \epsilon) <$ facteur de risque; retourner au dépôt avec le plus court chemin et commencer une nouvelle tournée si nécessaire.

Figure 4-11. Algorithme "Look-ahead"

L'algorithme informatique diffère quelque peu de l'algorithme logique. Toutes les étapes y sont respectées, mais il y a certaines étapes supplémentaires nécessaires et quelquefois certaines étapes logiques sont combinées ou segmentées. Voici l'algorithme informatique présenté sous forme de script dans le langage utilisé lors de l'implémentation, c'est-à-dire le VBA. Il est à noter que l'objectif de cet exercice n'était pas de créer un code optimal, mais bel et bien un code fonctionnel.

La Figure 4-12 présente la hiérarchie des fonctions et des sous-programmes principaux utilisés par l'outil. Chacune de ces fonctions ou sous-programme sera présentée et, si nécessaire, expliquée en établissant le parallèle avec l'algorithme logique du « Look-ahead ».

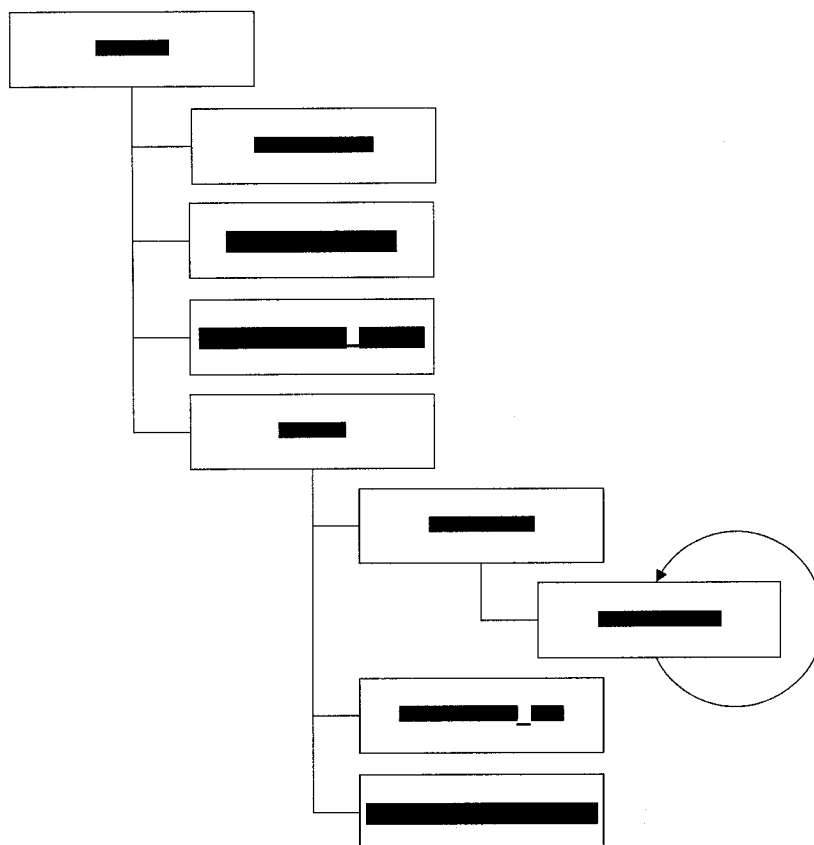


Figure 4-12. Hiérarchie des sous-programmes - Algorithme "Look-ahead"

L'architecture du programme consiste en un programme maître appelant des sous-programmes. Ce programme maître est nommé « lookAH » et la première partie est présentée à la Figure 4-13. La première étape est de mettre la définition du réseau en mémoire ce qui permet d'accélérer le traitement des calculs. Après s'être assuré que le réseau est bel et bien eulérien, un coût est appliqué à chacun des arcs du réseau. Cette affectation de coût correspond à la première étape de l'algorithme logique de la Figure 4-11.

```

Sub lookAH(depot0 As Integer, debut0 As Integer, capa As Integer, itealook As Integer, nbtour As Integer)

    Dim g As New graph, sfile As String, route As New clsChemin, a As Integer
    Dim depot As node, Debut As node, nod As node, T As New clsTournée

    g.lireGraphe "xls", ActiveWorkbook.path & "\" & ActiveWorkbook.Name

    If g.estEulerien = False Then
        T.RendreEulerien g, "ca"
    End If

    Application.StatusBar = "Calcule de la fonction coût ..."
    'Calcule de la fonction coût pour tous les arcs
    fonctionCout g

```

...

Figure 4-13. Programme - LooAH - partie I

L'utilisation d'un sous-programme d'affectation des coûts donne une flexibilité supplémentaire à l'application. En effet, afin de simuler ou de tester divers objectifs d'optimisation, la modification ou le changement de la formule utilisée pour le calcul de la valeur des segments est grandement facilité puisque le changement peut se faire sans aller dans le cœur du programme, et le changement ne se fait qu'à un seul endroit.

Le sous-programme attribuant les coûts originaux utilisés pour cette étude (Figure 4-14) utilise une formule priorisant la classe, l'importance et la longueur des arcs.

```

Sub fonctionCout(g As graph)

  Dim e As edge

  For Each e In g.edges
    e.attbs("penalite") = 1
    e.attbs("ca") = (e.attbs("classe") * e.attbs("obli") * e.attbs("couverture") * 100) / e.attbs("dist")
  Next
End Sub

```

Figure 4-14. Sous-programme fonctionCout

Le choix des critères utilisés pour le calcul du coût des segments a été fait selon les hypothèses suivantes :

1. Un arc de classe 1 est prioritaire par rapport à un segment de classe 2 ou 3. Un segment de classe 2 est prioritaire par rapport à celui de classe 3;
2. Un arc caractérisé comme obligatoire a priorité sur un segment non obligatoire;
3. Un arc non couvert a priorité sur un segment qui a déjà été visité;
4. Plus un arc est long, plus il « embellira » la tournée aux yeux des utilisateurs.

L'hypothèse 4 est très importante dans le contexte de cette étude, puisque tel que mentionné à la section 2.5, les membres du MTQ ont clairement identifié que les personnes affectées au monitoring affectionnaient particulièrement la couverture de grand segment. Le but est donc d'évaluer chaque segment de façon équitable, c'est-à-dire en les comparants sur la même base, soit le coût par unité de longueur. Puisqu'il est impossible de se fier seulement à un seul critère pour calculer le coût du segment, la formule suivante permet d'identifier l'option préférable :

$$Cout = \frac{Classe \times Obligation \times Couverture}{Distance} \times 100$$

Voici un exemple illustrant le fonctionnement de cette formule. Le Tableau 4-8 présente les caractéristiques des arcs pour cet exemple :

Tableau 4-8. Exemple Coût - Caractéristiques des arcs

Arc	Classe	Obligation	Couverture	Distance
1	1	Non	Non	50
2	3	Oui	Non	25
3	2	Non	Oui	75

Dans cet exemple multicritère, la décision de juger selon un seul critère ou d'accorder plus de poids à un critère qu'à un autre peut complètement modifier le comportement de l'heuristique. Dans le cadre de cette étude, les critères d'obligation et de couverture ont une dominance sur les autres, mais les critères de classe et de distance interviennent tout de même dans le calcul. Le Tableau 4-9 présente les coûts attribués à chacun des arcs :

Tableau 4-9. Exemple Coût - Résultats

Arc	Classe	Obligation	Couverture	Distance	Formule	Résultat
1	1	10	10	50	$\frac{1 \times 10 \times 1}{50} \times 100$	20
2	3	1	1	25	$\frac{3 \times 1 \times 1}{25} \times 100$	12
3	2	10	10	75	$\frac{2 \times 10 \times 10}{75} \times 100$	266

Dans le cas où l'heuristique aurait à choisir parmi ces trois liens, l'arc 2 serait choisi puisque son coût est inférieur aux autres.

Les coûts étant assignés à chacun des arcs du réseau, la préparation graphique et informationnelle du réseau se poursuit. Les prochaines étapes présentées à la Figure 4-16

ont pour objectif de modifier la couleur des nœuds et de déterminer le plus court chemin entre chacun des nœuds et le dépôt.

```

Sub lookAH(depot0 As Integer, debut0 As Integer, capa As Integer, itealook As Integer, nbtour As Integer)

    • • • • •

    Set Debut = g.Nodes.getNode(debut0)
    Set depot = g.Nodes.getNode(depot0)

    Debut.attbs("depot") = 2
    depot.attbs("depot") = 1

    'Changer la couleur des noeuds de départ/dépôt
    For Each nod In g.Nodes
        redrawNodeDepot nod
    Next

    If Debut.id = depot.id Then
        redrawNodeDepot depot
    Else
        redrawNodeDepot depot
        redrawNodeDepot Debut
    End If

    'Ajouter en paramètre sur chaque noeud la distance du plus court chemin au dépôt
    pluscourchemin_graphe g, depot

    'Création des tournées nécessaires
    For a = 1 To nbtour
        Application.StatusBar = "Construction de la tournée" & a & "..."
        If a = 1 Then
            Set route = chemin(g, depot, Debut, capa, itealook)
            route.writeAccess a, ActiveWorkbook.path & BD_Chemins, True
        Else
            fonctionCout g
            Set route = chemin(g, depot, Debut, capa, itealook)
            route.writeAccess a, ActiveWorkbook.path & BD_Chemins, False
        End If
    Next
End Sub

```

Figure 4-15. Programme - LooAH - partie II

L'interface graphique permet l'affichage des nœuds du réseau en trois couleurs différentes. L'attribution des couleurs est faite à l'aide du sous-programme présenté à la Figure 4-16 et qui va comme suit :

- nœud dépôt : jaune;
- nœud de départ : si différent du dépôt le nœud est bleu, sinon il est jaune;
- autre nœud : blanc.

```

Sub redrawNodeDepot(n As node)
Dim shp As Shape, sht As Worksheet

Set sht = ActiveWorkbook.Sheets("reseau")
Set shp = sht.Shapes(nId2Nom(n.id))

If n.attbs("depot") = 1 Then
    shp.Line.ForeColor.RGB = QBColor(0)
    shp.Fill.ForeColor.RGB = QBColor(14)
ElseIf n.attbs("depot") = 2 Then
    shp.Line.ForeColor.RGB = QBColor(0)
    shp.Fill.ForeColor.RGB = QBColor(1)
Else
    shp.Line.ForeColor.RGB = QBColor(0)
    shp.Fill.ForeColor.RGB = QBColor(15)
End If
End Sub

```

Figure 4-16. Sous-programme redrawNodeDepot

La paramétrisation du réseau et les étapes d'interfaçages étant terminées, tout est en place pour la construction des tournées. Ces tournées seront créées en bouclant sur la fonction *chemin*, le nombre de fois nécessaires à la réalisation du nombre de tournées demandées par l'utilisateur. Il est à noter que tous les calculs et les modifications aux variables et paramètres utilisés dans la conception des tournées sont faites en mémoire vive. De plus, aucune modification n'est transférée aux données maîtresses de MS Excel, ce qui signifie que les tournées créées et les variables modifiées qui sont emmagasinées en mémoire sont réinitialisées à chaque exécution de l'outil « Look-ahead ». Puisqu'il est primordial de conserver les tournées créées, celles-ci sont stockées dans une table de l'application Ms Access.

La fonction *chemin* présentée à la Figure 4-17 est responsable de la création des tournées. Elle incorpore les étapes 2 à 6 de l'algorithme logique (Figure 4-11) et agit en quelque sorte comme programme maître de la construction de tournées.

```

Function chemin(g As graph, depot As node, Debut As node, capa As Integer, maxitea As Integer)
As clsChemin
  Dim itea As Integer, i As Integer, j As Integer, premier As Integer, n1 As node, e1 As edge
  Dim ep As edge, nlast As node, route As New clsChemin, sht As Worksheet, strSht As String

  itea = 0
  Set n1 = Debut
  premier = 1

  Do
    Set e1 = LookAhead(n1, 0, itea + 1, maxitea, 1000000000)

    If premier = 1 Then
      route.ajouterArcPos e1, 1
      premier = 2
    Else
      route.addDernier e1
    End If
    e1.attbs("couverture") = e1.attbs("couverture") * 10
    e1.attbs("nbcircuit") = e1.attbs("nbcircuit") + 1
    'Ajustement des coûts pour l'arc
    fonctionCout_unit e1

    Set nlast = n1
    Set n1 = e1.opposite(n1)
    itea = 0
    For Each ep In n1.outEdges
      If ep.opposite(n1).id = nlast.id Then
        ep.attbs("penalite") = 1000
        fonctionCout_unit ep
      End If
    Next

    If (capa - route.Distance("dist")) / (n1.attbs("pcc") + 0.001) < 1.5 Then
      For j = 1 To route.Longueur
        route(j).aDesservir = True
      Next
    End If
    'Retourner au dépôt par le plus court chemin
    route.insérerChemin retournepluscourtchemin(depot, n1, g), route.Longueur + 1
    Exit Do
  End If
  Loop
  Set chemin = route
End Function

```

Figure 4-17. Fonction *chemin*

Le mandat de cette fonction est de construire une tournée et d'en exporter le résultat au programme maître. Pour ce faire, elle doit compléter toutes les étapes de l'algorithme logique. Les étapes 2 à 4 de l'algorithme logique sont réalisées dès le départ avec l'aide de la fonction *LookAhead* qui sera détaillée un peu loin dans le texte. C'est avec cette fonction que l'identité de l'arc qui sera greffé à la tournée, est importée dans la fonction *chemin* et est ajoutée à la tournée. Les variables sont ensuite modifiées de la façon suivante :

- la variable couverture de l'arc est multipliée par 10;
- la variable nombre de circuits (nbcircuit) est augmentée d'une unité;
- une pénalité est ajoutée aux liens provoquant le retour;
- la fonction Coût est recalculée avec les nouveaux paramètres (Figure 4-18) :

```
Sub fonctionCout_unit(e As edge)
e.attbs("ca") = (e.attbs("classe") * e.attbs("obli") * e.attbs("couverture") * e.attbs("penalite") * 100) /
e.attbs("dist")
End Sub
```

Figure 4-18. Sous-programme fonctionCout_unit

Une fois que le coût est modifié, le nouveau nœud d'évaluation est établi; ceci correspond à l'étape 5 de l'algorithme logique. Puisque les retours en arrière sont néfastes à l'allure des tournées, le coût de l'arc permettant ce retour en arrière est modifié avec une pénalité, ce qui réduit grandement ses chances de sélection lors de la prochaine évaluation. À la fin de chaque tournée, les pénalités sont réinitialisées et les coûts sont recalculés pour ne pas désavantager certains liens d'une tournée à l'autre.

Le nouveau nœud d'évaluation étant sélectionné, la décision de continuer la tournée ou de retourner au dépôt doit être prise. La tournée retourne au dépôt si la condition suivante est validée :

$$\frac{(\text{Capacité} - \text{Longueur de la tournée})}{(\text{PCC du nœud d'évaluation} + \epsilon)} \leq \text{facteur de risque}$$

La borne de comparaison est identifiée comme étant un facteur de risque de non respect de la contrainte de capacité de la tournée. Plus ce facteur se rapproche de la valeur 1, plus la probabilité d'obtenir des tournées supérieures à la contrainte est grande. Le Tableau 4-10 présente les caractéristiques du plus court chemin entre les nœuds du réseau de l'Estrie et le dépôt (nœud 101).

Tableau 4-10. Caractéristiques du plus court chemin entre les nœuds et le dépôt (en km)

Dépôt	Médiane	Moyenne	Minimum	Maximum
101	40,83	44,78	3,35	127

La Figure 4-19 présente la distribution cumulative des longueurs de plus courts chemins du réseau par intervalle de 5 km (dépôt situé au nœud 101). Cette distribution permet d'évaluer la probabilité d'obtenir des PCC supérieurs à une valeur choisie.

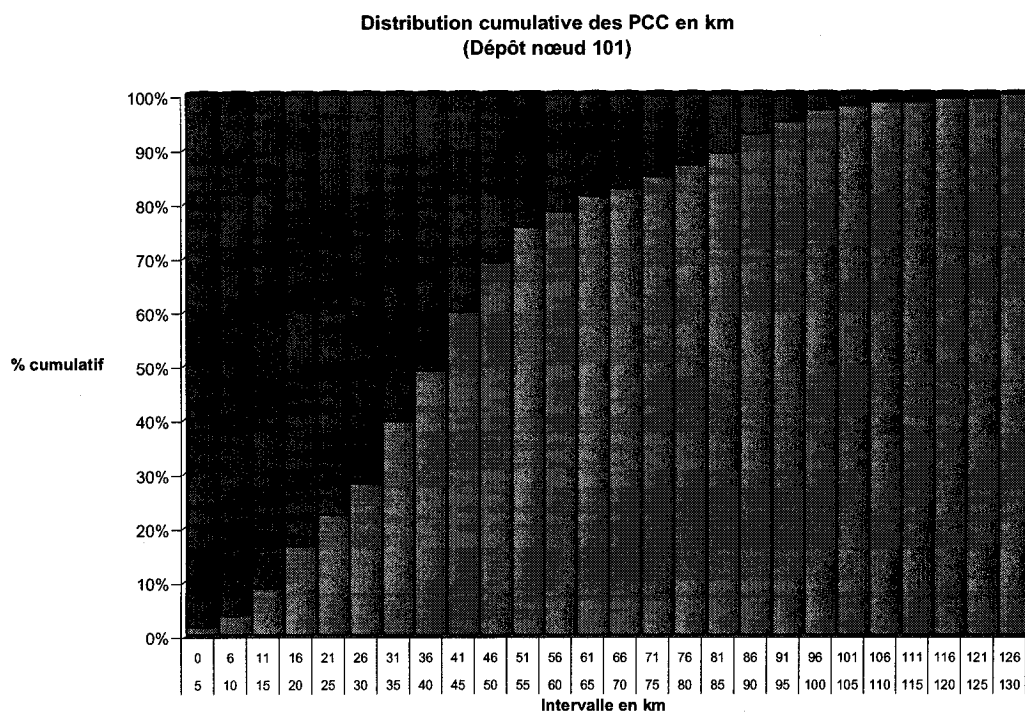


Figure 4-19. Distribution cumulative des PCC

Avec ces informations, il est possible de calculer la probabilité de dépassement de la capacité de la tournée pour différentes valeurs du facteur de risque. Par exemple, pour un facteur de risque égal à 2 et la valeur moyenne des plus courts chemins de 44 km :

$$\left(\frac{(\text{Capacité} - \text{Longueur de la tournée})}{1} \right) \leq \text{facteur de risque} * (PCC)$$

$$\left(\frac{(\text{Capacité} - \text{Longueur de la tournée})}{1} \right) \leq 2 * 44$$

$$\left(\frac{(\text{Capacité} - \text{Longueur de la tournée})}{1} \right) \leq 88$$

Ceci signifie qu'une tournée ayant une longueur restante plus petite ou égale à 88 km retournera au dépôt. En d'autres mots, en se référant à la Figure 4-19, la probabilité que le prochain nœud d'évaluation soit un chemin de retour au dépôt plus long que 88 km est de 7,14 % soit ((1-0,9286).

Le choix de ce facteur est directement relié à la rigidité de la contrainte. Plus le facteur est élevé, plus les tournées respecteront la contrainte, en contrepartie plus les longueurs des tournées seront éloignées de la contrainte maximum. Dans l'exemple ci-dessus, puisque la moyenne des PCC est de 44 km, il y a une très forte probabilité que la majorité des longueurs des tournées seront approximativement à 44 km du maximum.

Dans le cadre de l'étude actuelle, la notion de contrainte de capacité est importante, mais la notion d'optimiser au maximum la longueur des parcours l'est presque tout autant. Effectivement, puisque tous les arcs appartenant à la tournée sont pris en compte, qu'ils soient obligatoires ou non, il est important de tenter de s'approcher le plus possible du maximum permis.

La Figure 4-20 trace la comparaison de l'influence de l'utilisation de la valeur médiane ou moyenne sur le facteur de risque. À un facteur de risque de 1,5, les deux éléments comparés sont au-dessus des 80% de couverture. Ce point constitue un bon mélange de risque et de couverture optimale. C'est aussi le point où l'écart entre les deux éléments comparés est le plus faible en excluant bien sûr les très hauts pourcentages de couverture où la variabilité est très faible.

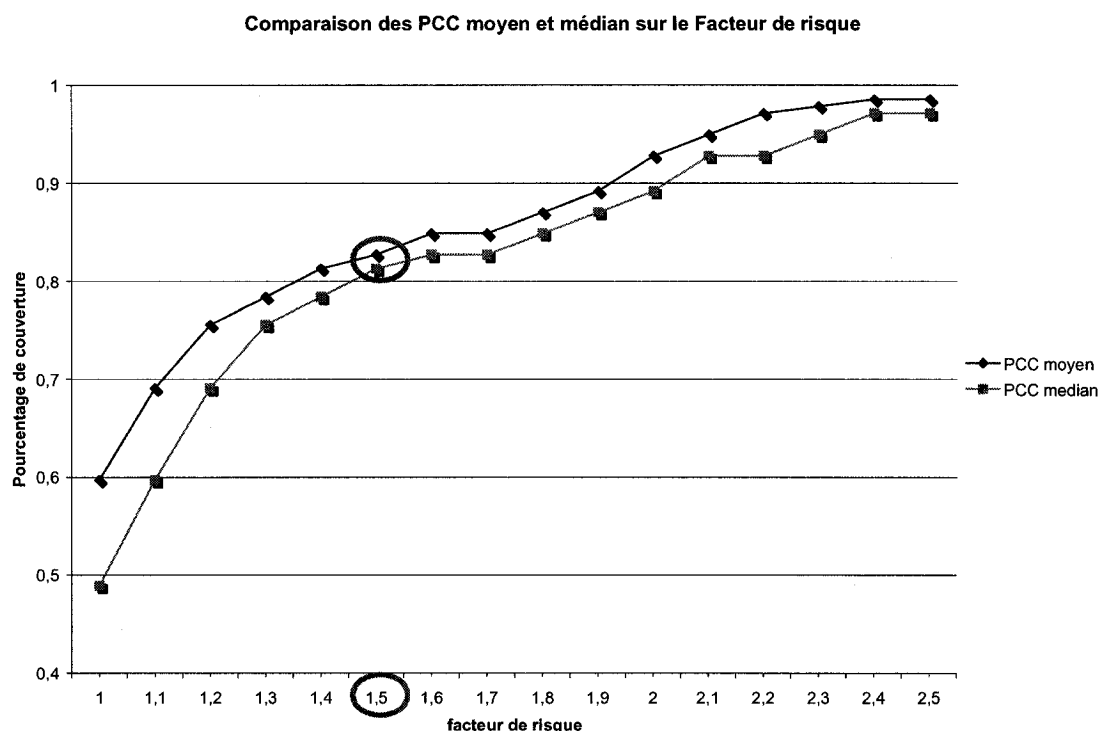


Figure 4-20. Comparaison des PCC moyen et médian sur le facteur de risque

Le facteur de risque étant connu pour les fins de cette étude (1,5), l'étape 6 de l'algorithme logique peut maintenant être complétée. Donc, lorsque le résultat de l'équation de l'étape 6 est plus petit que le facteur de risque, le plus court chemin de retour au dépôt est ajouté à la tournée et le résultat est exporté au programme maître *LookAH*.

Les étapes de l'algorithme n'ayant pas encore été détaillées dans cet ouvrage, ont pour mandat de sélectionner l'arc qui sera ajouté à la tournée. La fonction *LookAhead* (Figure 4-21) combinée avec la fonction récursive *LookAheadIn* (Figure 4-22) remplit le rôle des étapes 2 à 4 de l'algorithme logique. Une fonction récursive est une « *fonction dont les valeurs sont des nombres naturels et qui est définie sur des nombres naturels par des formules dans lesquelles la fonction elle-même est une opérande* »¹⁰.

```

Function LookAhead(ByVal noeud As node, ByVal cout As Double, ByVal itea As Integer,
maxitea As Integer, coutop As Double) As edge
Dim e As edge, eop As edge, cout1 As Double, coutvar As Double, coutinit As Double

coutvar = coutop
coutinit = coutop

For Each e In noeud.outEdges
'Ne pas calculer lors d'une impasse
  If noeud.outEdges.Count = 1 Then
    Set eop = e
  Else
    If maxitea = 1 Then
      cout1 = e.attbs("ca")
      If coutvar >= cout1 Then
        coutvar = cout1
        Set eop = e
      End If
    ElseIf itea = 1 Then
      cout1 = LookAheadIn(e.opposite(noeud), noeud, e.attbs("ca") + cout, itea + 1, maxitea,
coutop)
      If coutvar >= cout1 Then
        coutvar = cout1
        Set eop = e
      End If
    Else
      MsgBox "erreur, mauvaise itération"
      Exit Function
    End If
  End If
  coutop = coutinit
Next
Set LookAhead = eop
End Function

```

Figure 4-21. Fonction LookAhead

¹⁰ Source : Grand dictionnaire terminologique - Office québécois de la langue française- www.granddictionnaire.com,

Pour accomplir son mandat, l'algorithme doit choisir, selon l'horizon d'évaluation, l'arc ayant le coût le plus faible. Selon ce principe, l'important n'est pas de construire des chemins les plus courts, mais seulement d'évaluer le coût des arcs sortant du nœud d'évaluation. Ainsi, afin de faciliter l'algorithme informatique, l'évaluation des coûts se fait à rebours, c'est-à-dire de la fin de l'horizon jusqu'au nœud d'évaluation. Le coût minimum de chaque étape est donc retourné à l'étape précédente pour être capable de comparer le coût minimum de l'horizon pour tous les arcs sortant du nœud d'évaluation. Afin de respecter l'étape 2 de l'algorithme logique, lorsqu'une impasse est détectée, un coût de zéro est attribué au segment, ce qui assure sa sélection.

```

Function LookAheadIn(ByVal noeud As node, ByVal sourcenoed As node, ByVal cout As
Double, ByVal itea As Integer, maxitea As Integer, coutop As Double) As Double

Dim e As edge, cout1 As Double

For Each e In noeud.outEdges
    If e.opposite(noeud).id = sourcenoed.id And noeud.outEdges.Count = 1 Then
        If e.attbs("nbcircuit") = 0 And itea = 2 Then
            cout = 0 - e.attbs("ca")
            itea = maxitea
        Else
            cout = cout - e.attbs("ca")
            itea = maxitea
        End If
        ElseIf e.opposite(noeud).id = sourcenoed.id Then GoTo exclu_retour
    'Exclusion du chemin retour dans le look-ahead
    End If
    If itea <> maxitea Then
        cout1 = LookAheadIn(e.opposite(noeud), noeud, e.attbs("ca") + cout, itea + 1, maxitea, coutop)
        If coutop > cout1 Then
            coutop = cout1
        End If
    Else
        If coutop > e.attbs("ca") + cout Then
            coutop = e.attbs("ca") + cout
        End If
    End If
exclu_retour:
Next
LookAheadIn = coutop
End Function

```

Figure 4-22. Fonction LookAheadIn

4.3 Contexte d'utilisation

La flexibilité de l'application doit permettre d'évaluer plusieurs situations de création de tournées nécessaires lors de l'exécution des activités de monitoring par le Ministère des Transports du Québec. Pour les fins de cette étude, deux situations sont plus particulièrement ciblées :

1. Construction de tournées réalisables à partir de zéro
2. Traitement de la poursuite des activités lors d'événements

4.3.1 Construction de tournées réalisables à partir de zéro

Cette situation de création est généralement effectuée lorsque la couverture du réseau est vierge. Cette démarche a pour but de générer une ou plusieurs tournées complètes ayant au départ comme seule contraintes celles de la hiérarchie du réseau. La Figure 4-23 illustre un exemple de tournée complète créée à partir de zéro.

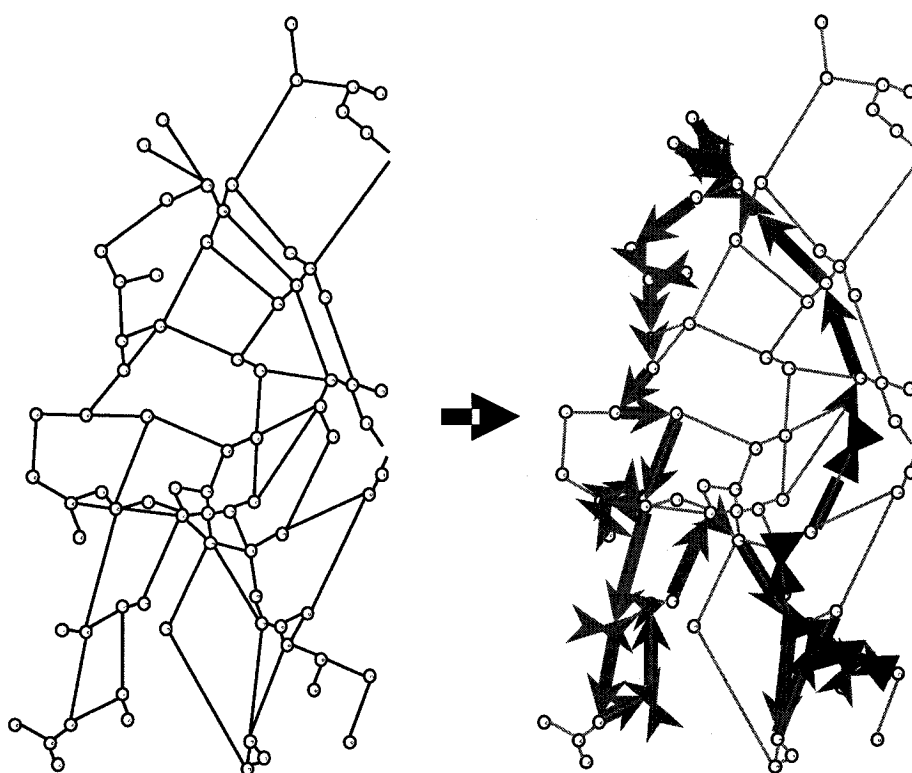


Figure 4-23. Création à partir de zéro

4.3.2 Traitement de la poursuite des activités lors d'événements

Lorsqu'un événement se produit, la tournée de monitoring en cours est interrompue afin de permettre d'intervenir là où l'incident a lieu. Dès que l'incident est sous contrôle et que la tournée de monitoring peut reprendre, le système peut générer une tournée en tenant compte du nouvel emplacement de départ et du temps restant à la journée (capacité de la tournée restante). La Figure 4-24 représente la situation où une partie de tournée a du être régénérée afin de compléter la journée de monitoring.

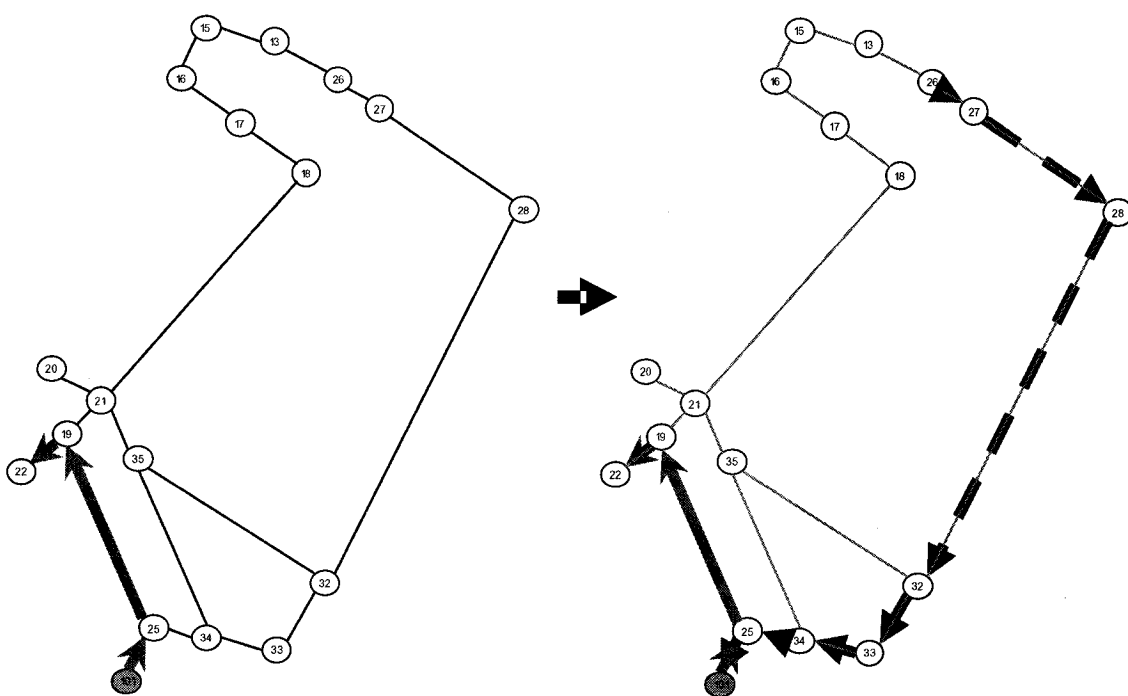


Figure 4-24. Poursuite de tournée lors d'événements

La situation numéro un sera traitée plus en profondeur ici puisque l'objectif de ce mémoire porte plus vers la création de tournées complètes. Bien entendu, l'allure de tournées complètes est plus simple à évaluer que l'allure de tournée partielle. De plus, l'utilisation de la fonctionnalité de la tournée partielle demande d'avoir une quantité importante de données puisqu'il faut considérer tous les arcs déjà couverts lors des tournées déjà réalisées.

CHAPITRE 5 - EXPÉRIMENTATION ET RÉSULTATS

Ce dernier chapitre présente les expérimentations accomplies à l'aide de la méthode présentée dans ce mémoire. Il définit premièrement la stratégie d'expérimentation et les indicateurs de performance utilisés pour en faire la critique dans un contexte opérationnel.

5.1 Protocole expérimental

5.1.1 Description

Les tests et expérimentations sont basés sur les données fournies par le Ministère des Transports du Québec décrites à la section 4.1 et réalisés à l'aide de l'outil informatique décrit à la section 4.2. L'évaluation de la méthode est basée sur des tests de comparaison. Le fondement de cette stratégie est que l'horizon d'évaluation influe sur l'allure de la tournée. Le premier scénario d'expérimentation (Tableau 5-1) compare la génération de 15 tournées bâties de zéro et ayant comme horizon 1, 3, 6, 12 et 15 arcs¹¹. La construction à l'aide de la méthode « Look-ahead » est aussi comparé à un algorithme classique de problème de tournée avec capacité (PTAC). La couverture des arcs du réseau à l'aide du PTAC nécessite la création de 10 tournées.

Tableau 5-1. Paramètres d'expérimentation I

Scénario d'expérimentation (construction de zéro)					
Nombre tournée	Horizon	Données	Nœud départ	Nœud dépôt	Capacité (Km)
15	1	Initiale	101	101	350
15	3	Initiale	101	101	350
15	6	Initiale	101	101	350
15	12	Initiale	101	101	350
15	15	Initiale	101	101	350
10	-	Initiale	101	101	350

¹¹ Pour des raisons de performance du prototype, l'horizon maximal traité dans cette étude est de 15 arcs.

Le deuxième scénario d'expérimentation (Tableau 5-2) simule l'impact d'un événement sur la résultante des tournées qui aurait été normalement générées par l'outil. Ce scénario teste la polyvalence de l'outil face à une exigence opérationnelle d'adaptation des circuits. Pour ce faire, les résultats obtenus de l'expérimentation I seront utilisés afin de comparer l'impact d'un événement.

Afin de simuler un événement se produisant au début de la 6^{ième} tournée, les arcs couverts au cours des 5 premières tournées ainsi qu'approximativement les 50 premiers kilomètres de la 6^{ième} tournée générée au cours de l'expérimentation I seront paramétrés comme des arcs déjà couverts. Supposant une interruption de l'activité de monitoring d'approximativement une heure obligeant le patrouilleur à quitter l'itinéraire prévu, les 250 kilomètres restants à la tournée peuvent être complétés en débutant de la nouvelle position du patrouilleur ce qui affectera les 9 tournées restantes.

Cette expérimentation sera effectuée uniquement avec l'horizon ayant donné les résultats les plus convaincants lors de l'expérimentation I. Le nœud de départ après l'incident sera situé dans une région où les arcs n'ont pas été couverts lors de l'expérimentation I. Le Tableau 5-2 présente les détails des 3 différents scénarios.

Tableau 5-2. Paramètres d'expérimentation II

Scénario d'expérimentation (Interruption des activités)					
Nombre tournées	Tournée d'interruption	Nœud départ	Nœud dépôt	Capacité restante (km)	Capacité totale (km)
15	6 ^{ième}	20	101	250	350
15	6 ^{ième}	39	101	250	350
15	6 ^{ième}	134	101	250	350

Les résultats obtenus des expérimentations I & II seront analysés à l'aide des indicateurs de performance décrits à la section 5.1.2.

5.1.2 Évaluation de la performance

La performance de la méthode est évaluée à l'aide de cinq des indicateurs présentés à la section 3.2.

Le premier vise à mesurer pour chacun des scénarios le respect de la capacité maximale.

$$ICMLT_t = f \left[\frac{\sum_{A[t]} \text{Longueur Arc}}{\text{Longueur max imale}} \right] = f[ICLT_t]$$

Le deuxième indicateur évalue la couverture du réseau effectué par les tournées construites.

$$ICCA = \frac{\sum_T \text{Nombre Arc Tournée}}{\text{Nombre Arc Réseau}}$$

Le troisième indicateur mesure la couverture du réseau pour chacune des classes pour l'ensemble des tournées générées par scénario.

$$ICMLCU_{t,c} = f \left[\frac{\sum_{A[t]} \text{Longueur Unitaire Arc Classe Tournée}}{\sum_A \text{Longueur Arc Classe}} \right] = f[ICLCU_{t,c}]$$

Le quatrième indicateur mesure la quantité d'allers-retours générés par l'algorithme au cours des différentes tournées de chaque scénario.

$$ICAR_t = \sum_{A[t]} \text{Nombre Aller Retour Tournée}$$

Le dernier indicateur évalue l'allure de la tournée selon des facteurs qualitatifs.

$$ICBT_i = \text{Forme de la tournée}$$

Enfin, certaines tournées tirées du scénario ayant obtenu les meilleurs résultats seront comparées aux tournées créées manuellement par les employés du Ministère des Transports du Québec.

5.2 Résultats

Les expérimentations réalisées à l'aide de l'algorithme développé ont pour but premier de démontrer la capacité de répondre au mandat, mais également de valider l'utilisation de l'outil dans un contexte opérationnel réel.

5.2.1 Construction de tournées réalisables à partir de zéro

L'étude menée a comme premier but de démontrer sa capacité à répondre aux exigences opérationnelles dans un cas idéal, c'est-à-dire pour une distance parcourable de 350 km par tournée. Le Tableau 5-3 présente les résultats obtenus quant au respect de la capacité maximale des tournées.

Tableau 5-3. Capacité moyenne après 15 tournées (ICMLT)

Scénario - Horizon	Capacité moyenne (%)	Longueur totale parcourue (km)
1	97,93	5125,17
3	98,53	5157,58
6	95,93	5020,98
12	96,07	5027,14
15	95,87	5016,45
PTAC	112,30	3919,55

La capacité moyenne des tournées générées avec la méthode présentée respecte la capacité maximale contrairement à l'algorithme PTAC. Par contre, en examinant individuellement la capacité de chacune des tournées construites (Figure 5-1), on constate que certaines tournées dépassent la longueur maximale même dans le cas de la méthode « Look-ahead ».

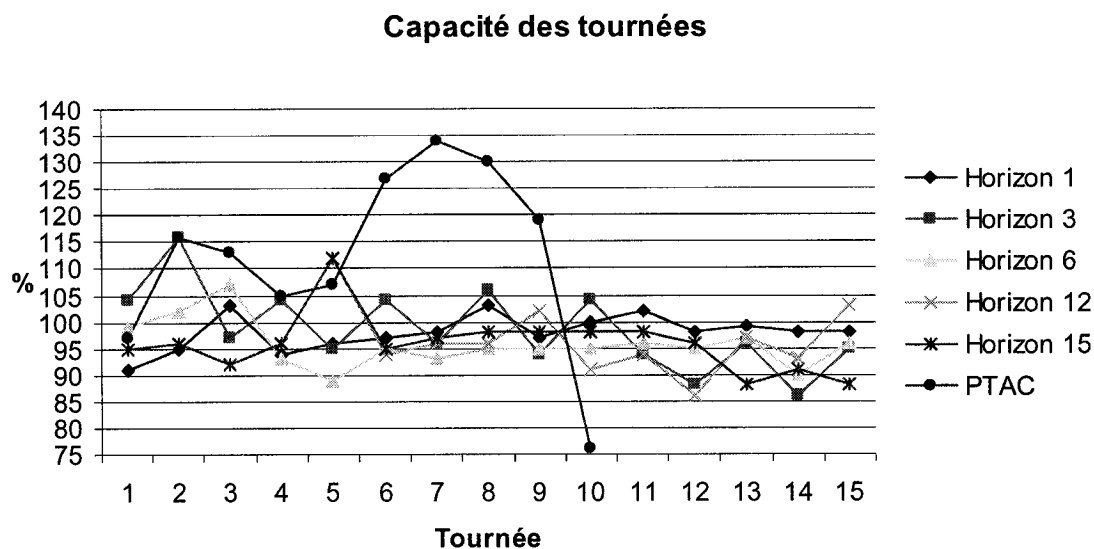


Figure 5-1. Capacité des tournées

Néanmoins, la grande majorité (80%) des surplus de capacité ne dépasse pas 10% de la capacité totale de la tournée. Il n'y a donc aucun surplus excessif qui met en péril la validité de la solution.

Le deuxième aspect de vérification est la capacité de couverture du réseau. La quantité de tournées générées ne permet pas de couvrir l'ensemble du réseau, mais elle permet de connaître la tendance et l'impact de l'horizon d'évaluation sur la qualité des tournées. Le Tableau 5-4 présente le ratio de couverture de l'ensemble des tournées générées selon les différents scénarios.

Tableau 5-4. Pourcentage de couverture du réseau après 15 tournées (ICCA)

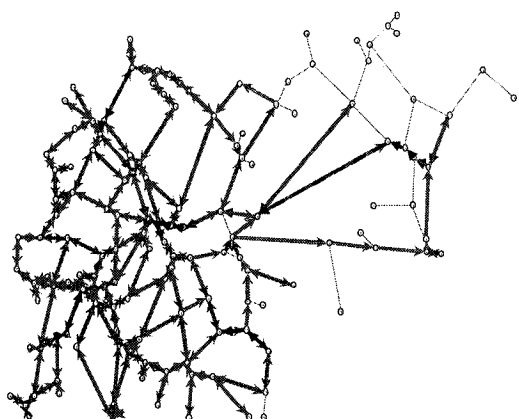
Scénario – Horizon	Nombre d'arcs parcourus	Nombre d'arcs totaux	Ratio
1	297	374	79,41
3	316	374	84,49
6	320	374	85,56
12	329	374	87,97
15	321	374	85,83
PTAC	374	374	100

Le pourcentage de couverture du réseau s'améliore modérément entre les différents scénarios sans jamais atteindre le niveau de l'algorithme PTAC. Une certaine tendance d'accroissement du pourcentage de couverture est dénotée sur les quatre premiers scénarios, mais le dernier scénario ayant l'horizon d'évaluation le plus long ne parvient pas à améliorer le ratio du scénario précédent.

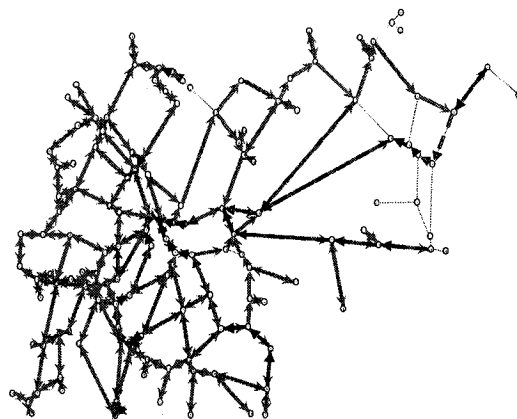
Une hypothèse pour justifier ce résultat est qu'un horizon d'évaluation trop grand pourrait avoir une influence négative lorsque le réseau est partiellement couvert. En effet, lorsque la tournée approche de la capacité maximale prévue, l'algorithme évalue toujours les options avec le même horizon. Si l'horizon lointain tombe dans un secteur déjà couvert, ceci pourrait influencer négativement le choix de l'arc à sélectionner puisque la tournée ne se rendra jamais à ce point.

Malheureusement, cette hypothèse n'a pu être validée puisque le prototype développé pour cette étude ne peut permettre de générer quinze tournées avec un horizon plus grand que 15 arcs sans affecter considérablement la performance.

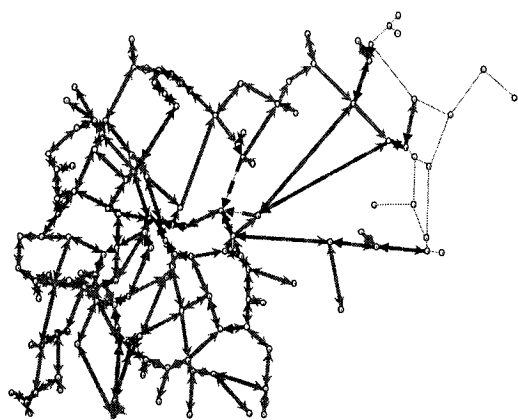
La Figure 5-2 présente graphiquement le résultat de la couverture totale des différents scénarios.



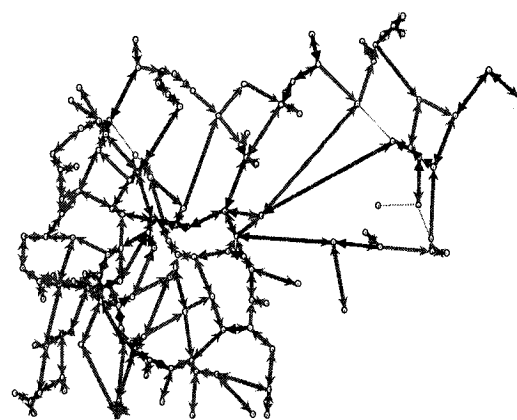
Scénario - Horizon 1



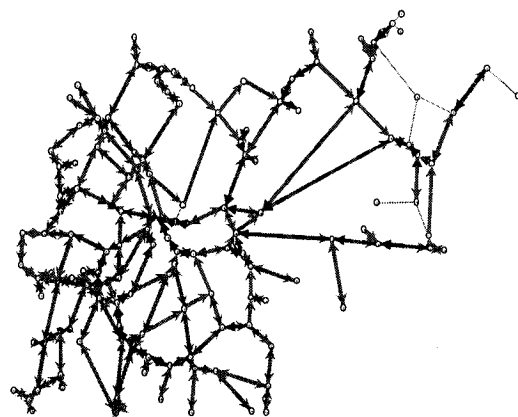
Scénario - Horizon 3



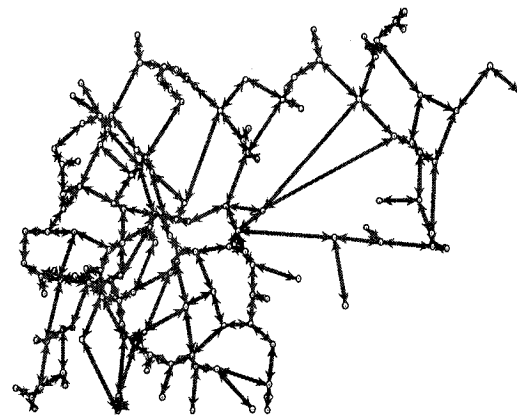
Scénario - Horizon 6



Scénario - Horizon 12



Scénario - Horizon 15



Scénario - PTAC

Figure 5-2. Comparaison couverture totale des différents scénarios

Le dernier aspect à considérer dans l'évaluation opérationnelle de l'algorithme avant de d'évaluer son aspect est de vérifier si la couverture hiérarchique des arcs du réseau est respectée. Le Tableau 5-5 illustre les différents pourcentages de couverture obtenus pour chacun des scénarios.

Tableau 5-5. Pourcentage de couverture des classes après 15 tournées (ICMLCU)

Scénario - Horizon	Classes		
	1	2	3
1	100	70,23	79,58
3	100	76,82	86,32
6	100	75,08	86,30
12	100	86,16	83,84
15	97,85	87,83	81,36
PTAC	100	100	100

Les arcs prioritaires (classe 1) sont parfaitement couverts lors des quatre premiers scénarios et ils frôlent la perfection dans le cinquième. Dans le réseau étudié, la proportion d'arcs de classe 3 est plus importante que les autres (50% de classe 3, 39% de classe 2 et 11% de classe 1). Un horizon d'évaluation plus court semble avantager la couverture d'arcs de classe inférieure. Les trois premiers scénarios ne respectent pas la hiérarchie tandis que les deux derniers scénarios de la méthode présentée ayant un horizon plus grand la respectent. Si l'on observe les scénarios ayant des pourcentages similaires de couverture globale (Tableau 5-4) et qui respectent la hiérarchie des classes, nous remarquons que la qualité des tournées générées à l'aide d'horizons plus grands est supérieure du point de vue de la couverture hiérarchique des arcs. Comme le réseau complet est couvert avec la méthode PTAC, la hiérarchie est respectée.

Quel que soit l'horizon, l'algorithme rencontre généralement tous les critères pour assurer son fonctionnement opérationnel quant au respect de la capacité, de la couverture

du réseau et de la hiérarchisation des arcs. Les prochains indicateurs de performance concernent l'aspect « physique » des tournées générées, c'est-à-dire leur allure.

Le problème majeur des heuristiques d'optimisation mathématique classique est le nombre fréquent d'allers-retours générés lors de la solution. Le Tableau 5-6 présente le nombre d'allers-retours générés selon les différentes catégories possibles dans le cadre de cette étude. Les trois catégories d'allers-retours sont :

- les non obligatoires : les plus nocifs en termes d'aspect des tournées. Ils sont générés simplement aux fins d'optimisation mathématique et ils ont été identifiés comme étant le plus grand problème;
- ceux causé par des impasses : ce type de retour est inévitable et même nécessaire puisqu'il faut aussi couvrir les impasses. Il permet d'évaluer la capacité des algorithmes à couvrir les limites des réseaux;
- ceux causés par les retours au dépôt : ceci est inévitable dans le contexte de cette étude. Ils permettent de quantifier le nombre de tournées revenant sur leurs pas afin de retourner au dépôt de manière à respecter la capacité de la tournée.

Tableau 5-6. Nombre d'allers-retours après 15 tournées (ICAR)

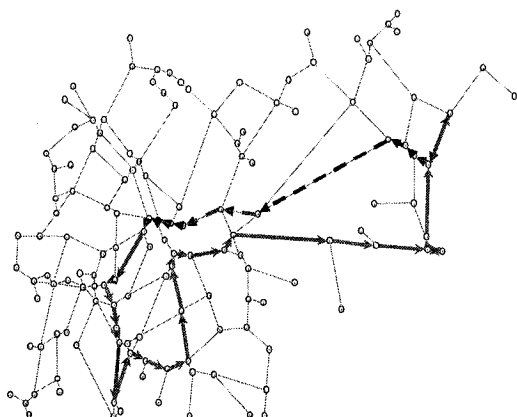
Scénario – Horizon	Aller-retour			Total
	Non Obligatoire	Impasse	Retour au dépôt	
1	0	25	11	36
3	0	40	10	50
6	0	46	13	59
12	0	53	10	63
15	0	48	10	58
PTAC	16	29	0	52

Les résultats obtenus portent à croire que les précautions prises afin d'empêcher les aller retour non obligatoires dans l'algorithme ont porté fruit. Ainsi, aucun retour en arrière n'a été généré avec l'algorithme « Look-ahead » lors de cette étude, contrairement à l'algorithme PTAC qui a généré beaucoup de retours en arrière non obligatoires. La quantité d'allers-retours augmente avec l'horizon d'évaluation, mais cette augmentation

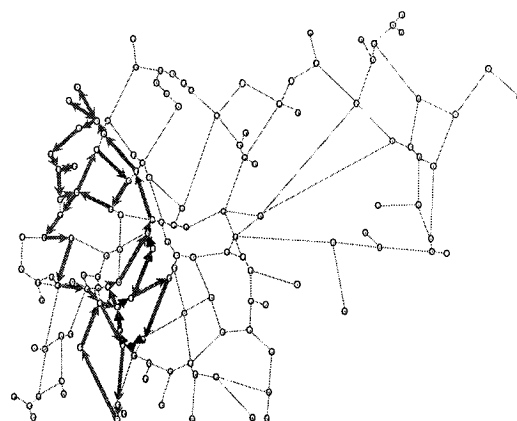
ne signifie pas pour autant que la situation se détériore. Au contraire, l'horizon plus grand permet une meilleure couverture des « impasses » du réseau. L'étape 2 de l'algorithme décrite à la section 3.1.3 prévoit une obligation de couverture des impasses lorsqu'elles sont détectées et ce, pour tous les horizons. Cette particularité de l'algorithme renforce le bienfait d'un horizon d'évaluation étendu sur la couverture d'impasses puisque les résultats de l'étude démontrent une amélioration appréciable pour ce type de couverture. Bien certainement, la couverture d'impasses ne garantit pas l'amélioration de l'allure des tournées, mais elle permet d'intégrer ces arcs, souvent laissés pour compte et qui doivent être parcourus, à l'intérieur de tournées qui laissent présager une allure élégante.

Justement afin de juger de l'élégance des tournées, le dernier indicateur de performance évalue sur une base qualitative les tournées générées. La représentation complète des tournées générées pour les différents scénarios est présentée à l'annexe C. Les trois premières tournées (Figure 5-3, Figure 5-4, Figure 5-5) générées permettent de constater de l'évolution première des tournées avec les différents horizons.

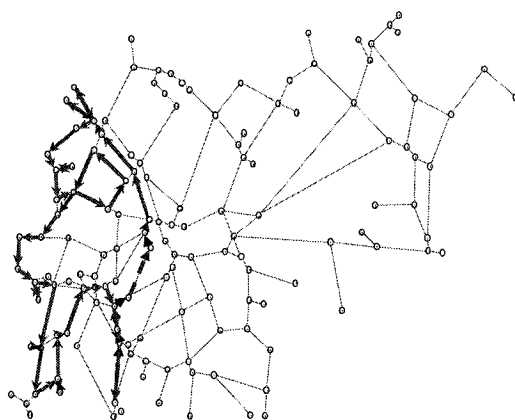
Lors de la première tournée, on note une différence appréciable entre les horizons 1 et 3, mais les tournées avec horizon 6, 12 et 15 sont semblables. Lors de la deuxième tournée, la différence entre les horizons 6 et 12-15 commence à avoir un impact plus significatif tandis que la troisième tournée est vraiment un point de rupture et confirme leur évolution individuelle. Les horizons 12 et 15 ont une évolution identique jusqu'à la 6^{ième} tournée et c'est lors de la 7^{ième} tournée que leur évolution diverge. La Figure 5-6 présente la 10^{ième} tournée et il est intéressant de constater l'évolution de chacun des scénarios. Leur évolution est maintenant complètement différente et ils couvrent des portions totalement différentes les uns des autres. À ce stade-ci, la différence au niveau de l'allure des tournées est frappante. L'horizon plus petit semble se confiner dans un secteur restreint du réseau, ce qui donne un aspect plutôt mauvais à la tournée, tandis que les autres tournées sont beaucoup plus étendues et leur forme est bien meilleure.



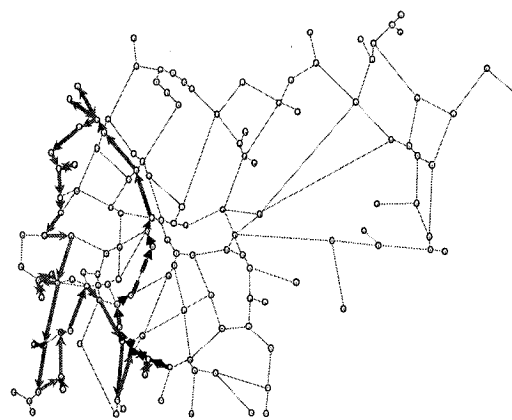
Scénario - Horizon 1



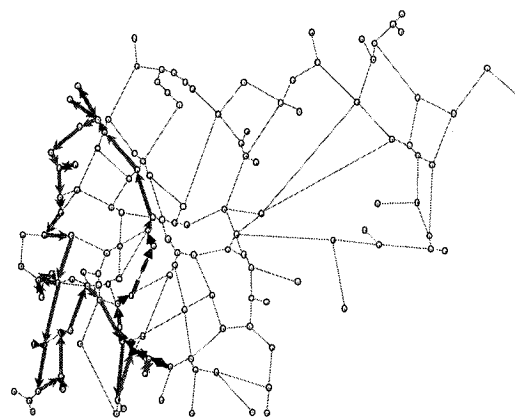
Scénario - Horizon 3



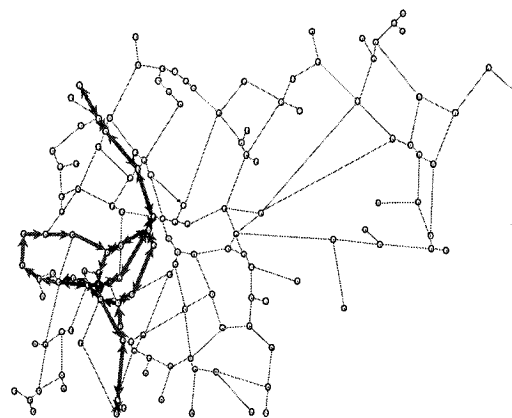
Scénario - Horizon 6



Scénario - Horizon 12

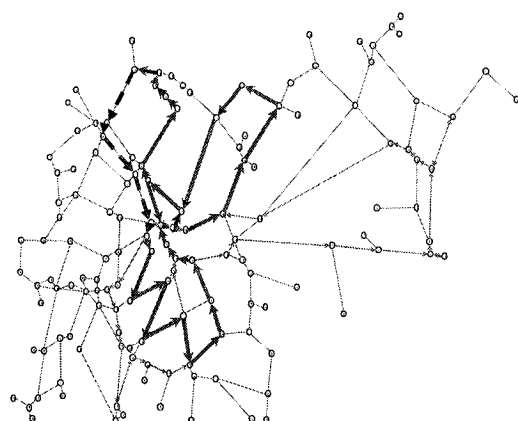


Scénario - Horizon 15

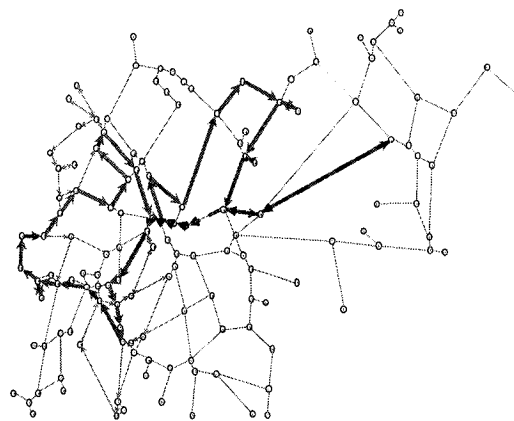


Scénario - PTAC

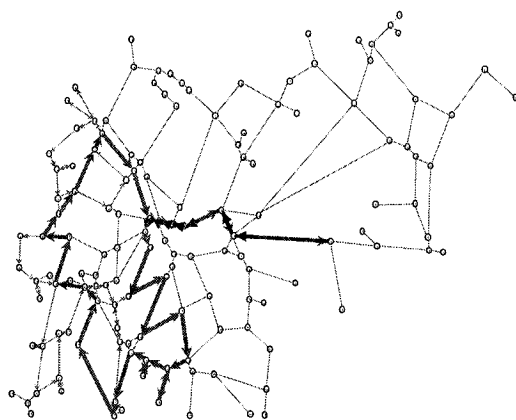
Figure 5-3. Comparaison tournée 1 des différents scénarios



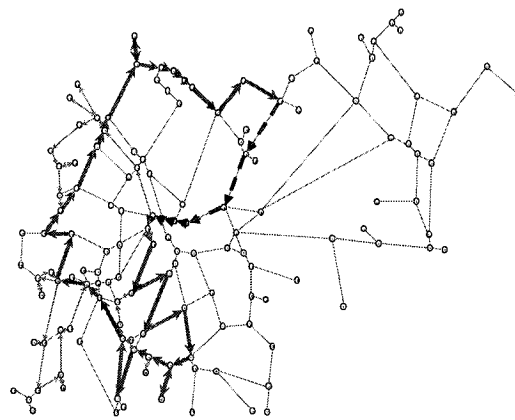
Scénario - Horizon 1



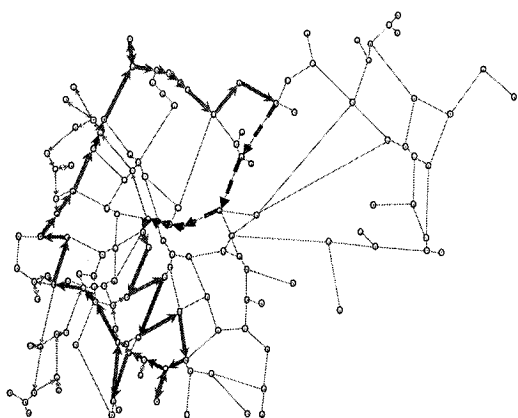
Scénario - Horizon 3



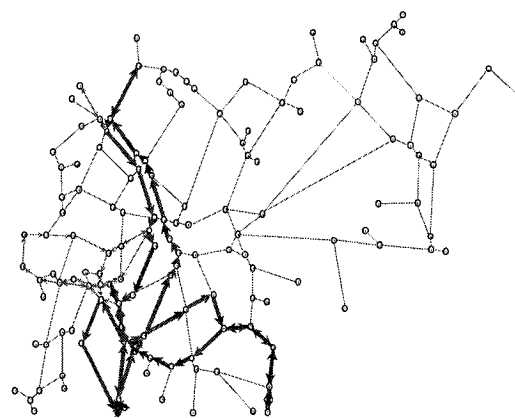
Scénario - Horizon 6



Scénario - Horizon 12

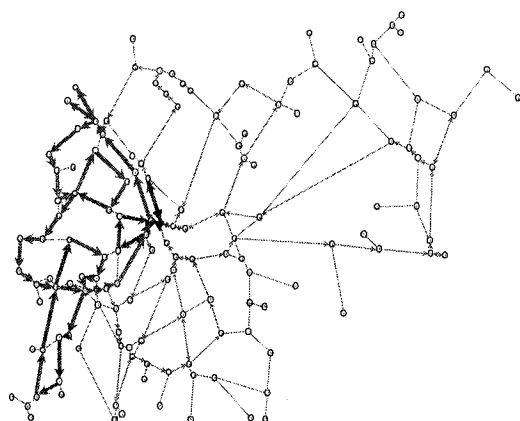


Scénario - Horizon 15

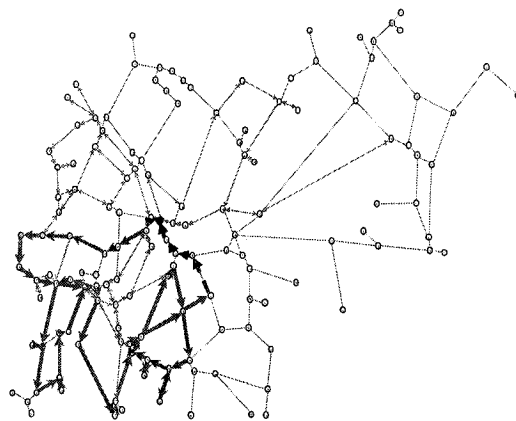


Scénario - PTAC

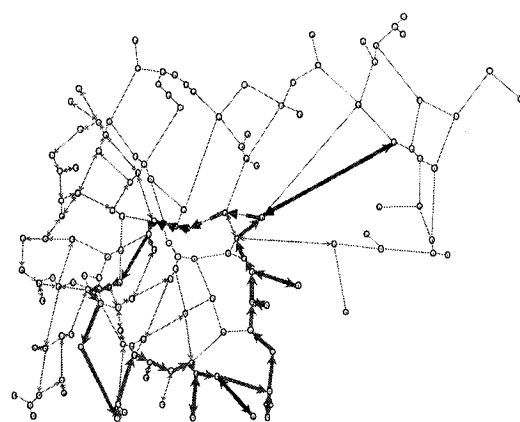
Figure 5-4. Comparaison tournée 2 des différents scénarios



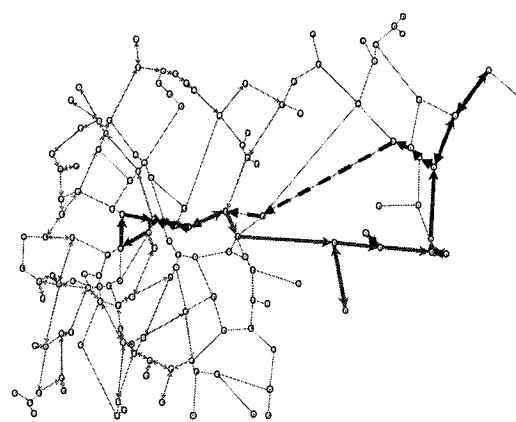
Scénario - Horizon 1



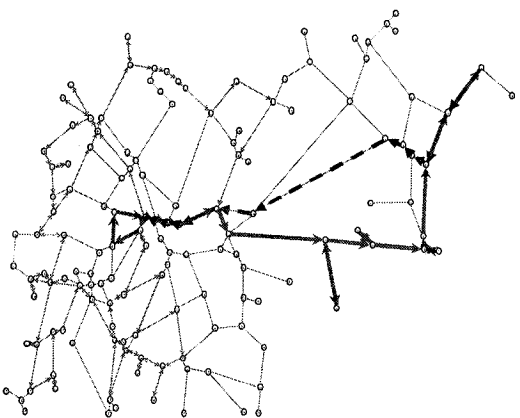
Scénario - Horizon 3



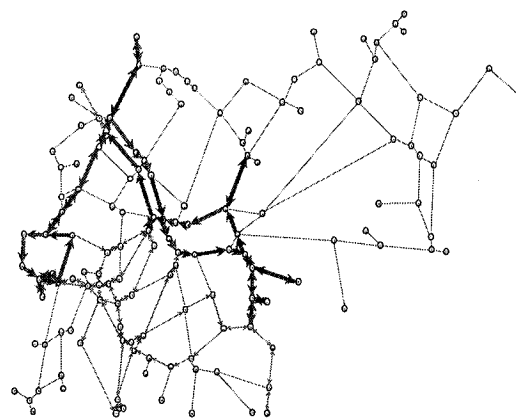
Scénario - Horizon 6



Scénario - Horizon 12

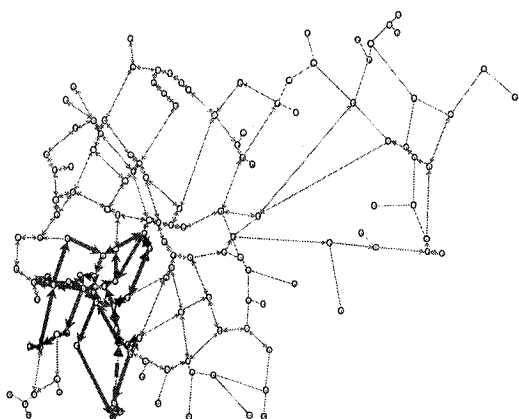


Scénario - Horizon 15

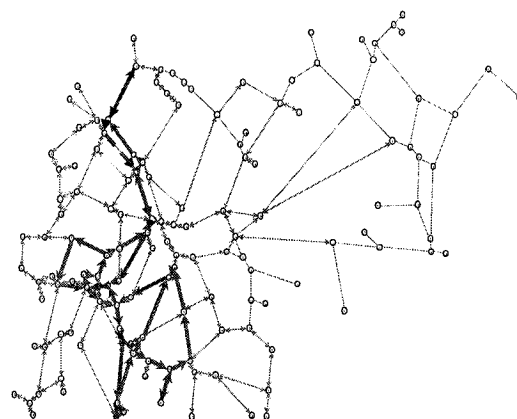


Scénario - PTAC

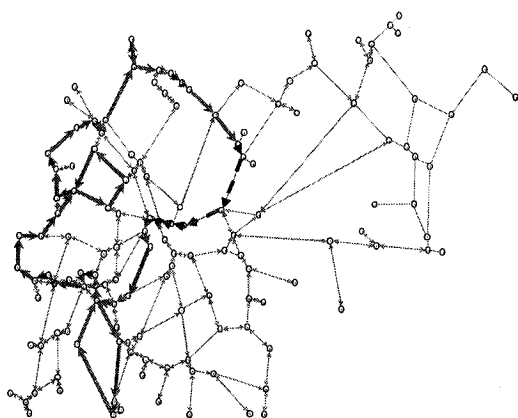
Figure 5-5. Comparaison tournée 3 des différents scénarios



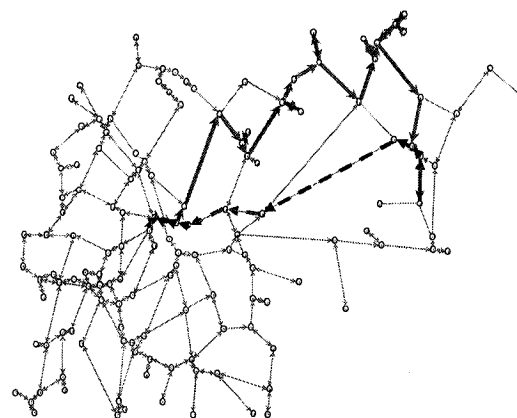
Scénario - Horizon 1



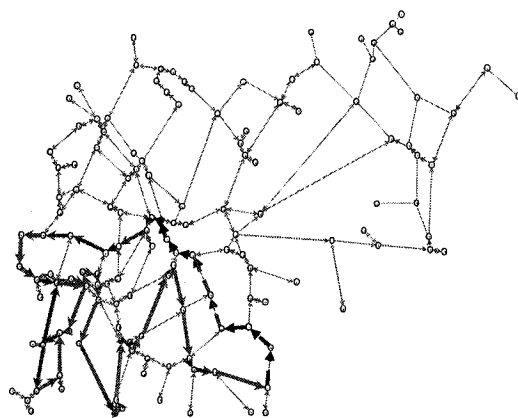
Scénario - Horizon 3



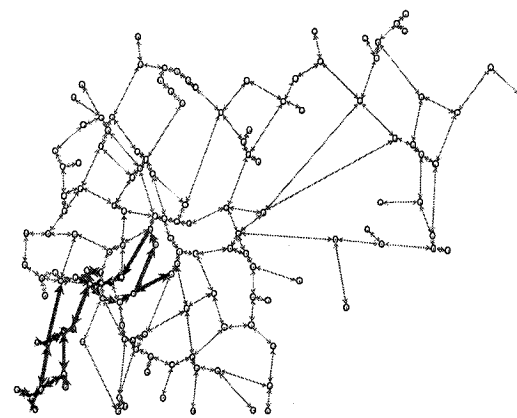
Scénario - Horizon 6



Scénario - Horizon 12



Scénario - Horizon 15



Scénario - PTAC

Figure 5-6. Comparaison tournée 10 des différents scénarios

L'aspect des tournées étant jugé sur des critères qualitatifs et non quantitatifs, il est important de montrer la différence entre une tournée jugée belle et une qui ne l'est pas. La tournée de droite de la Figure 5-7 représente une « belle » tournée puisqu'elle représente une forme de cercle. Au contraire, la tournée de gauche ne donne pas un bel aspect. Dans le cadre de l'étude, la tournée de gauche aurait une évaluation de 0,5 et celle de droite égale à 1 sur une échelle de 0 à 1.

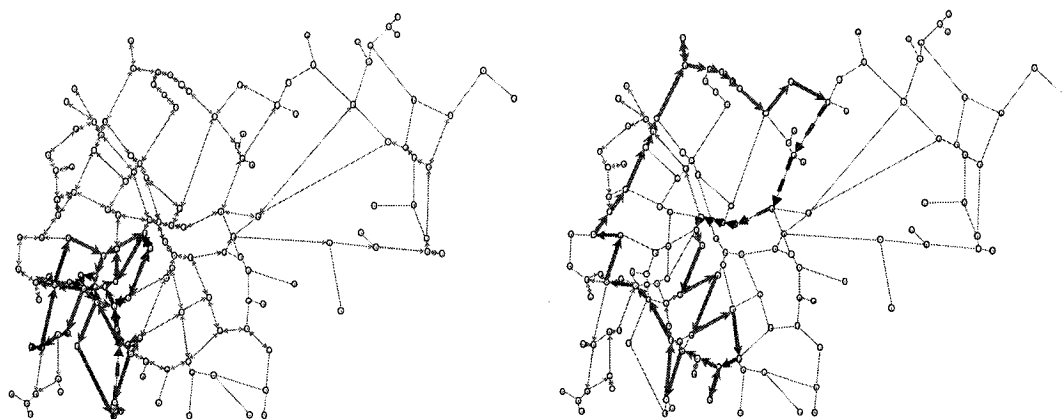


Figure 5-7. Comparaison de l'aspect de 2 tournées

Les tournées générées ont été jugées et la moyenne de chaque scénario est présentée dans le Tableau 5-7. Les meilleurs résultats sont encore une fois obtenus par les tournées construites à l'aide de l'horizon le plus grand tandis que l'allure des tournées PTAC est vraiment non satisfaisante.

Tableau 5-7. Moyenne de l'allure après 15 tournées (ICBT)

Scénario - Horizon	Facteur d'allure
1	0,63
3	0,66
6	0,71
12	0,83
15	0,83
PTAC	0,32

5.2.2 Traitement de la poursuite des activités lors d'événements

La deuxième partie de l'expérimentation consiste à vérifier l'impact d'un événement sur la création des tournées. Pour y arriver, une comparaison des résultats sera faite entre des tournées générées à l'aide de l'horizon de 12 arcs et de trois événements différents. La position des différents événements et l'état de la tournée qui sera interrompue sont représentés à la Figure 5-8.

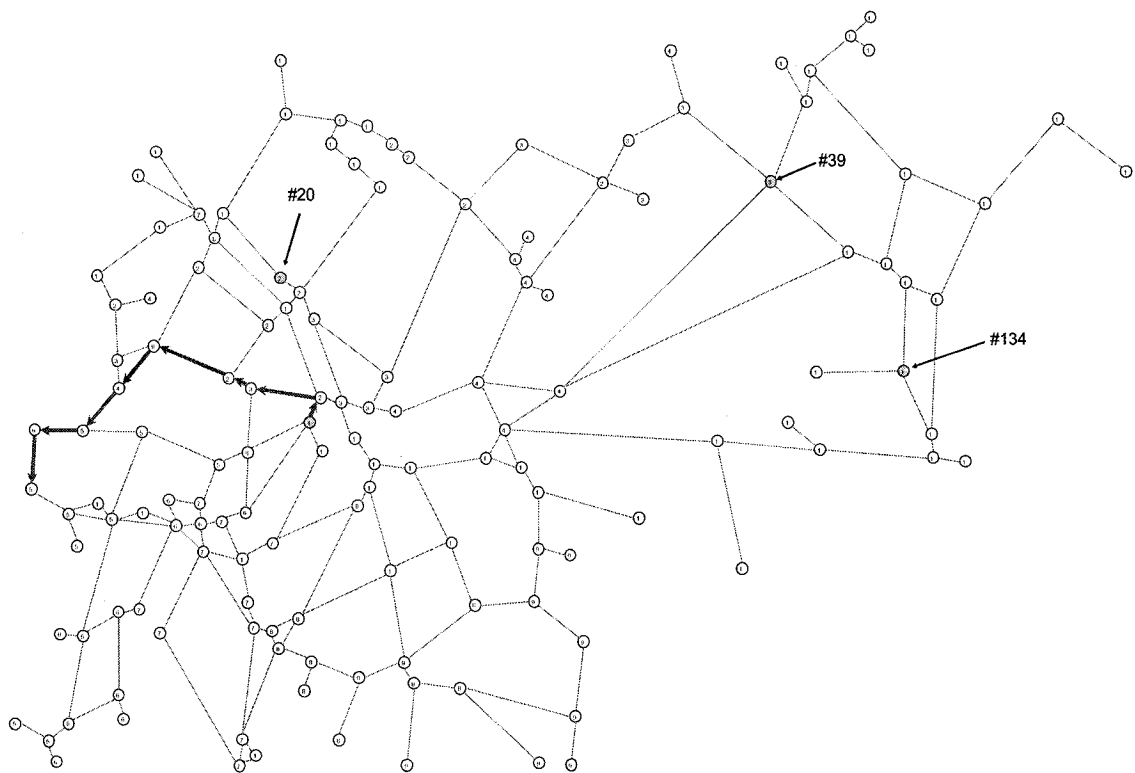
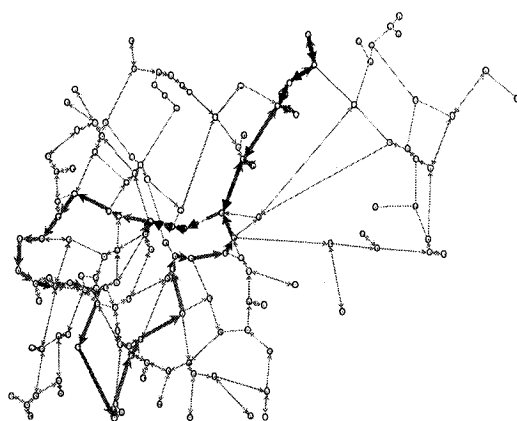


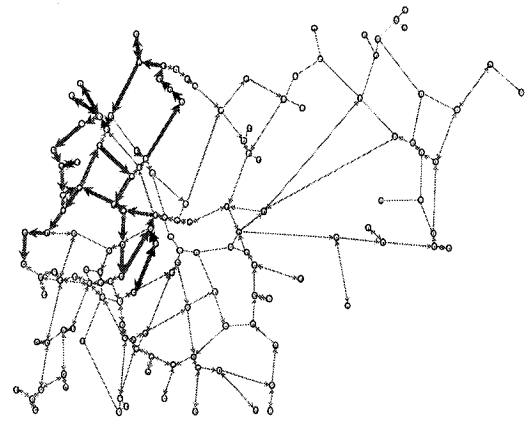
Figure 5-8. Situation de la tournée lors de l'événement

La disposition des événements a été sélectionnée au hasard dans les portions du réseau peu couvertes par la génération de tournées de l'expérimentation I. De cette manière, l'algorithme sera testé afin de vérifier sa capacité à réagir à différentes situations.

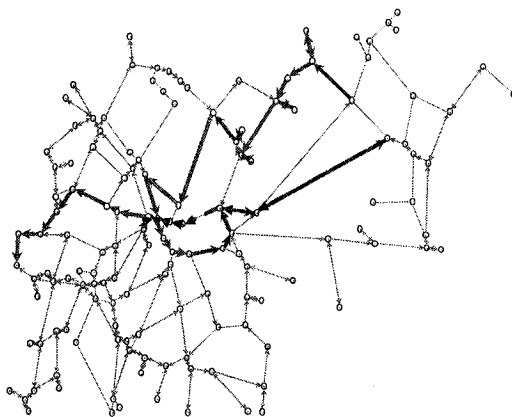
La 6^{ième} tournée a été choisie puisqu'elle offre une bonne quantité d'arcs déjà couverts ainsi qu'un grand nombre de tournées restantes à générer. L'effet d'interruption impacte considérablement l'allure d'une tournée comme le démontre la Figure 5-9 représentant la tournée interrompue dans chacun des scénarios. C'est en majeure partie pour cette raison que l'aspect des tournées interrompues ne sera pas évalué dans cette étude.



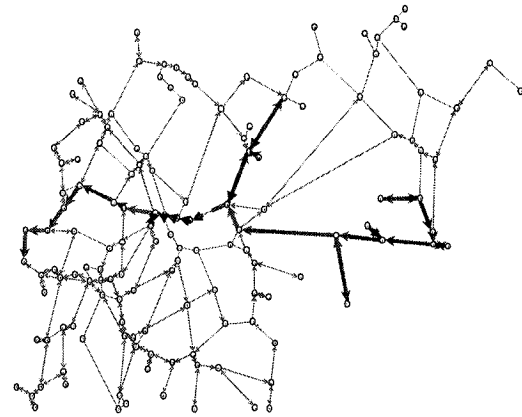
Scénario - Horizon 12



Scénario - Horizon 12 - 20



Scénario - Horizon 12 - 39



Scénario - Horizon 12 - 134

Figure 5-9. Comparaison tournées interrompues

Les résultats obtenus dans chacune des situations et ce, pour chacun des indicateurs de performance, sont représentés au Tableau 5-8. Le tableau contient la référence des résultats obtenus lors de l'expérimentation I afin de faciliter la comparaison.

Tableau 5-8. Sommaire des indicateurs de performance - expérimentation II

Scénario - Horizon	Capacité moyenne (%)	Ratio	Aller-retour			Classe			Facteur d'allure ¹²
			1	2	3	1	2	3	
12	96,07	87,97	0	53	10	100	86,16	83,84	0,83
12-20	95,40	89,57	0	57	7	98,67	86,95	88,05	0,86
12-39	96,53	90,11	0	54	9	95,15	89,80	87,85	0,86
12- 134	96,80	89,84	0	49	8	97,85	90,28	87,06	0,85

De manière générale, les résultats semblent assez semblables ou même supérieurs à ceux obtenus lors de l'expérimentation I. Le ratio de couverture a augmenté dans tous les cas (entre 2 et 3%), ce qui peut être partiellement expliqué par le choix de positionner les incidents à des endroits peu couverts lors de l'expérimentation précédente. L'allure générale des tournées a aussi augmenté. L'ensemble des tournées générées est présenté à l'annexe D et un exemplaire de deux tournées est présenté à la Figure 5-10. En contre partie, une diminution peu significative de la couverture des arcs de classe 1 s'est produite dans tous les cas tandis que la capacité moyenne des tournées est restée pratiquement équivalente. Finalement, pour ce qui est du nombre d'allers-retours générés, ils sont globalement restés semblables. Encore une fois, aucun aller-retour non obligatoire n'a été produit, mais ce sont les retours en arrière causés par les retours aux dépôts qui ont diminué laissant la place à la couverture d'arcs résultant sur une impasse.

¹² La moyenne des facteurs pour les tournées de l'expérimentation II ne tiennent pas compte de la tournée interrompue. La moyenne est donc faite sur 14 tournées au lieu de 15.

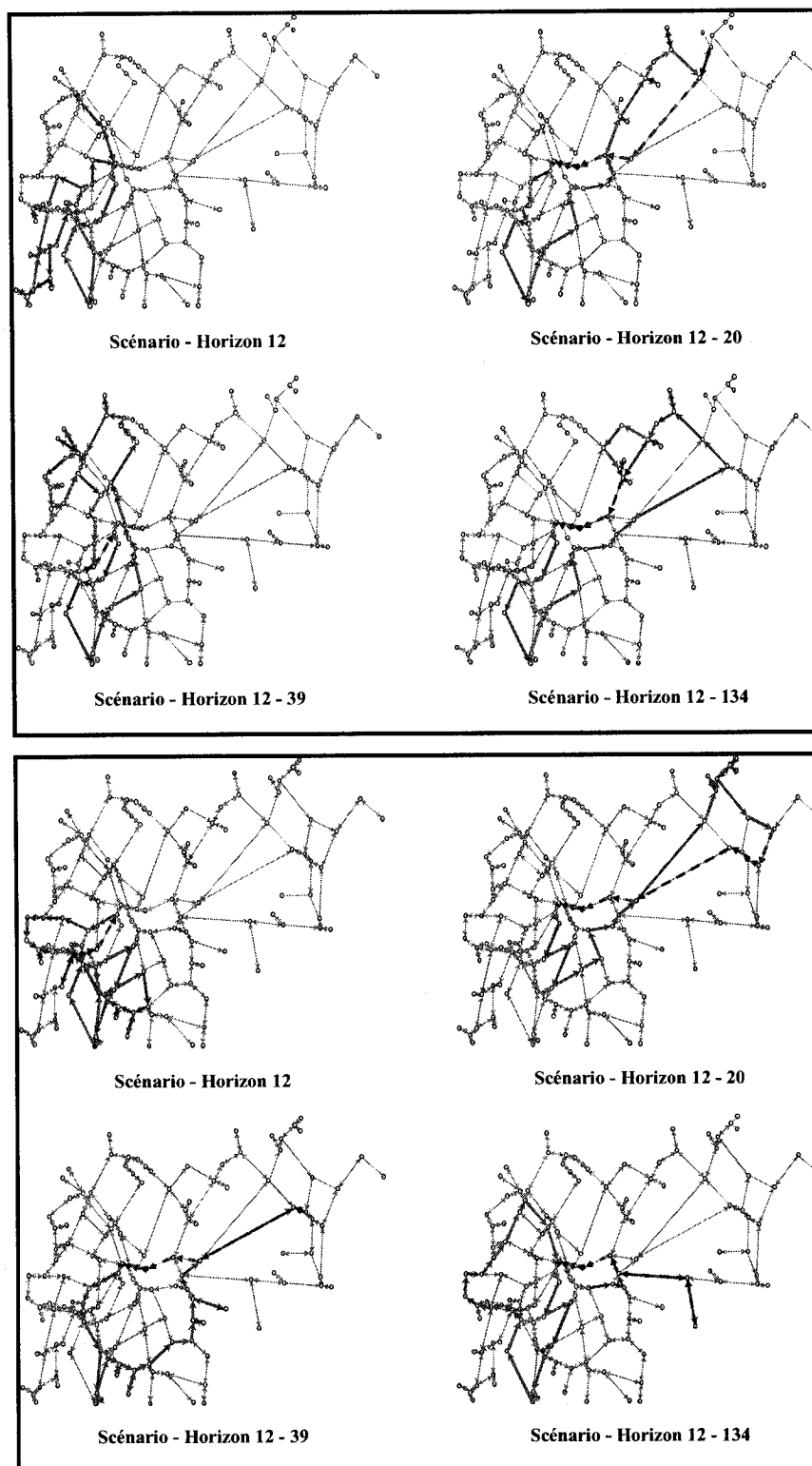


Figure 5-10. Comparaison tournée 8 & 15

5.2.3 Critiques

Les critiques envers l'approche présentée se situent principalement à deux niveaux, soit informationnel et opérationnel. En premier lieu, nous aborderons le niveau informationnel. Afin de tirer le maximum de l'algorithme en situation de reconstruction de tournées suivant une interruption, le statut de la couverture des arcs du réseau doit être connu avant l'utilisation de l'outil ; ce qui demande une structure informationnelle de mise à jour en temps quasi réel. Certes, une structure pareille n'est pas impossible à obtenir, mais étant pratiquement obligatoire au bon fonctionnement de l'approche en mode événementiel, cette dépendance aux informations en temps réel est bel et bien une faiblesse de l'approche proposée.

Le niveau opérationnel est le deuxième aspect abordé. Les expérimentations ont montré une diminution de l'amélioration des indicateurs de performance lorsque l'horizon d'évaluation devenait trop grand. L'hypothèse non validée est qu'un horizon d'évaluation de plus en plus grand aurait un impact négatif sur le choix de l'arc à ajouter si les situations suivantes sont rencontrées :

- une majorité d'arcs du réseau ont déjà été couverts;
- la capacité de la tournée est pratiquement à son maximum.

Par exemple, si l'horizon d'évaluation de la tournée est de 15 arcs et que, compte tenu de la capacité de la tournée, seulement 1 ou 2 arcs pourront s'y ajouter, l'évaluation fixe de 15 arcs peut avoir un effet négatif sur la sélection des arcs à ajouter si ce même horizon évalue une portion du réseau qui a déjà été couverte par une autre tournée.

Pour contrer cet aspect négatif, l'horizon d'évaluation devrait pouvoir s'ajuster au fur et à mesure de la progression de la tournée afin de ne pas évaluer un horizon beaucoup plus grand que le nombre d'arcs qui pourraient s'ajouter à la tournée.

Toujours sous un aspect opérationnel, l'interaction humaine est pratiquement inévitable compte tenu du nombre impressionnant de contraintes. L'algorithme présenté dans cet ouvrage tient seulement compte d'une partie des contraintes.

5.2.4 Avantages

La possibilité de l'utilisation de l'algorithme en situation dynamique est une difficulté d'un point de vue informationnel, mais d'un point de vue opérationnel, la simplicité de l'algorithme et sa facilité d'utilisation en situation dynamique est un avantage incontestable. L'expérimentation II atteste que la construction des tournées est faite en tenant compte de la situation actuelle du réseau.

L'utilisation de l'algorithme en situation dynamique est certes une commodité fort appréciable et de plus en plus nécessaire dans un contexte d'utilisation réel, mais le principal avantage de l'approche est très certainement l'amélioration de l'allure des tournées générées à l'aide cet algorithme. Les résultats obtenus sont même comparables avec des tournées créées manuellement avec l'expérience des planificateurs de tournées. Des exemples sont présentés aux Figure 5-11 & Figure 5-12.

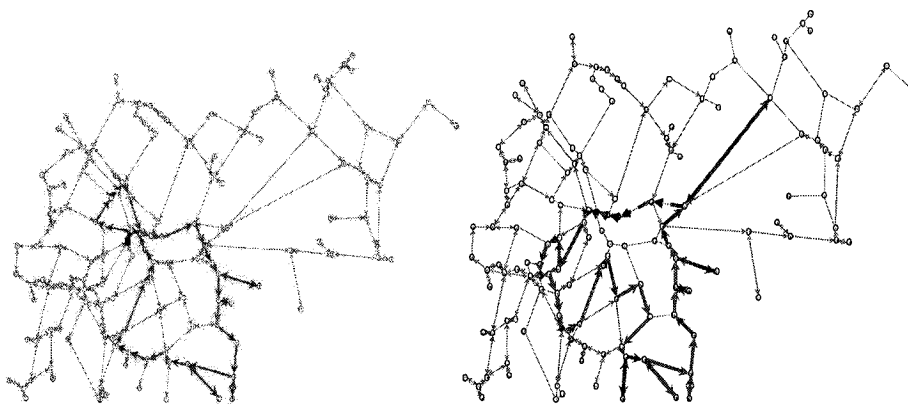


Figure 5-11. Circuit manuel (gauche) vs Circuit généré (droite) I

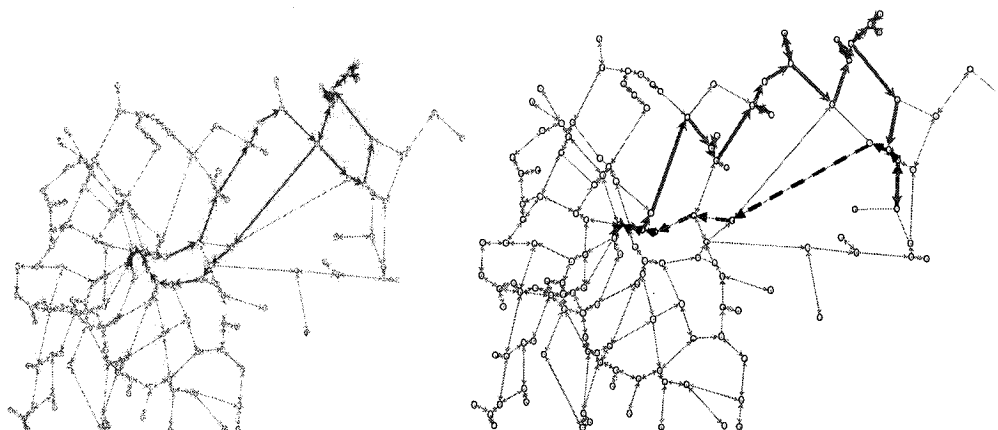


Figure 5-12. Circuit manuel (gauche) vs Circuit généré (droite) II

L'augmentation de l'horizon d'évaluation utilisé pour la sélection du prochain arc à être ajouté à la tournée permet de sélectionner non seulement un arc répondant le mieux aux critères établis, mais aussi de sélectionner la meilleure direction possible afin de satisfaire les critères d'optimisation.

CONCLUSION

Ce mémoire présente une approche algorithmique pour la résolution d'un problème de tournées de véhicule afin de réaliser des activités de surveillance. Ce type de problème a déjà été grandement étudié par les chercheurs, initialement sous deux angles complètement différents. Les premiers tentaient d'intégrer les grandes quantités d'information fournies par tous les systèmes informatiques reliés au traitement de l'information géographique. Les deuxièmes avaient une vision ou une approche strictement mathématique de la modélisation des problèmes de transport. Les récentes recherches ont tendance à combiner un peu plus ces deux aspects, mais l'optimisation mathématique des approches développées dans ces nouveaux outils informationnels et mathématiques ne considèrent que trop peu les besoins des usagers face à l'allure des tournées créées.

La contribution principale de ce mémoire est de contrebalancer les modèles mathématiques qui cherchent seulement à obtenir l'optimal mathématique et ce, en essayant d'intégrer une notion de création de « belles » tournées de véhicule à l'aide d'un algorithme « Look-ahead » bonifié.

La méthode présentée dans ce mémoire vise l'utilisation des données informationnelles combinées à un algorithme robuste de construction de circuits ayant comme objectif l'obtention de « belles » tournées qui sont opérationnellement utilisables, c'est-à-dire qu'elles rencontrent à la fois les contraintes opérationnelles (capacité de tournée, respect de la hiérarchisation du réseau, etc.) et les exigences humaines. Ces exigences humaines sont souvent laissées pour compte afin d'obtenir des résultats mathématiques optimaux; ce qui résulte en des tournées en forme d'arêtes de poisson ayant de nombreux allers-retours que les usagers refusent d'utiliser.

L'algorithme développé incorpore donc cette notion d'exigence humaine en l'intégrant à la fois dans l'objectif et dans l'algorithme lui-même afin d'obtenir des tournées ayant les qualités tant recherchées par les utilisateurs, soit l'utilisation de longs segments et la prévention des allers-retours non nécessaires. Elle introduit en plus la notion d'horizon d'évaluation qui est au cœur de l'efficacité de l'algorithme. Cet horizon permet de choisir une direction à la tournée et non seulement un arc à ajouter à la tournée.

L'horizon d'évaluation est un facteur crucial à l'efficacité de l'outil puisque c'est avec cette vision à long terme que l'allure des tournées peut s'améliorer. En tenant compte des $X^{\text{ièmes}}$ arcs suivants l'arc à choisir, l'algorithme évalue à tout moment la meilleure suite d'arcs satisfaisant l'objectif.

Quoique le principe théorique de l'approche soit très prometteur, il n'en demeure pas moins qu'une difficulté technique nuit à sa mise en application. Pour atteindre un niveau de dynamisme nécessaire à l'utilisation en temps réel, le niveau informationnel du suivi des opérations est extrêmement élevé; il demande de mettre continuellement à jour l'information relative au statut de couverture du réseau pour assurer une construction de tournées reflétant la réalité.

Les expérimentations menées ont permis de démontrer la validité de la méthode. Elle a su créer des tournées respectant les différentes contraintes et exigences humaines, produisant de « belles » tournées. Les expériences indiquent, basées sur différents indicateurs de performance, que l'efficacité de la méthode augmente avec l'horizon d'évaluation. Par contre, au-delà d'un certain horizon, les tournées ont tendance à se détériorer graduellement. L'hypothèse non validée sur cet effet serait qu'un trop grand horizon d'évaluation aurait des effets néfastes sur les tournées lorsque la combinaison des facteurs suivants est validée : une majorité d'arcs du réseau ont déjà été couverts et la capacité de la tournée est pratiquement à son maximum.

Les principales contributions de ce mémoire sont :

- La prise en compte des exigences humaines lors de l'optimisation, et ce au prix de l'abandon de l'optimal mathématique absolu;
- Le développement d'un heuristique mathématique de construction de « belles » tournées œuvrant dans une situation de construction initiale ou bien de reconstruction de tournées suite à des incidents;
- La mise en œuvre d'un outil informatique et informationnel permettant d'utiliser l'algorithme développé.

Les expérimentations menées fournissent ainsi de « belles » tournées. La majorité d'entre elles ayant une forme se rapprochant d'une goutte d'eau. Cependant, malgré des résultats encourageants, certaines lacunes amènent à soulever de nouvelles perspectives de recherches.

- Horizon d'évaluation : les expérimentations n'ont pu valider l'hypothèse de la détérioration des tournées lorsque l'horizon d'évaluation est trop grand. Il faudrait ainsi établir et définir les balises d'utilisation des horizons d'évaluation compte tenu de différents paramètres comme le nombre d'arcs du réseau ou le nombre d'arcs moyen dans les tournées. L'éventualité de faire varier l'horizon d'évaluation dépendamment de la situation pourrait aussi être intéressant.
- Construction de tournées : l'approche employée dans ce document comptait sur un objectif invariable, mais l'avenue de la modification de l'objectif compte tenu de la situation pourrait théoriquement améliorer l'allure des tournées générées. Les besoins d'une tournée varient au fur et à mesure de sa construction. Un objectif de recherche d'adaptation à ses différentes situations pourrait combler ce manque.

Somme toute, cette heuristique offre un potentiel fort appréciable pour atteindre l'objectif de construction de « belles » tournées. Il n'en reste pas moins que son succès repose entièrement sur la qualité des données qui la nourrissent. Ce type d'algorithme réagit de mieux en mieux lorsque son besoin informationnel est complètement comblé, permettant à tous ses paramètres d'être utilisés au maximum.

RÉFÉRENCES

AMPONSAH, S.K, SALHI, S. (2004). The investigation of a class of capacitated arc routing problems: the collection of garbage in developing countries, Waste Management 24. 711–721.

ASSAD, A.A., GOLDEN, B.L. (1995). Arc routing methods and applications, in Network Routing , vol 8, Handbook in Operations Research and Mngt. Science, Elsevier Sc.

CHAPLEAU, L., FERLAND, J.A., LAPALME, G., ROUSSEAU, J-M. (1984). A Parallel Insert Method for the Capacited Arc Routing Problem. Operations Research Letters; 3 (2) :95-99.

CHRISTOFIES, N. (1973). The Optimum Traversal of a Graph. Omega; 1 (6): 719-732.

CHRISTOFIDES, N. (1975). Graph theory. An Algorithm Approach. Academin Press, London.

CHRISTOFIDES, N., CAMPOS, V., CORBERÀN, A., MOTA, E. (1986). An Algorithm for the Rural Postman Problem on a Directed Graph. Math. Prog. Study; 26 : 155-166.

DROR, M., LANGEVIN, A. (2000). Transformations and exact node routing solutions by column generation. Dans : Dror M (Ed). *Arc Routing : Theory, Solutions and Applications*, Chapter 8. Kluwer Academic Publishers.

EDMONDS, J. JOHNSON, E.L. (1973). Matching, Euler Tours and the Chinese Postman Problem. Mathematical Programming; 5: 88-124.

EISELT, H. A., GENDREAU, M., LAPORTE, G.. (1985). Arc Routing Problems, Part I, Operations Research, 43(2), 231-242.

EISELT, H.A., GENDREAU, M., LAPORTE, G. (1995). Arc Routing Problems, Part II, Operations Research, 43(3), 399-414.

GOLDEN, B.L., DEARMON, J.S., BAKER, E.K. (1983). Computational Experiments with Algorithms for a Classe of Routing Problems. Computer and Operations Research; 10 (1): 45-59.

GOLDEN, B.L., WONG, R.T. (1981). Capacited Arc Routing Problems. Network; 11 (3) 305-315.

GUAN, M. (1962). "Graphic programming using odd and even point", Chinese Mahematics. 1,273-277.

HERTZ, A. (2002). Recent Trends in Arc Routing. Les cahiers du GERAD G-2002-51. 18p.

LAPORTE, G. (1993). "Recent algorithmic Developments for the traveling salesman problem and the vehicle routing problem." Ricerca Operativa, 23.

LAPORTE, G. (1992). "The traveling salesman problem: An overview of exact and approximate algorithms." European Journal of Operational Research, 59, 1992a, 231-247.

LAPORTE, G. (1992). "The vehicle routing problem: An overview of exact and approximate algorithms." European Journal of Operational Research, 59, 345-358.

LAWLER, E. L., LENSTRA, J. K., RINNOOY KAN, A. H. G. ET SHMOYS, D. B. (1985). The traveling salesman problem. A guided tour of combinatorial optimisation. John Wiley & Sons.

MARZOLF, F. (2003). Modélisation informationnelle et mathématique des opérations de surveillance du réseau routier. Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal. 260 p.

MITTAZ, M. (1999). Problèmes de cheminements optimaux dans les réseaux avec contraintes associées aux arcs. Thèse de doctorat, École Polytechnique Fédérale de Lausanne. 243 p.

ORLOFF, C.S.(1974). A fundamental Problem in Vehicle Routing. Networks; 4 : 35-64.

TRÉPANIÉ, M. (1999). Modélisation totalement désagrégée et orientée-objet appliquée aux transport urbains. Thèse de doctorat, École Polytechnique de Montréal. 255 p.

VAN AARDENNE-EHRENFEST, T, BRUIJN, N.G. (1951). Circuits and Trees in Oriented Linear Graphs. Simon Stevin; 28 : 203-217.

ANNEXE A - DÉFINITION DES ARCS ET LIENS

Les tableaux A-1 et A-2 présentent les caractéristiques des nœuds et des liens. Il faut noter que les positions des nœuds sont exprimées ici en pixels.

Tableau A-1: Caractéristique des nœuds

Id	Position X	Position Y	Nom
1	294	497,25	N1
2	326,25	547,5	N2
3	329,25	643,5	N3
4	332,25	691,5	N4
5	267	764,25	N5
6	180	762,75	N6
7	479,25	391,5	N7
8	507	432,75	N8
9	396	619,5	N9
10	369	324,75	N10
11	408	414	N11
12	522	390	N12
13	636	219,75	N13
14	627	129	N14
15	733,5	231	N15
16	716,25	270,75	N16
17	757,5	306	N17
18	803,25	345,75	N18
19	634,5	554,25	N19
20	624	501,75	N20
21	658,5	527,25	N21

22	602,25	584,25	N22
23	477,75	483,75	N23
24	531	675	N24
25	695,25	708,75	N25
26	825,75	272,25	N26
27	855	294,75	N27
28	956,25	375,75	N28
29	1203,75	340,5	N29
30	1277,25	369	N30
31	1058,25	273,75	N31
32	815,25	673,5	N32
33	781,5	726,75	N33
34	732	717	N34
35	684,75	573,75	N35
36	570,75	693	N36
37	1251	267	N37
38	1350	211,5	N38
39	1506	339	N39
40	1326,75	114	N40
41	1125	699	N41
42	978	683,25	N42
43	830,25	732,75	N43
44	1065,75	511,5	N44
45	1046,25	471	N45
46	1068,75	432,75	N46
47	1104	533,25	N47
48	1026	765	N48
49	390	537	N49
50	373,5	766,5	N50

51	174	864,75	N51
52	513	823,5	N52
53	318,75	917,25	N53
54	240,75	908,25	N54
55	255	963,75	N55
56	239,25	1269,75	N56
57	265,5	1118,25	N57
58	203,25	1299,75	N58
59	142,5	1269,75	N59
60	338,25	1262,25	N60
61	216,75	1335	N61
62	224,25	1115,25	N62
63	329,25	1220,25	N63
64	434,25	928,5	N64
65	564,75	802,5	N65
66	329,25	1077	N66
67	479,25	925,5	N67
68	560,25	906,75	N68
69	421,5	884,25	N69
70	517,5	922,5	N70
71	477,75	890,25	N71
72	367,5	1072,5	N72
73	548,25	1343,25	N73
74	405	1113,75	N74
75	552,75	1298,25	N75
76	483,75	973,5	N76
77	573,75	1105,5	N77
78	563,25	1061,25	N78
79	609	959,25	N79

80	606,75	1110,75	N80
81	618	1140,75	N81
82	677,25	1164,75	N82
83	654	1089,75	N83
84	971,25	1067,25	N84
85	760,5	895,5	N85
86	664,5	1214,25	N86
87	944,25	1210,5	N87
88	861	1201,5	N88
89	726,75	1299,75	N89
90	848,25	1343,25	N90
91	762	1191,75	N91
92	843,75	1166,25	N92
93	1086,75	1340,25	N93
94	1077,75	1061,25	N94
95	1166,25	1131	N95
96	1085,25	970,5	N96
97	1144,5	1343,25	N97
98	1152	1260	N98
99	1143	981,75	N99
100	819,75	1007,25	N100
101	675,75	751,5	N101
102	698,25	801	N102
103	554,25	986,25	N103
104	929,25	959,25	N104
105	756	779,25	N105
106	783	863,25	N106
107	791,25	823,5	N107
108	1409,25	785,25	N108

109	1535,25	753,75	N109
110	991,5	813,75	N110
111	1267,5	918	N111
112	856,5	830,25	N112
113	1085,25	873	N113
114	1452,75	1005	N114
115	1593	801	N115
116	1644,75	460,5	N116
117	1055,25	830,25	N117
118	1749	326,25	N118
119	1526,25	136,5	N119
120	1714,5	480,75	N120
121	1577,25	149,25	N121
122	2145,75	323,25	N122
123	1571,25	201,75	N123
124	1892,25	377,25	N124
125	2024,25	232,5	N125
126	1650,75	89,25	N126
127	1683,75	114	N127
128	1686,75	57	N128
129	1587	667,5	N129
130	1797,75	815,25	N130
131	1855,5	822	N131
132	1805,25	543	N132
133	1794,75	774	N133
134	1744,5	666	N134
135	1749	513	N135
136	781,5	241,5	N136
137	375	906,75	N137

138	294	890,25	N138
139	402	283,5	N139
140	576,75	1325,25	N140

Tableau A-2: Caractéristique des liens

Id	Source	Target	c_a	obli	Nom	Classe	Couverture	pénalité	Longueur
1	1	2	0	10	L340	2	1	1	4,26
2	1	11	0	10	L742	2	1	1	10,08
3	2	1	0	10	L339	2	1	1	4,26
4	2	3	0	10	L338	2	1	1	6,86
5	2	49	0	10	L450	3	1	1	4,61
6	3	2	0	10	L337	2	1	1	6,86
7	3	4	0	10	L336	2	1	1	3,43
8	3	9	0	10	L729	2	1	1	5,06
9	4	3	0	10	L335	2	1	1	3,43
10	4	5	0	10	L334	2	1	1	6,98
11	4	9	0	10	L341	2	1	1	6,86
12	5	4	0	10	L333	2	1	1	6,98
13	5	6	0	10	L332	2	1	1	6,21
14	5	50	0	10	L483	3	1	1	7,60
15	6	5	0	10	L331	2	1	1	6,21
16	6	51	0	10	L735	2	1	1	7,29
17	7	8	0	10	L344	1	1	1	3,55
18	7	10	0	10	L347	1	1	1	9,20
19	7	11	0	10	L345	2	1	1	5,33
20	7	139	0	10	L704	3	1	1	9,48
21	8	7	0	10	L343	1	1	1	3,55
22	8	12	0	10	L706	3	1	1	3,23
23	8	19	0	10	L373	1	1	1	12,58
24	8	23	0	10	L713	2	1	1	4,19
25	9	3	0	10	L730	2	1	1	5,06
26	9	4	0	10	L342	2	1	1	6,86

27	9	23	0	10	L716	2	1	1	11,31
28	9	24	0	10	L379	2	1	1	10,42
29	10	7	0	10	L348	1	1	1	9,20
30	11	1	0	10	L741	2	1	1	10,08
31	11	7	0	10	L346	2	1	1	5,33
32	12	8	0	10	L705	3	1	1	3,23
33	12	13	0	10	L351	3	1	1	14,63
34	12	20	0	10	L366	3	1	1	10,80
35	13	12	0	10	L352	3	1	1	14,63
36	13	14	0	10	L353	3	1	1	6,51
37	13	15	0	10	L355	3	1	1	7,01
38	14	13	0	10	L354	3	1	1	6,51
39	15	13	0	10	L356	3	1	1	7,01
40	15	16	0	10	L357	2	1	1	3,09
41	15	136	0	10	L689	2	1	1	3,51
42	16	15	0	10	L358	2	1	1	3,09
43	16	17	0	10	L359	2	1	1	3,87
44	17	16	0	10	L360	2	1	1	3,87
45	17	18	0	10	L361	2	1	1	4,32
46	18	17	0	10	L362	2	1	1	4,32
47	18	21	0	10	L369	2	1	1	16,58
48	19	8	0	10	L374	1	1	1	12,58
49	19	21	0	10	L372	2	1	1	2,58
50	19	22	0	10	L375	2	1	1	3,14
51	19	25	0	10	L393	1	1	1	11,85
52	20	12	0	10	L365	3	1	1	10,80
53	20	21	0	10	L367	3	1	1	3,06
54	21	18	0	10	L370	2	1	1	16,58
55	21	19	0	10	L371	2	1	1	2,58
56	21	20	0	10	L368	3	1	1	3,06
57	21	35	0	10	L389	3	1	1	3,81
58	22	19	0	10	L376	2	1	1	3,14
59	22	23	0	10	L378	3	1	1	11,42
60	22	24	0	10	L381	2	1	1	8,24
61	23	8	0	10	L714	2	1	1	4,19
62	23	9	0	10	L715	2	1	1	11,31
63	23	22	0	10	L377	3	1	1	11,42

64	24	9	0	10	L380	2	1	1	10,42
65	24	22	0	10	L382	2	1	1	8,24
66	24	36	0	10	L395	3	1	1	3,11
67	25	19	0	10	L394	1	1	1	11,85
68	25	34	0	10	L399	1	1	1	2,69
69	25	36	0	10	L398	3	1	1	8,96
70	25	101	0	10	L603	1	1	1	3,35
71	26	27	0	10	L385	2	1	1	2,63
72	26	136	0	10	L692	2	1	1	3,84
73	27	26	0	10	L386	2	1	1	2,63
74	27	28	0	10	L405	2	1	1	9,26
75	28	27	0	10	L406	2	1	1	9,26
76	28	31	0	10	L411	3	1	1	10,30
77	28	32	0	10	L407	3	1	1	23,53
78	28	45	0	10	L434	2	1	1	9,36
79	29	30	0	10	L415	3	1	1	5,63
80	29	31	0	10	L414	3	1	1	11,43
81	29	37	0	10	L417	2	1	1	6,24
82	29	44	0	10	L429	2	1	1	15,69
83	30	29	0	10	L416	3	1	1	5,63
84	31	28	0	10	L412	3	1	1	10,30
85	31	29	0	10	L413	3	1	1	11,43
86	32	28	0	10	L408	3	1	1	23,53
87	32	33	0	10	L409	3	1	1	4,50
88	32	35	0	10	L404	3	1	1	11,73
89	33	32	0	10	L410	3	1	1	4,50
90	33	34	0	10	L402	1	1	1	3,60
91	33	43	0	10	L425	1	1	1	3,50
92	34	25	0	10	L400	1	1	1	2,69
93	34	33	0	10	L401	1	1	1	3,60
94	34	35	0	10	L392	3	1	1	10,77
95	34	105	0	10	L581	3	1	1	4,76
96	35	21	0	10	L390	3	1	1	3,81
97	35	32	0	10	L403	3	1	1	11,73
98	35	34	0	10	L391	3	1	1	10,77
99	36	24	0	10	L396	3	1	1	3,11
100	36	25	0	10	L397	3	1	1	8,96

101	36	65	0	10	L491	3	1	1	7,83
102	37	29	0	10	L418	2	1	1	6,24
103	37	38	0	10	L419	2	1	1	8,10
104	38	37	0	10	L420	2	1	1	8,10
105	38	39	0	10	L421	2	1	1	14,39
106	38	40	0	10	L424	3	1	1	7,15
107	39	38	0	10	L422	2	1	1	14,39
108	39	41	0	10	L439	2	1	1	37,44
109	39	116	0	10	L639	2	1	1	13,17
110	39	123	0	10	L641	2	1	1	10,85
111	40	38	0	10	L423	3	1	1	7,15
112	41	39	0	10	L440	2	1	1	37,44
113	41	42	0	10	L444	3	1	1	10,56
114	41	48	0	10	L445	2	1	1	8,49
115	41	116	0	10	L637	3	1	1	40,84
116	42	41	0	10	L443	3	1	1	10,56
117	42	43	0	10	L428	2	1	1	11,13
118	42	44	0	10	L442	2	1	1	13,77
119	42	48	0	10	L447	2	1	1	6,77
120	43	33	0	10	L426	1	1	1	3,50
121	43	42	0	10	L427	2	1	1	11,13
122	44	29	0	10	L430	2	1	1	15,69
123	44	42	0	10	L441	2	1	1	13,77
124	44	45	0	10	L431	2	1	1	3,21
125	44	47	0	10	L437	3	1	1	3,14
126	45	28	0	10	L433	2	1	1	9,36
127	45	44	0	10	L432	2	1	1	3,21
128	45	46	0	10	L435	3	1	1	3,17
129	46	45	0	10	L436	3	1	1	3,17
130	47	44	0	10	L438	3	1	1	3,14
131	48	41	0	10	L446	2	1	1	8,49
132	48	42	0	10	L448	2	1	1	6,77
133	48	108	0	10	L629	2	1	1	27,41
134	48	110	0	10	L626	2	1	1	4,26
135	48	117	0	10	L628	3	1	1	5,10
136	49	2	0	10	L449	3	1	1	4,61
137	50	5	0	10	L484	3	1	1	7,60

138	50	52	0	10	L487	3	1	1	10,76
139	50	53	0	10	L485	3	1	1	11,45
140	51	6	0	10	L736	2	1	1	7,29
141	51	54	0	10	L469	2	1	1	5,69
142	52	50	0	10	L488	3	1	1	10,76
143	52	65	0	10	L489	3	1	1	3,98
144	52	71	0	10	L728	3	1	1	5,39
145	53	50	0	10	L486	3	1	1	11,45
146	53	54	0	10	L468	1	1	1	5,60
147	53	57	0	10	L721	3	1	1	14,85
148	53	64	0	10	L707	1	1	1	8,28
149	53	137	0	10	L699	2	1	1	4,08
150	53	138	0	10	L698	2	1	1	2,61
151	54	51	0	10	L470	2	1	1	5,69
152	54	53	0	10	L467	1	1	1	5,60
153	54	55	0	10	L471	3	1	1	4,09
154	54	138	0	10	L695	2	1	1	4,01
155	55	54	0	10	L472	3	1	1	4,09
156	56	57	0	10	L466	3	1	1	10,98
157	56	58	0	10	L456	3	1	1	3,34
158	56	63	0	10	L457	3	1	1	7,33
159	57	53	0	10	L720	3	1	1	14,85
160	57	56	0	10	L465	3	1	1	10,98
161	57	62	0	10	L464	3	1	1	2,95
162	57	66	0	10	L739	3	1	1	5,42
163	58	56	0	10	L455	3	1	1	3,34
164	58	59	0	10	L452	3	1	1	4,83
165	58	61	0	10	L453	3	1	1	2,69
166	59	58	0	10	L451	3	1	1	4,83
167	60	63	0	10	L460	3	1	1	3,06
168	61	58	0	10	L454	3	1	1	2,69
169	62	57	0	10	L463	3	1	1	2,95
170	63	56	0	10	L458	3	1	1	7,33
171	63	60	0	10	L459	3	1	1	3,06
172	63	66	0	10	L473	3	1	1	10,23
173	64	53	0	10	L708	1	1	1	8,28
174	64	67	0	10	L495	1	1	1	3,22

175	64	69	0	10	L479	3	1	1	3,28
176	64	72	0	10	L478	3	1	1	11,33
177	64	76	0	10	L503	2	1	1	4,77
178	64	137	0	10	L702	2	1	1	4,50
179	65	36	0	10	L492	3	1	1	7,83
180	65	52	0	10	L490	3	1	1	3,98
181	65	68	0	10	L493	3	1	1	7,45
182	65	101	0	10	L606	3	1	1	8,72
183	66	57	0	10	L738	3	1	1	5,42
184	66	63	0	10	L474	3	1	1	10,23
185	66	72	0	10	L475	3	1	1	2,75
186	67	64	0	10	L496	1	1	1	3,22
187	67	70	0	10	L497	1	1	1	2,74
188	67	71	0	10	L723	3	1	1	2,52
189	67	76	0	10	L501	3	1	1	3,44
190	68	65	0	10	L494	3	1	1	7,45
191	68	70	0	10	L500	1	1	1	3,25
192	68	101	0	10	L519	1	1	1	13,82
193	69	64	0	10	L480	3	1	1	3,28
194	69	71	0	10	L481	3	1	1	4,04
195	70	67	0	10	L498	1	1	1	2,74
196	70	68	0	10	L499	1	1	1	3,25
197	70	103	0	10	L525	1	1	1	5,25
198	71	52	0	10	L727	3	1	1	5,39
199	71	67	0	10	L724	3	1	1	2,52
200	71	69	0	10	L482	3	1	1	4,04
201	72	64	0	10	L477	3	1	1	11,33
202	72	66	0	10	L476	3	1	1	2,75
203	73	74	0	10	L510	3	1	1	19,32
204	73	75	0	10	L511	1	1	1	3,23
205	73	140	0	10	L709	3	1	1	2,40
206	74	73	0	10	L509	3	1	1	19,32
207	74	76	0	10	L508	3	1	1	11,48
208	75	73	0	10	L512	1	1	1	3,23
209	75	77	0	10	L513	1	1	1	13,84
210	75	81	0	10	L535	3	1	1	12,17
211	75	140	0	10	L712	3	1	1	2,58

212	76	64	0	10	L504	2	1	1	4,77
213	76	67	0	10	L502	3	1	1	3,44
214	76	74	0	10	L507	3	1	1	11,48
215	76	77	0	10	L517	3	1	1	11,41
216	76	103	0	10	L523	3	1	1	5,11
217	77	75	0	10	L514	1	1	1	13,84
218	77	76	0	10	L518	3	1	1	11,41
219	77	78	0	10	L515	1	1	1	3,24
220	77	80	0	10	L532	2	1	1	2,38
221	78	77	0	10	L516	1	1	1	3,24
222	78	103	0	10	L529	1	1	1	5,39
223	79	85	0	10	L543	3	1	1	11,74
224	79	102	0	10	L545	3	1	1	12,97
225	79	103	0	10	L528	3	1	1	4,36
226	80	77	0	10	L531	2	1	1	2,38
227	80	81	0	10	L534	2	1	1	2,28
228	80	83	0	10	L537	3	1	1	3,69
229	81	75	0	10	L536	3	1	1	12,17
230	81	80	0	10	L533	2	1	1	2,28
231	81	82	0	10	L547	2	1	1	4,56
232	81	83	0	10	L539	3	1	1	4,45
233	82	81	0	10	L548	2	1	1	4,56
234	82	86	0	10	L550	3	1	1	3,65
235	82	91	0	10	L551	2	1	1	6,35
236	83	80	0	10	L538	3	1	1	3,69
237	83	81	0	10	L540	3	1	1	4,45
238	83	85	0	10	L541	3	1	1	15,82
239	83	100	0	10	L577	3	1	1	13,22
240	84	92	0	10	L575	3	1	1	11,53
241	84	94	0	10	L574	3	1	1	7,61
242	84	104	0	10	L598	3	1	1	8,27
243	85	79	0	10	L544	3	1	1	11,74
244	85	83	0	10	L542	3	1	1	15,82
245	85	106	0	10	L592	2	1	1	2,80
246	86	82	0	10	L549	3	1	1	3,65
247	87	88	0	10	L562	3	1	1	5,98
248	87	93	0	10	L565	3	1	1	13,76

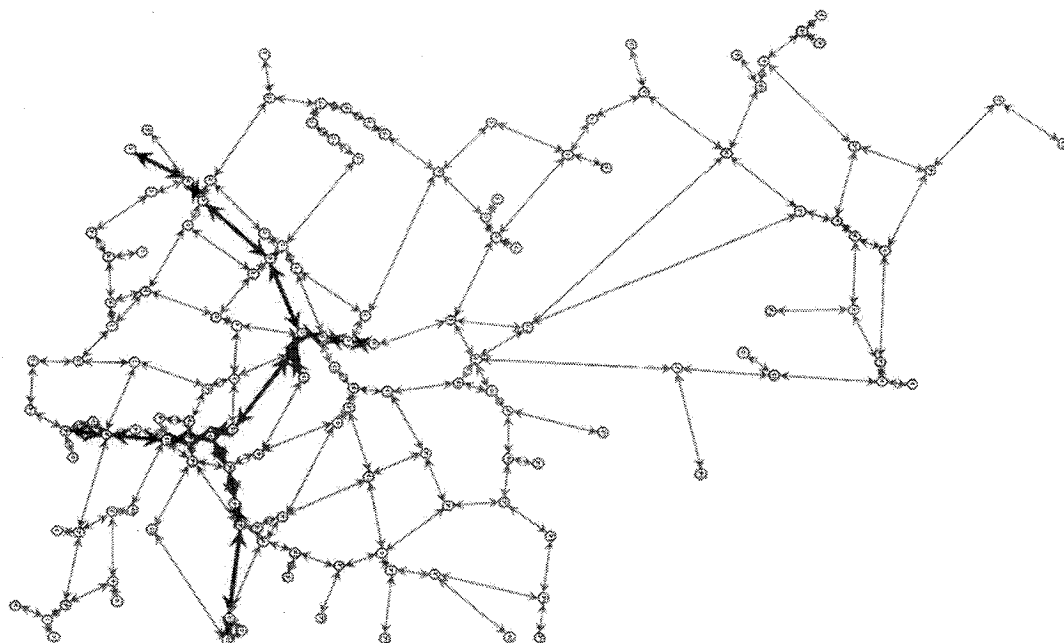
249	87	98	0	10	L563	3	1	1	15,25
250	88	87	0	10	L561	3	1	1	5,98
251	88	90	0	10	L559	2	1	1	10,16
252	88	92	0	10	L558	2	1	1	2,80
253	89	91	0	10	L553	3	1	1	8,11
254	90	88	0	10	L560	2	1	1	10,16
255	91	82	0	10	L552	2	1	1	6,35
256	91	89	0	10	L554	3	1	1	8,11
257	91	92	0	10	L555	2	1	1	6,11
258	92	84	0	10	L576	3	1	1	11,53
259	92	88	0	10	L557	2	1	1	2,80
260	92	91	0	10	L556	2	1	1	6,11
261	92	100	0	10	L579	2	1	1	11,48
262	93	87	0	10	L566	3	1	1	13,76
263	94	84	0	10	L573	3	1	1	7,61
264	94	95	0	10	L572	3	1	1	8,04
265	94	96	0	10	L600	3	1	1	6,50
266	95	94	0	10	L571	3	1	1	8,04
267	95	98	0	10	L570	3	1	1	9,27
268	96	94	0	10	L599	3	1	1	6,50
269	96	99	0	10	L601	3	1	1	4,20
270	96	113	0	10	L607	3	1	1	6,96
271	97	98	0	10	L567	3	1	1	5,97
272	98	87	0	10	L564	3	1	1	15,25
273	98	95	0	10	L569	3	1	1	9,27
274	98	97	0	10	L568	3	1	1	5,97
275	99	96	0	10	L602	3	1	1	4,20
276	100	83	0	10	L578	3	1	1	13,22
277	100	92	0	10	L580	2	1	1	11,48
278	100	104	0	10	L595	3	1	1	8,54
279	100	106	0	10	L594	2	1	1	10,61
280	101	25	0	10	L604	1	1	1	3,35
281	101	65	0	10	L605	3	1	1	8,72
282	101	68	0	10	L520	1	1	1	13,82
283	101	102	0	10	L586	1	1	1	3,88
284	102	79	0	10	L546	3	1	1	12,97
285	102	101	0	10	L585	1	1	1	3,88

286	103	70	0	10	L526	1	1	1	5,25
287	103	76	0	10	L524	3	1	1	5,11
288	103	78	0	10	L530	1	1	1	5,39
289	103	79	0	10	L527	3	1	1	4,36
290	104	84	0	10	L597	3	1	1	8,27
291	104	100	0	10	L596	3	1	1	8,54
292	104	112	0	10	L733	3	1	1	10,57
293	105	34	0	10	L582	3	1	1	4,76
294	105	107	0	10	L587	2	1	1	4,04
295	106	85	0	10	L591	2	1	1	2,80
296	106	100	0	10	L593	2	1	1	10,61
297	106	107	0	10	L590	2	1	1	2,90
298	107	105	0	10	L588	2	1	1	4,04
299	107	106	0	10	L589	2	1	1	2,90
300	107	112	0	10	L618	2	1	1	4,68
301	108	48	0	10	L630	2	1	1	27,41
302	108	114	0	10	L631	3	1	1	16,00
303	108	115	0	10	L635	2	1	1	13,17
304	109	115	0	10	L634	3	1	1	5,33
305	110	48	0	10	L625	2	1	1	4,26
306	110	112	0	10	L615	2	1	1	9,71
307	110	117	0	10	L614	3	1	1	4,70
308	111	113	0	10	L610	3	1	1	13,40
309	112	104	0	10	L732	3	1	1	10,57
310	112	107	0	10	L617	2	1	1	4,68
311	112	110	0	10	L616	2	1	1	9,71
312	113	96	0	10	L608	3	1	1	6,96
313	113	111	0	10	L609	3	1	1	13,40
314	113	117	0	10	L611	3	1	1	3,73
315	114	108	0	10	L632	3	1	1	16,00
316	115	108	0	10	L636	2	1	1	13,17
317	115	109	0	10	L633	3	1	1	5,33
318	115	130	0	10	L681	2	1	1	14,66
319	116	39	0	10	L640	2	1	1	13,17
320	116	41	0	10	L638	3	1	1	40,84
321	116	120	0	10	L663	2	1	1	5,18
322	117	48	0	10	L627	3	1	1	5,10

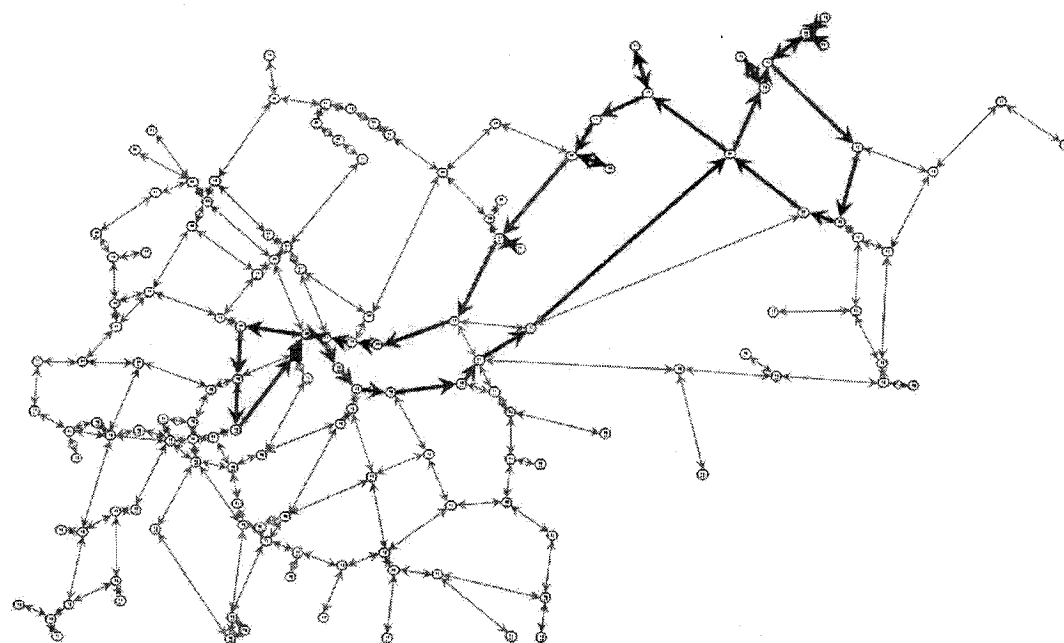
323	117	110	0	10	L613	3	1	1	4,70
324	117	113	0	10	L612	3	1	1	3,73
325	118	120	0	10	L683	3	1	1	11,30
326	118	121	0	10	L654	3	1	1	17,61
327	118	124	0	10	L655	3	1	1	10,86
328	119	123	0	10	L652	3	1	1	5,66
329	120	116	0	10	L664	2	1	1	5,18
330	120	118	0	10	L684	3	1	1	11,30
331	120	135	0	10	L665	2	1	1	3,37
332	121	118	0	10	L653	3	1	1	17,61
333	121	123	0	10	L644	2	1	1	3,77
334	121	126	0	10	L645	2	1	1	6,77
335	122	125	0	10	L660	2	1	1	10,83
336	123	39	0	10	L642	2	1	1	10,85
337	123	119	0	10	L651	3	1	1	5,66
338	123	121	0	10	L643	2	1	1	3,77
339	124	118	0	10	L656	3	1	1	10,86
340	124	125	0	10	L657	2	1	1	13,99
341	124	132	0	10	L661	2	1	1	13,37
342	125	122	0	10	L659	2	1	1	10,83
343	125	124	0	10	L658	2	1	1	13,99
344	126	121	0	10	L646	2	1	1	6,77
345	126	127	0	10	L647	3	1	1	2,94
346	126	128	0	10	L649	2	1	1	3,45
347	127	126	0	10	L648	3	1	1	2,94
348	128	126	0	10	L650	2	1	1	3,45
349	129	134	0	10	L680	3	1	1	11,25
350	130	115	0	10	L682	2	1	1	14,66
351	130	131	0	10	L675	2	1	1	4,15
352	130	133	0	10	L674	2	1	1	2,95
353	131	130	0	10	L676	2	1	1	4,15
354	132	124	0	10	L662	2	1	1	13,37
355	132	133	0	10	L677	2	1	1	16,51
356	132	135	0	10	L668	2	1	1	4,55
357	133	130	0	10	L673	2	1	1	2,95
358	133	132	0	10	L678	2	1	1	16,51
359	133	134	0	10	L672	3	1	1	8,50

360	134	129	0	10	L679	3	1	1	11,25
361	134	133	0	10	L671	3	1	1	8,50
362	134	135	0	10	L670	3	1	1	10,93
363	135	120	0	10	L666	2	1	1	3,37
364	135	132	0	10	L667	2	1	1	4,55
365	135	134	0	10	L669	3	1	1	10,93
366	136	15	0	10	L690	2	1	1	3,51
367	136	26	0	10	L691	2	1	1	3,84
368	137	53	0	10	L700	2	1	1	4,08
369	137	64	0	10	L701	2	1	1	4,50
370	138	53	0	10	L697	2	1	1	2,61
371	138	54	0	10	L696	2	1	1	4,01
372	139	7	0	10	L703	3	1	1	9,48
373	140	73	0	10	L710	3	1	1	2,40
374	140	75	0	10	L711	3	1	1	2,58

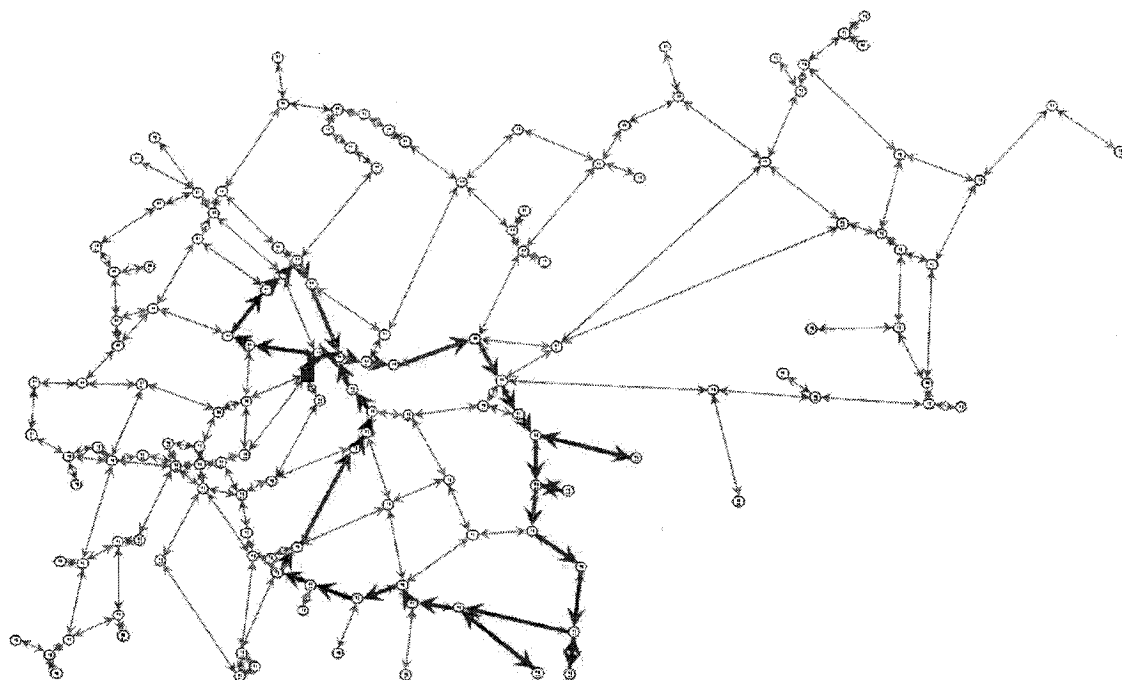
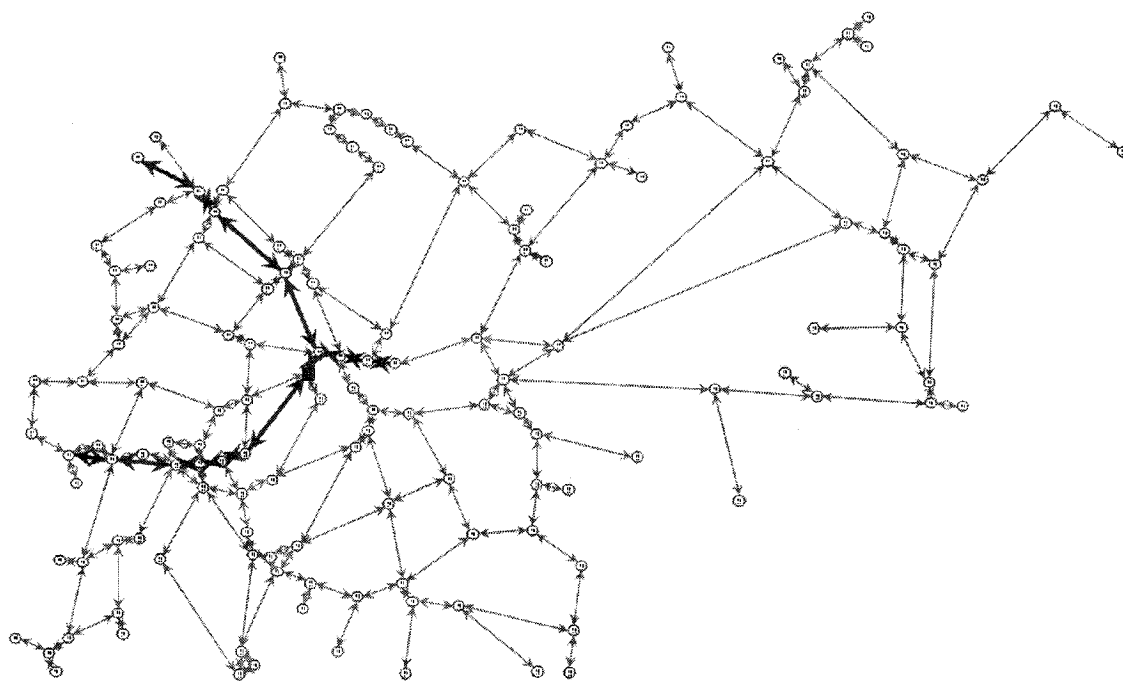
ANNEXE B - CIRCUITS PRÉDÉTERMINÉS

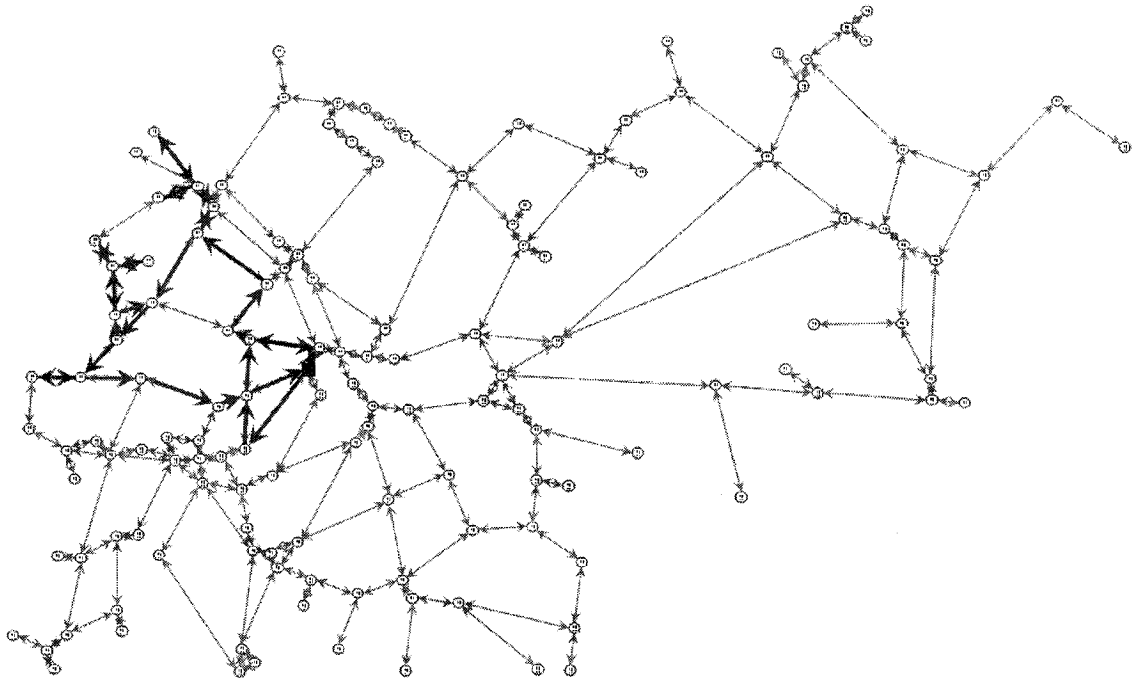
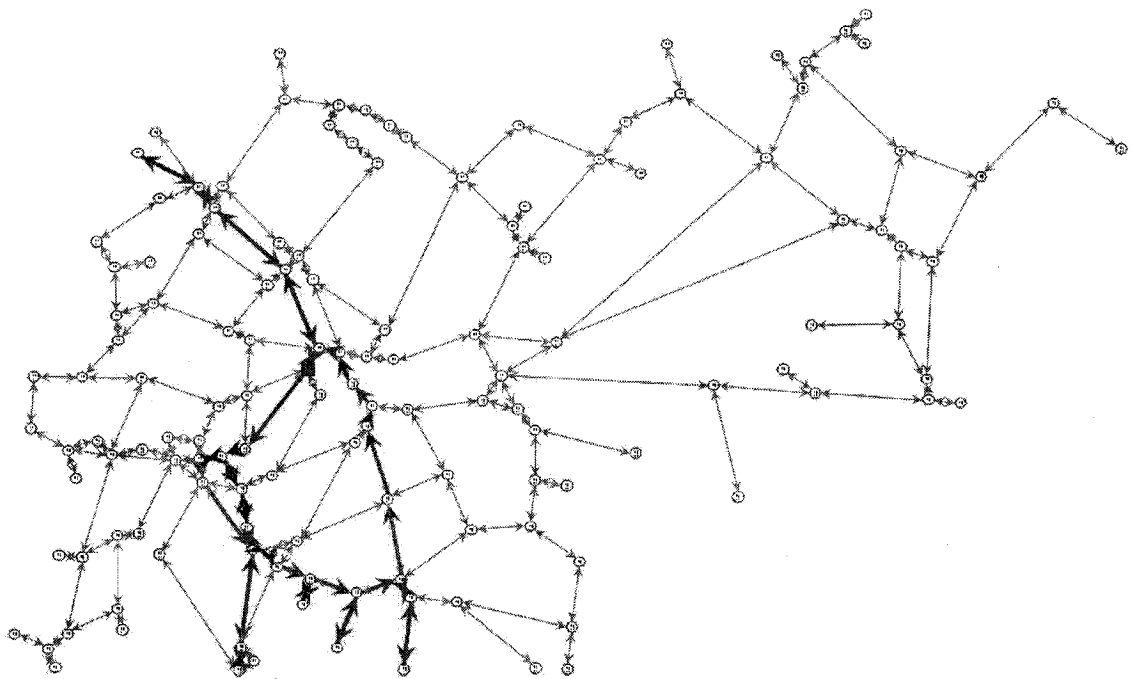


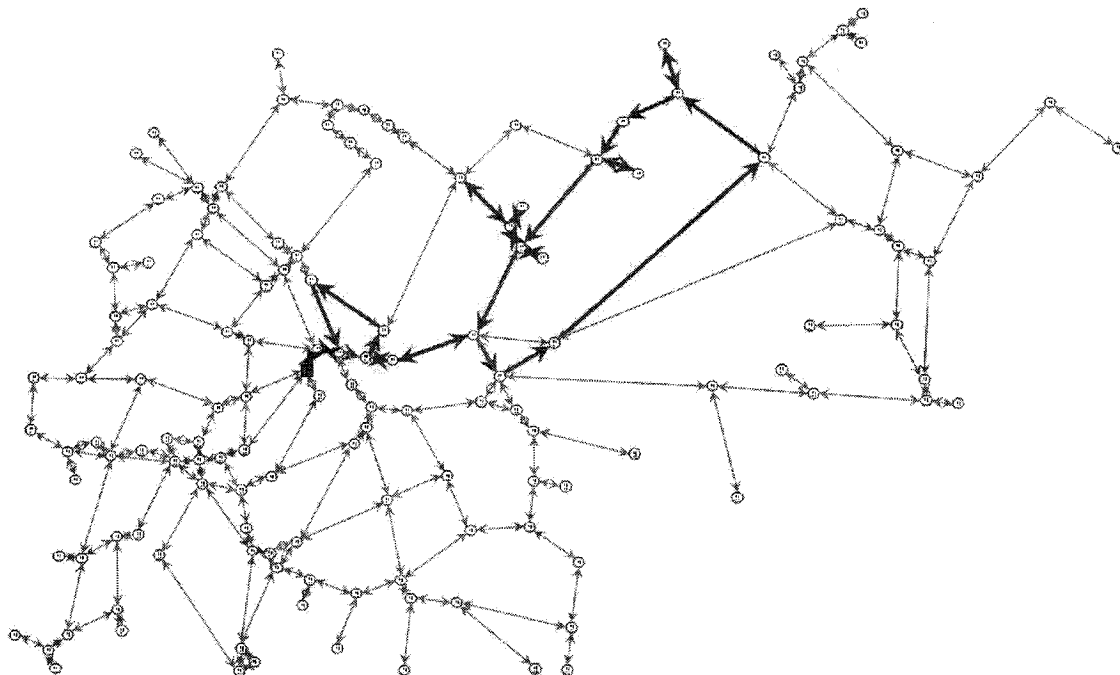
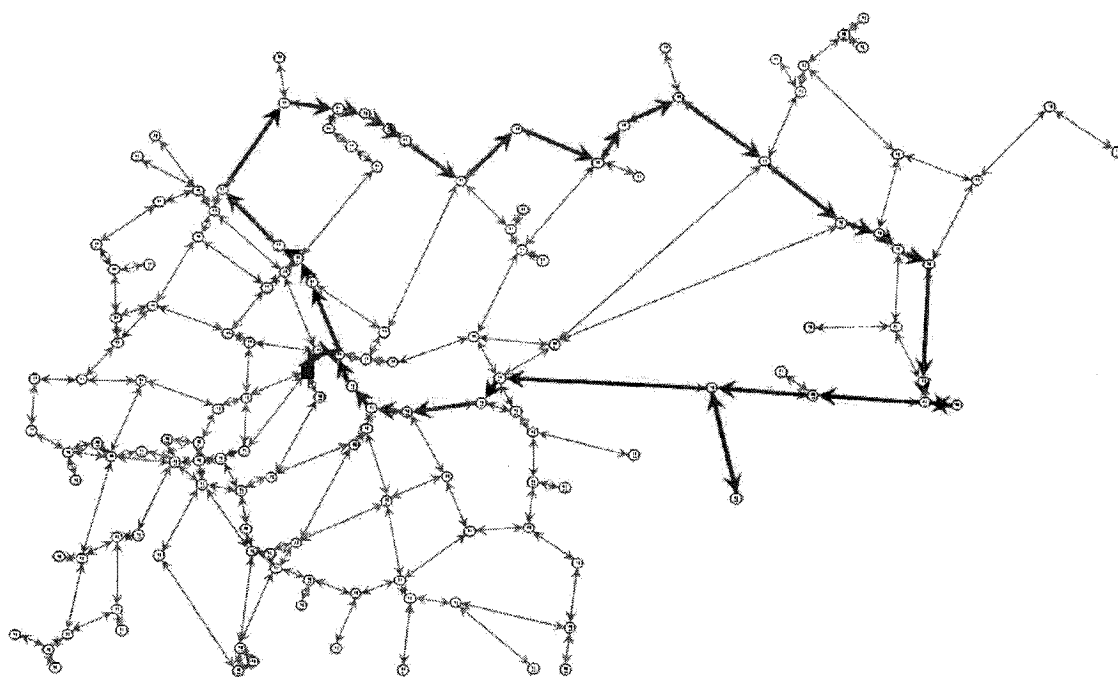
B-1: Circuit 1

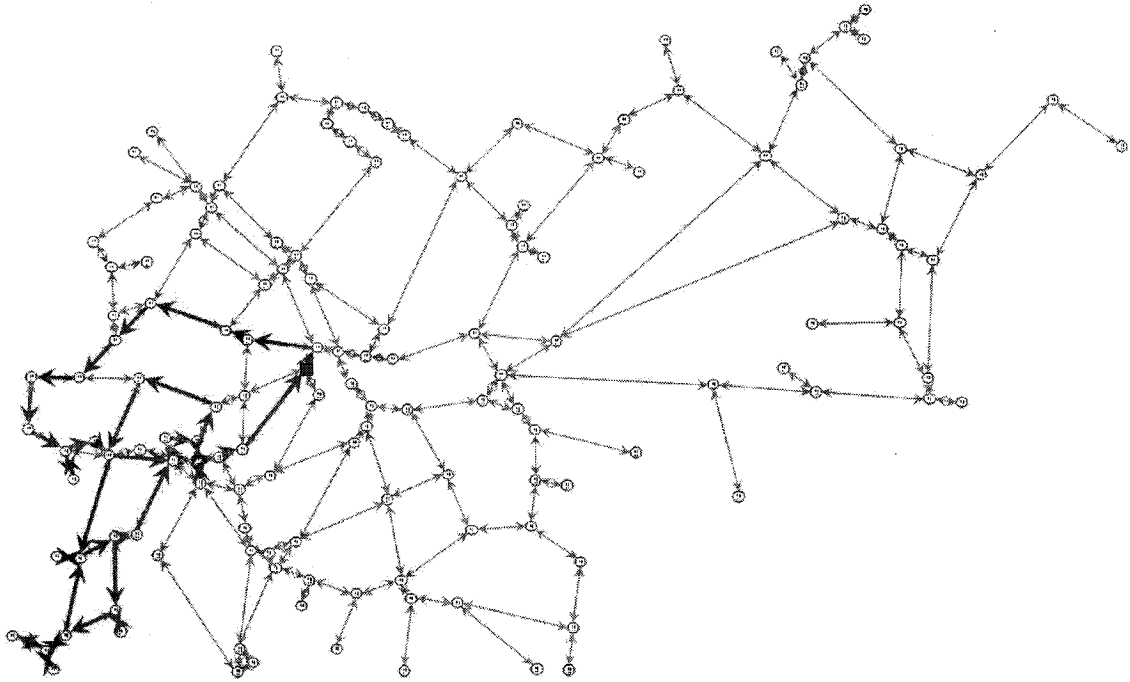
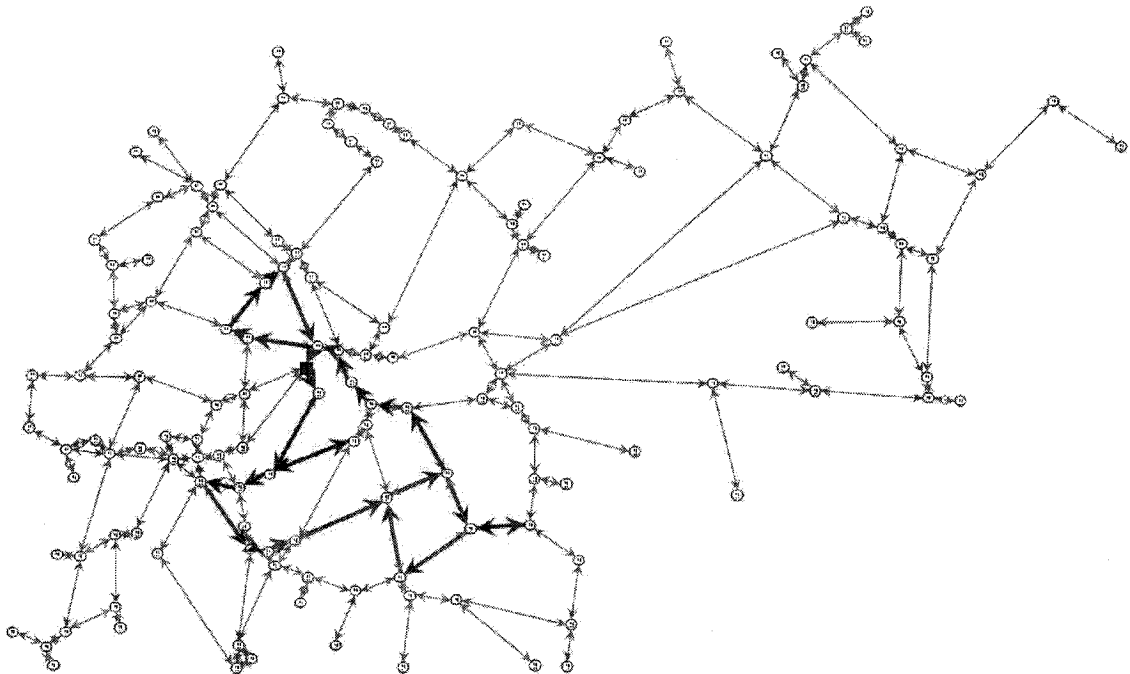


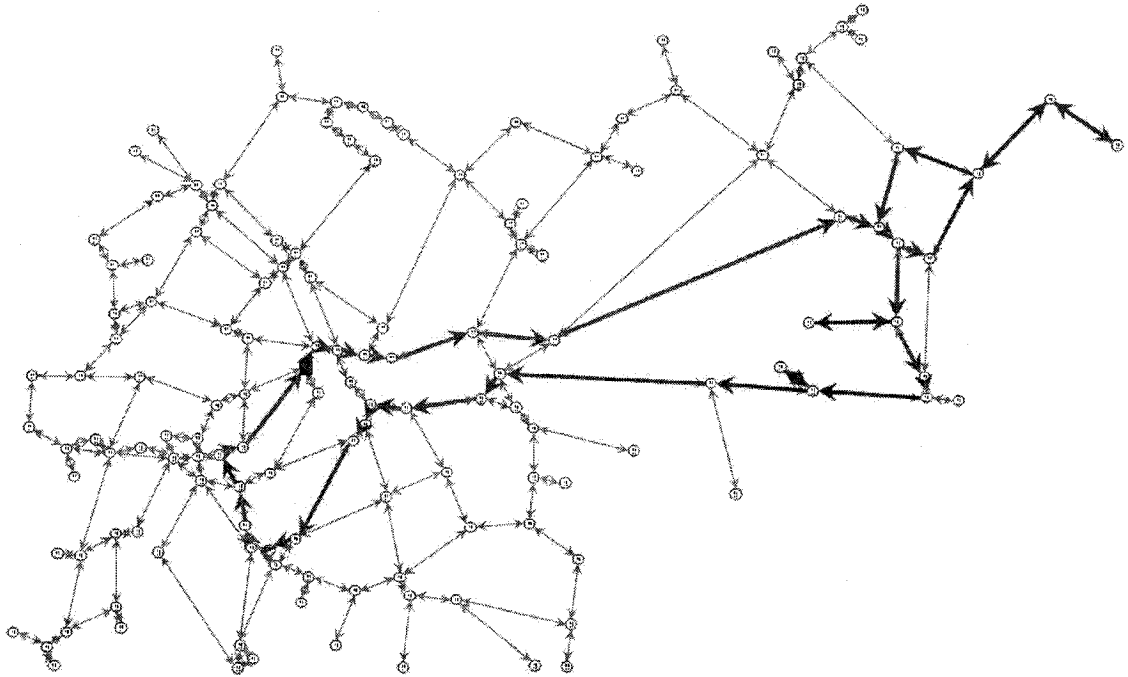
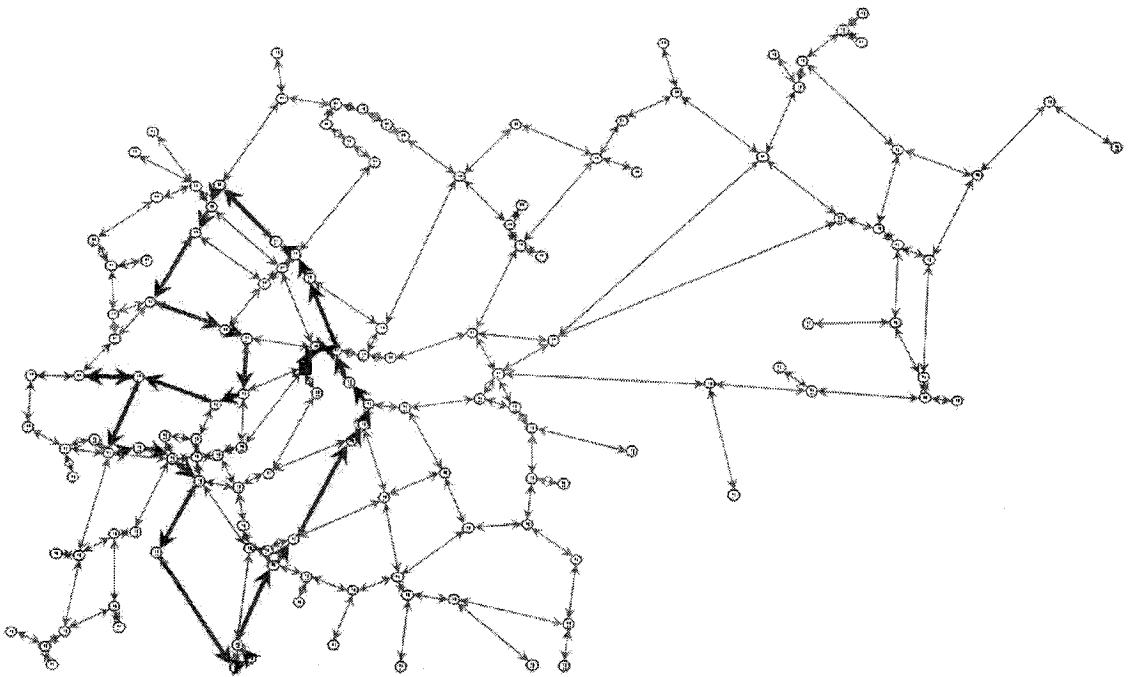
B-2: Circuit 2

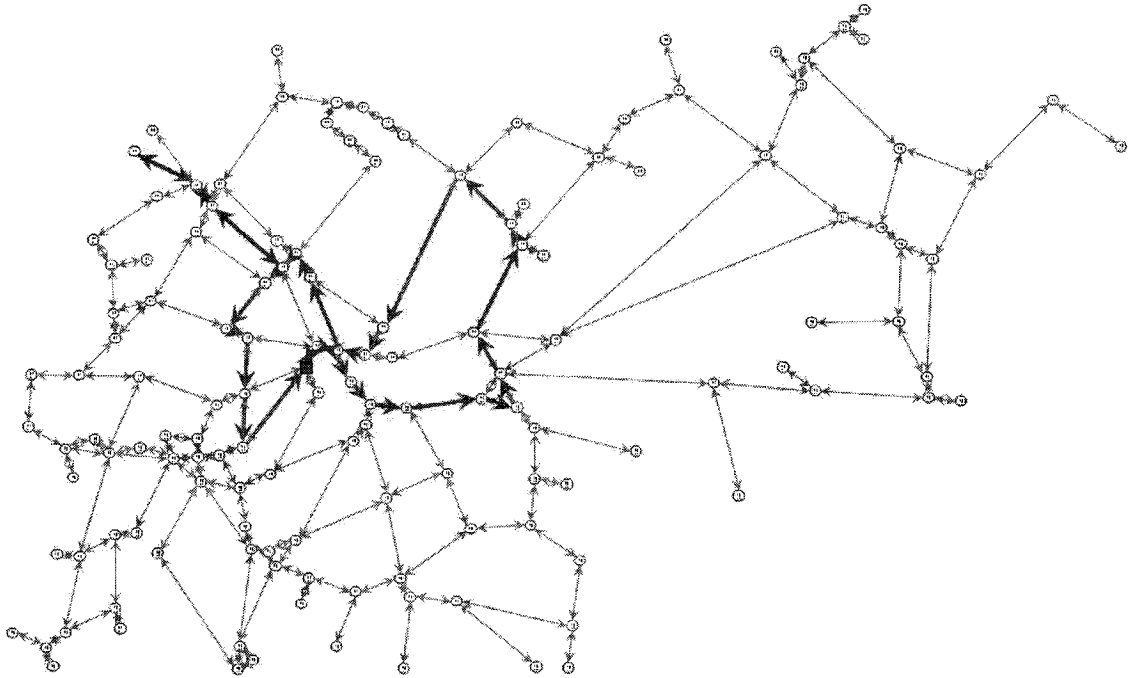
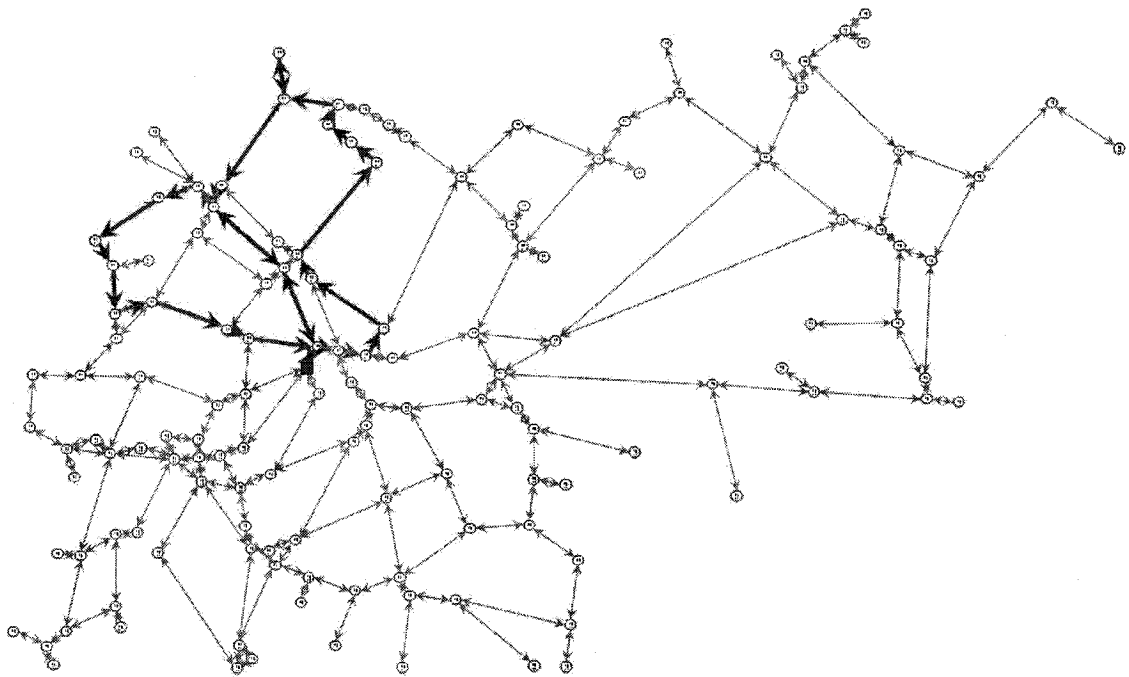
**B-3: Circuit 3****B-4: Circuit 4**

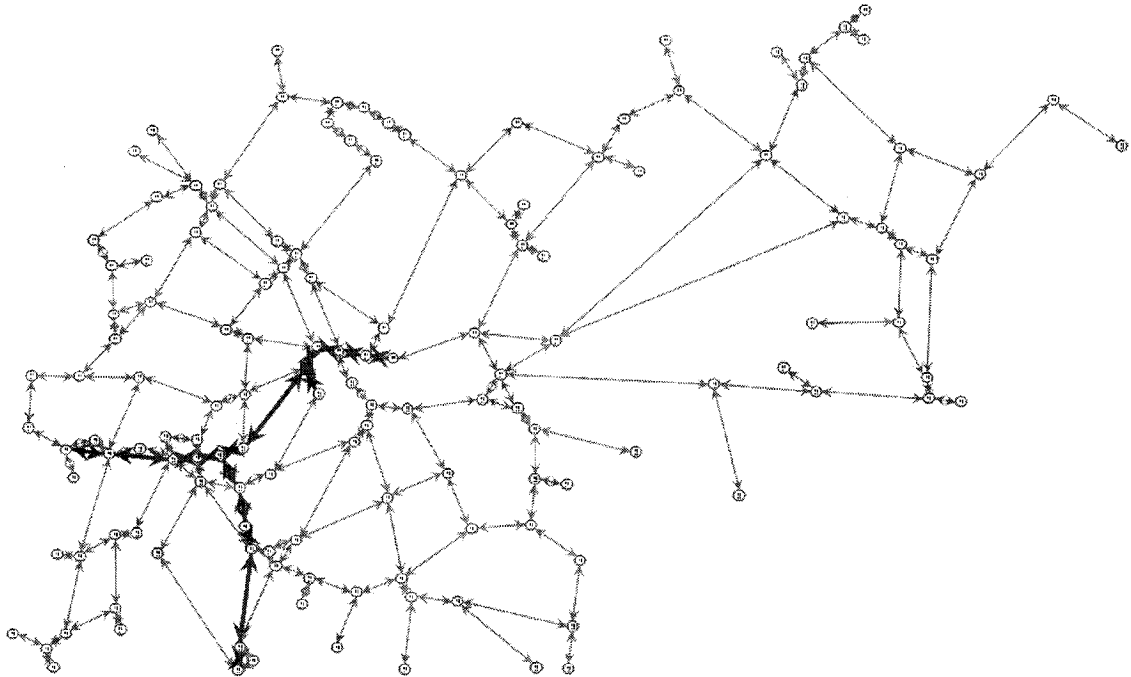
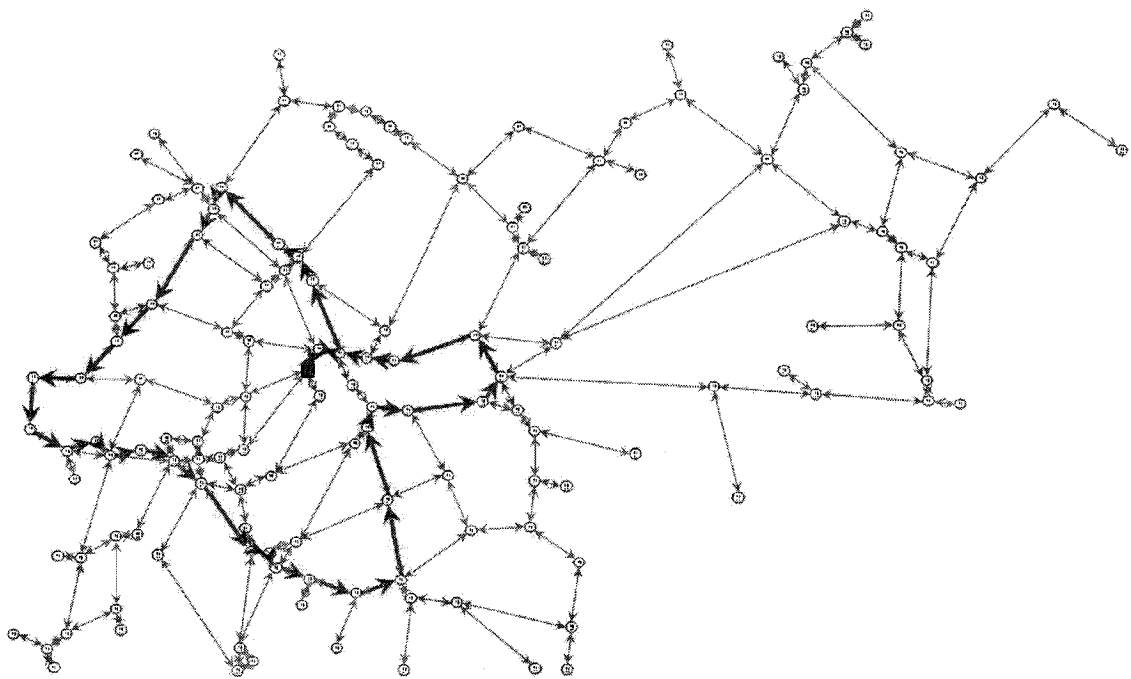
**B-5: Circuit 5****B-6: Circuit 6**

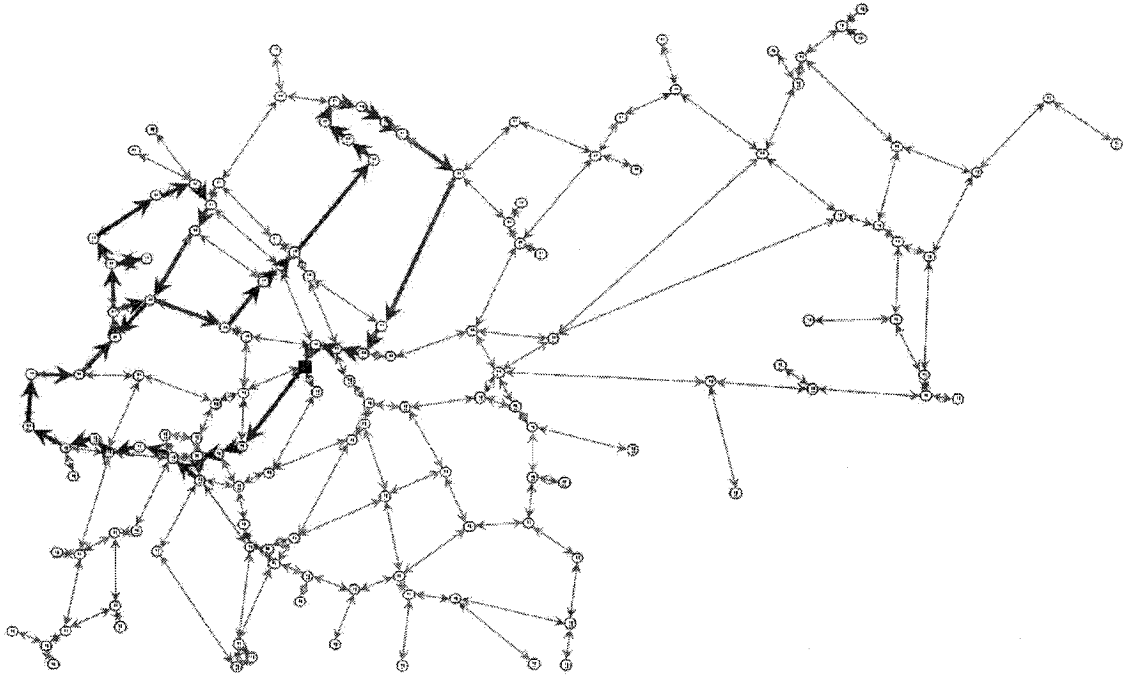
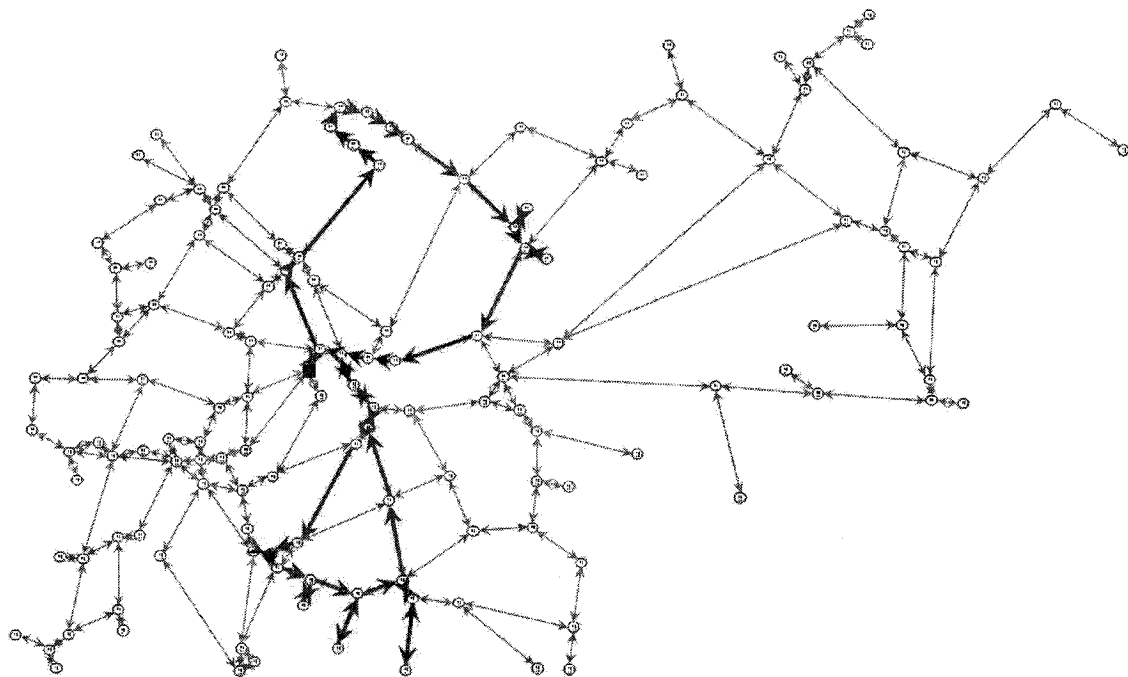
**B-7: Circuit 7****B-8: Circuit 8**

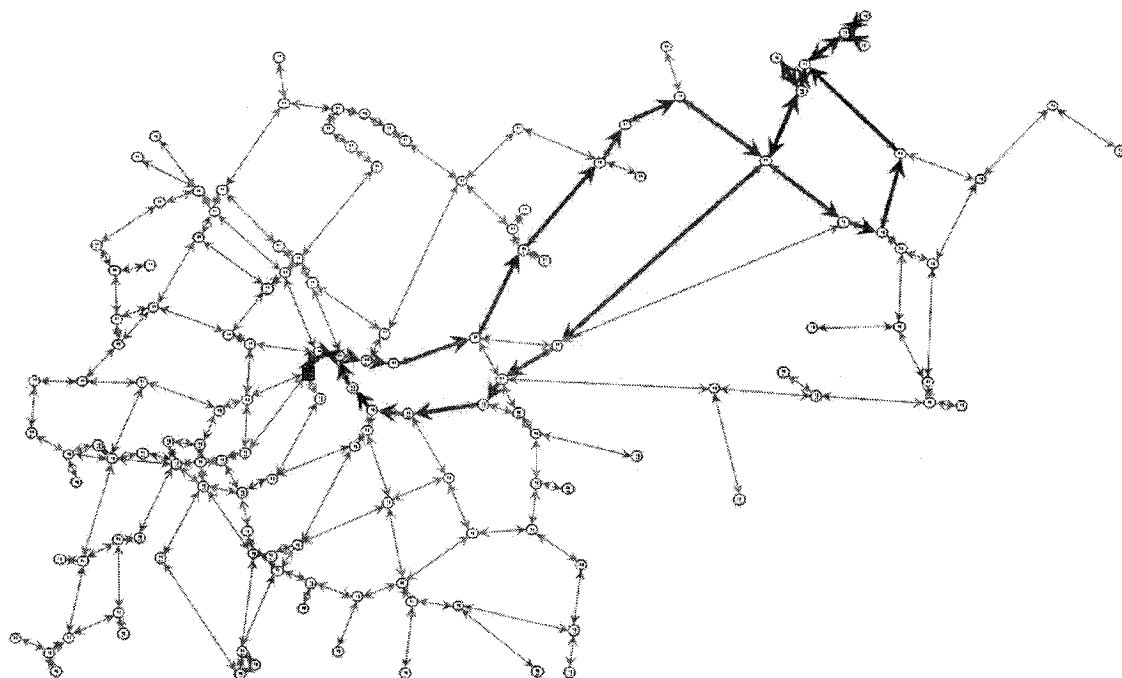
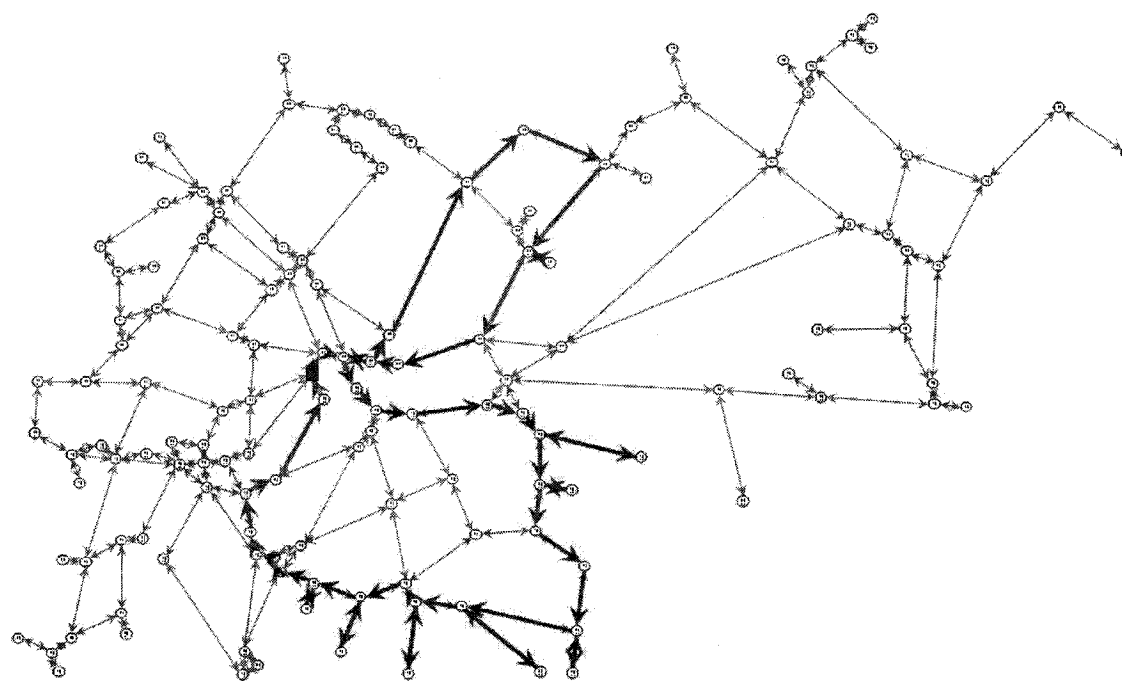
**B-9: Circuit 9****B-10: Circuit 10**

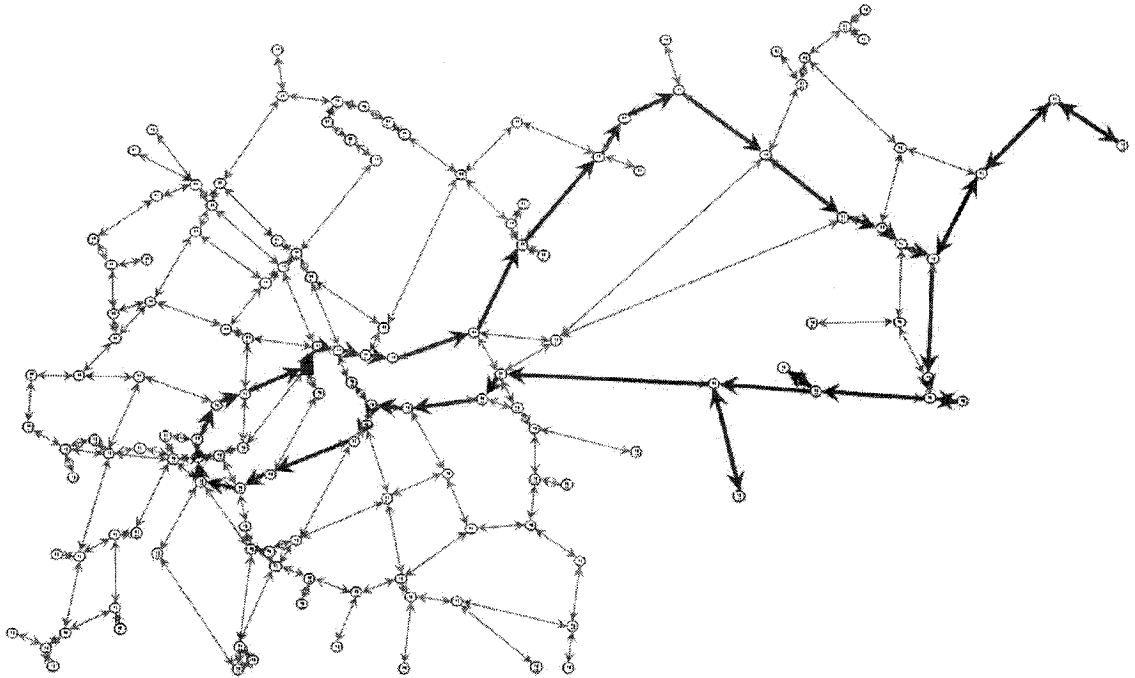
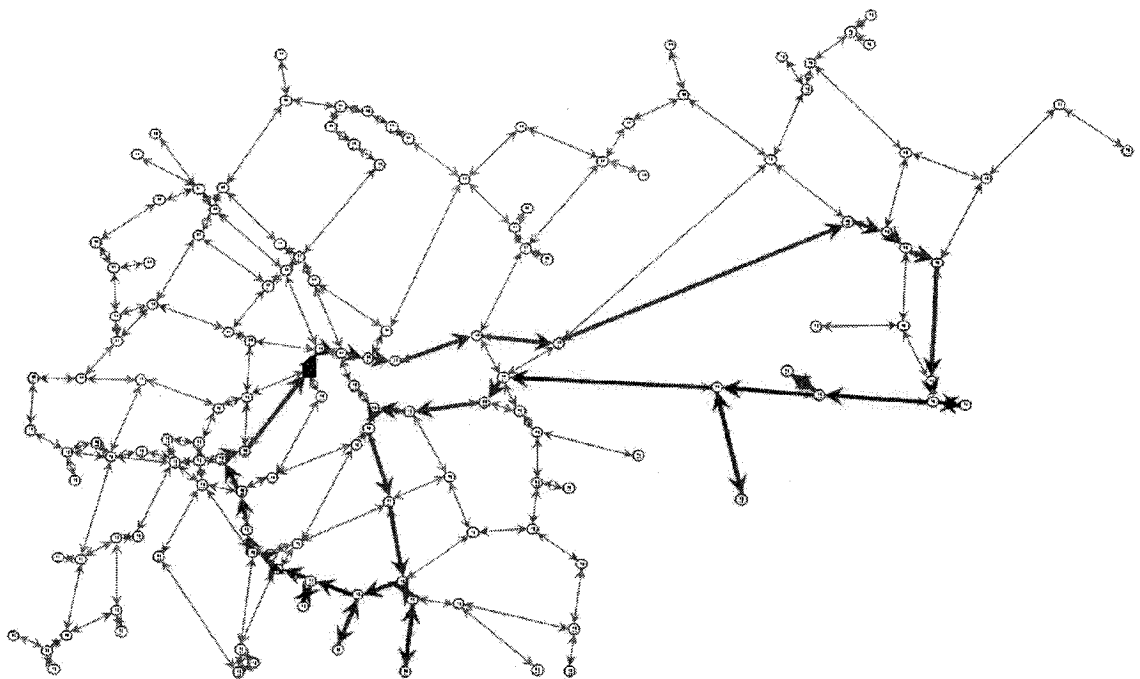
**B-11: Circuit 11****B-12: Circuit 12**

**B-13: Circuit 13****B-14: Circuit 14**

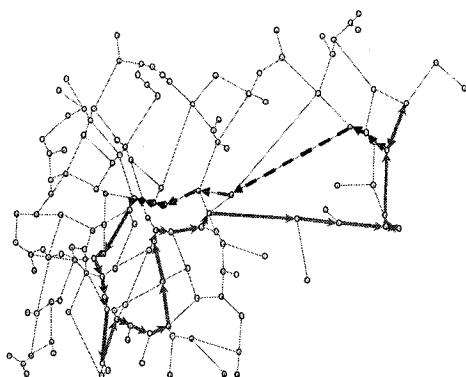
**B-15: Circuit 15****B-16: Circuit 16**

**B-17: Circuit 17****B-18: Circuit 18**

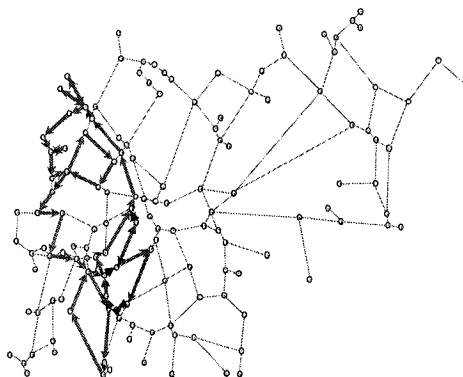
**B-19: Circuit 19****B-20: Circuit 20**

**B-21: Circuit 21****B-22: Circuit 22**

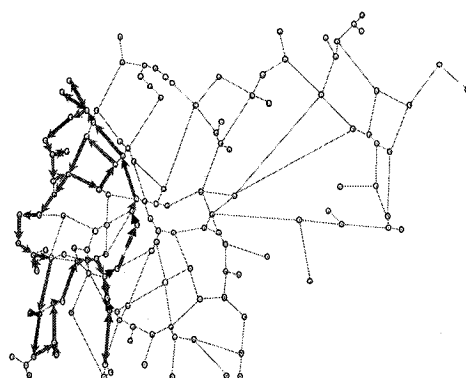
ANNEXE C - CIRCUITS CONSTRUITS – SITUATION INITIALE



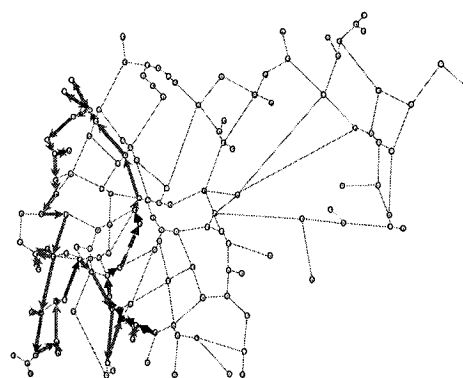
Scénario - Horizon 1



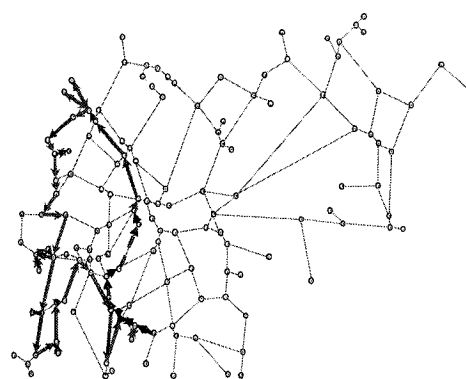
Scénario - Horizon 3



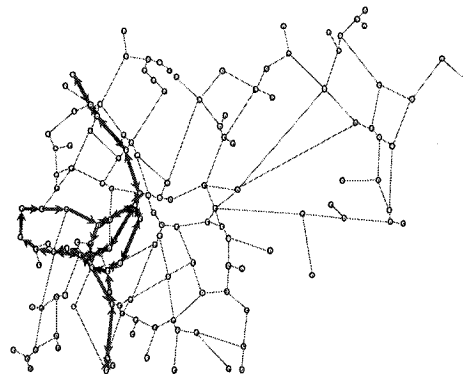
Scénario - Horizon 6



Scénario - Horizon 12

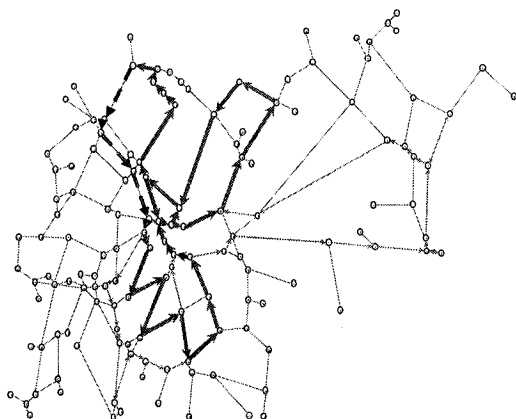


Scénario - Horizon 15

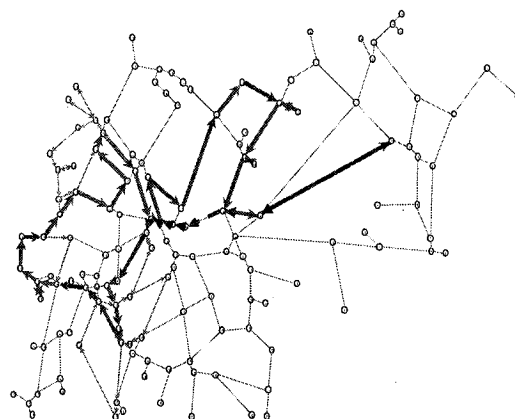


Scénario - PTAC

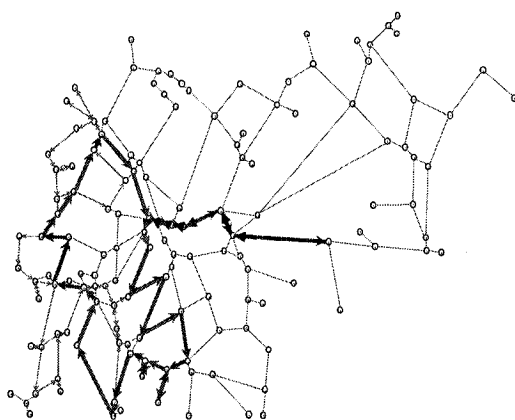
C-1: Comparaison tournée 1 des différents scénarios



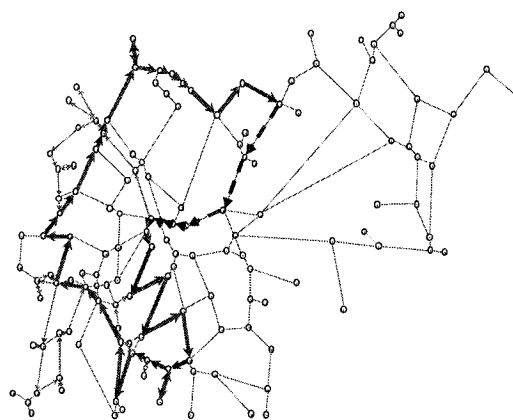
Scénario - Horizon 1



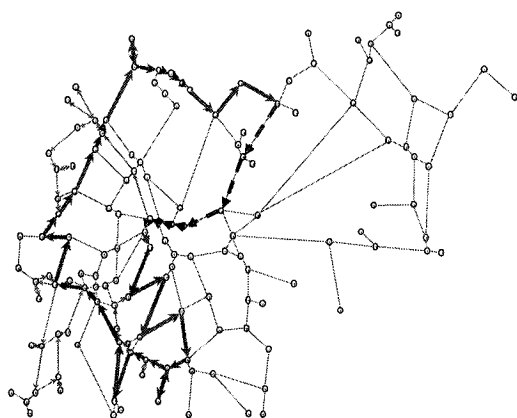
Scénario - Horizon 3



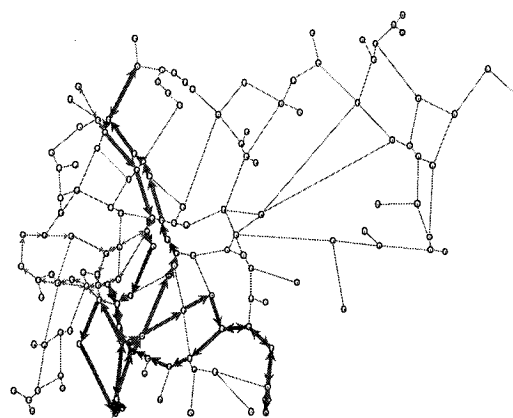
Scénario - Horizon 6



Scénario - Horizon 12

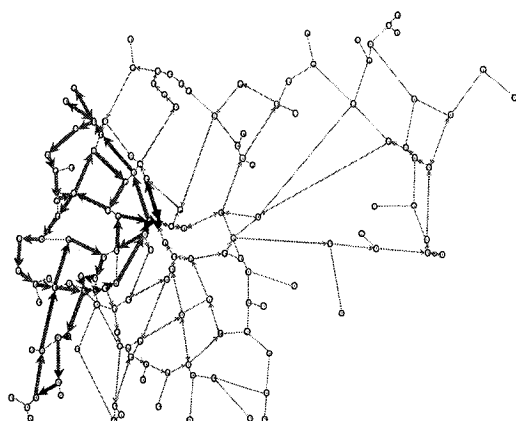


Scénario - Horizon 15

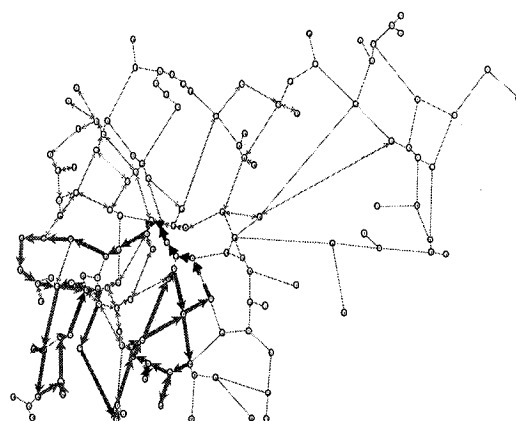


Scénario - PTAC

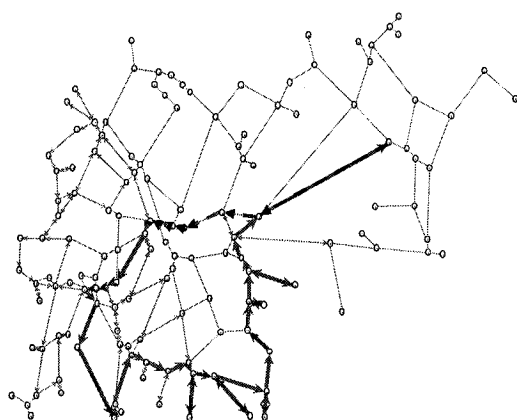
C-2: Comparaison tournée 2 des différents scénarios



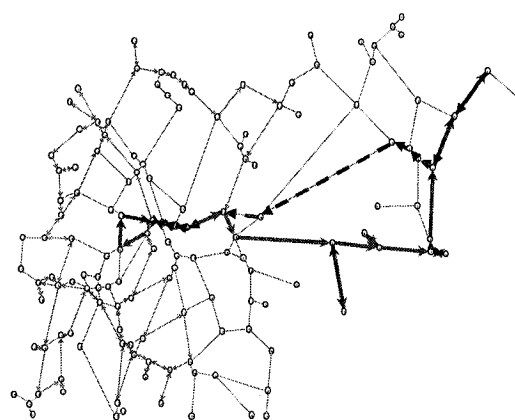
Scénario - Horizon 1



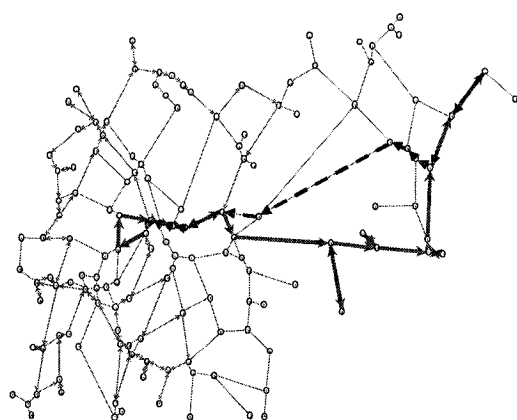
Scénario - Horizon 3



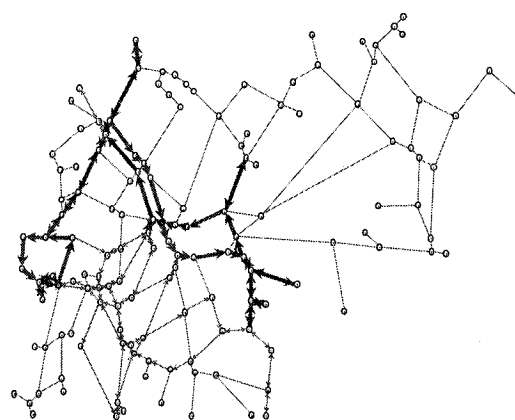
Scénario - Horizon 6



Scénario - Horizon 12

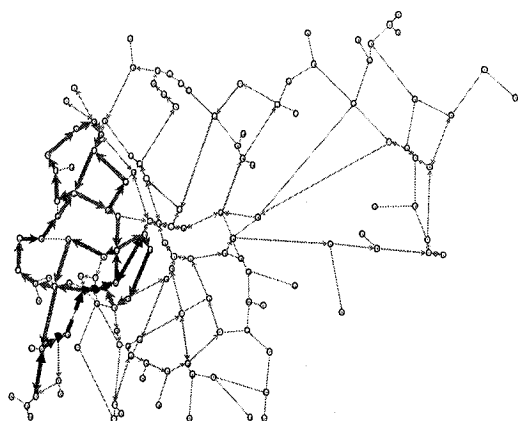


Scénario - Horizon 15

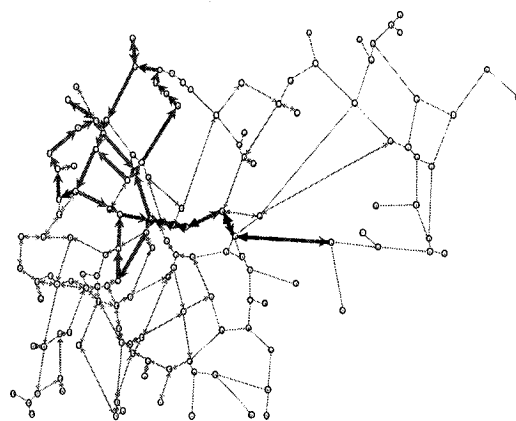


Scénario - PTAC

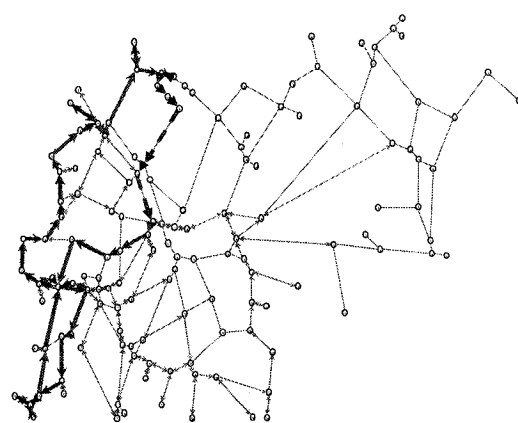
C-3: Comparaison tournée 3 des différents scénarios



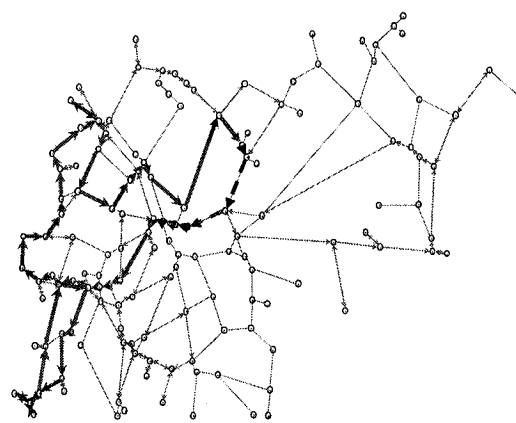
Scénario - Horizon 1



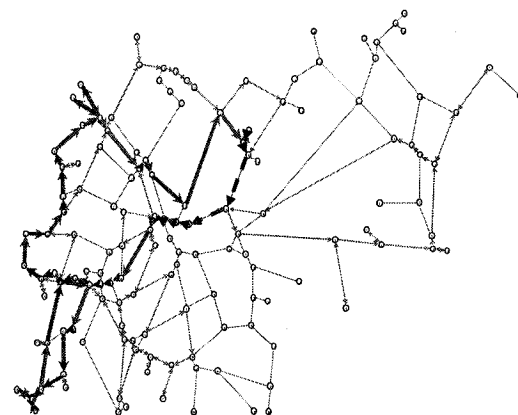
Scénario - Horizon 3



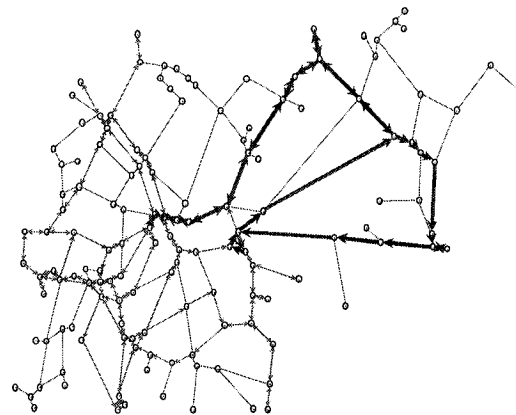
Scénario - Horizon 6



Scénario - Horizon 12

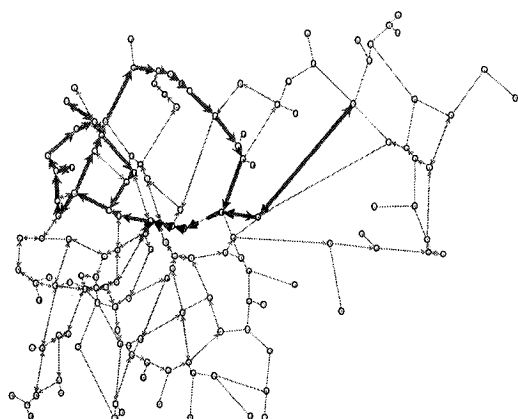


Scénario - Horizon 15

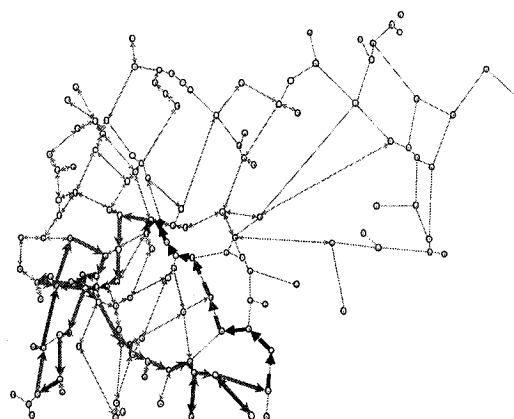


Scénario - PTAC

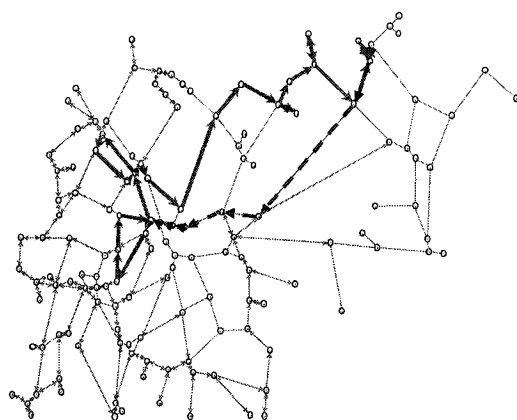
C-4: Comparaison tournée 4 des différents scénarios



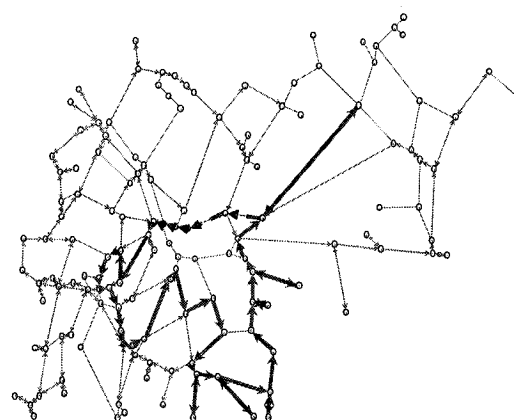
Scénario - Horizon 1



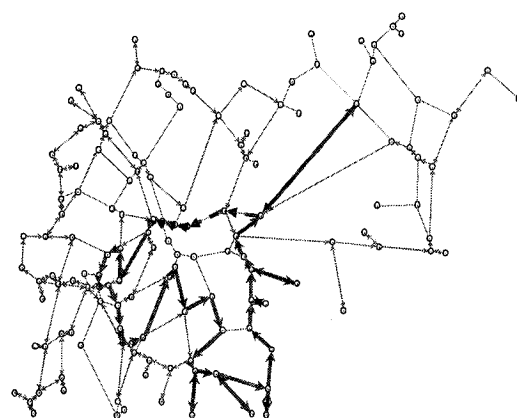
Scénario - Horizon 3



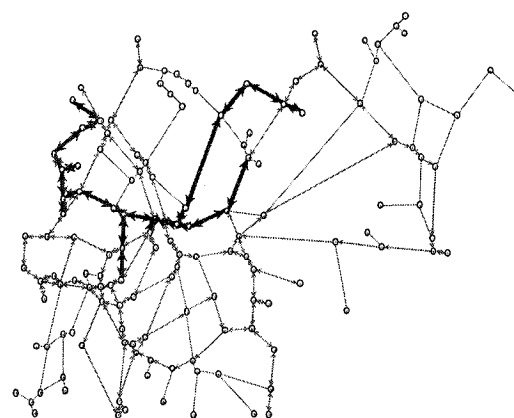
Scénario - Horizon 6



Scénario - Horizon 12

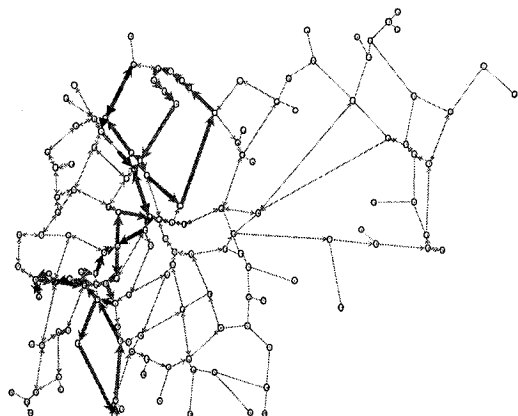


Scénario - Horizon 15

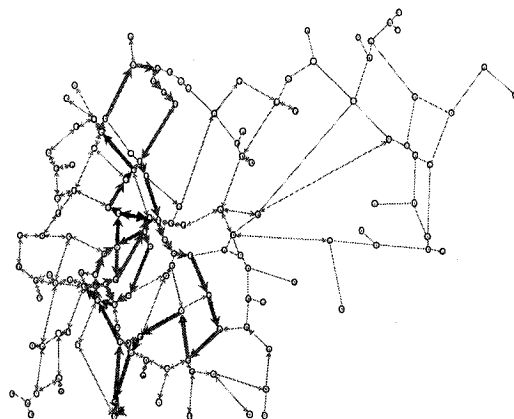


Scénario - PTAC

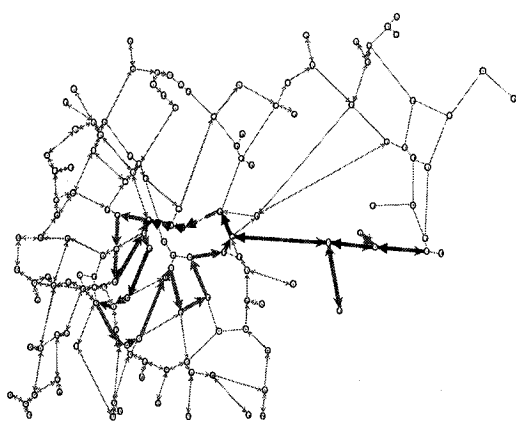
C-5: Comparaison tournée 5 des différents scénarios



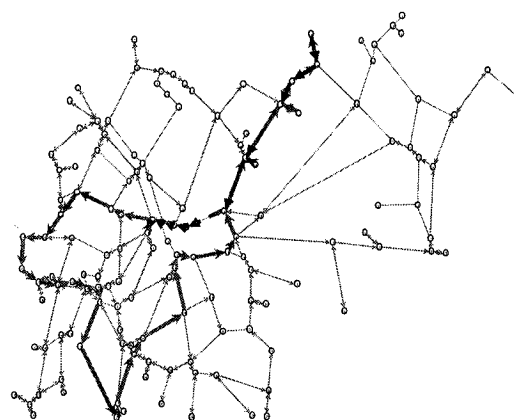
Scénario - Horizon 1



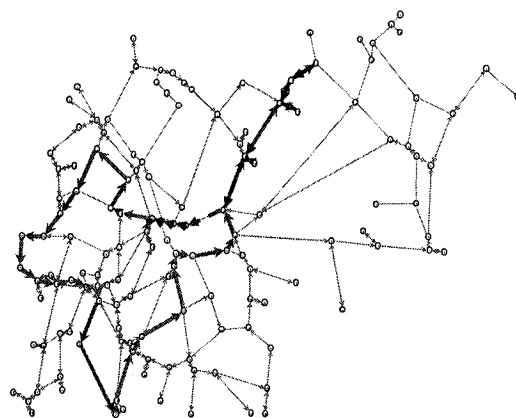
Scénario - Horizon 3



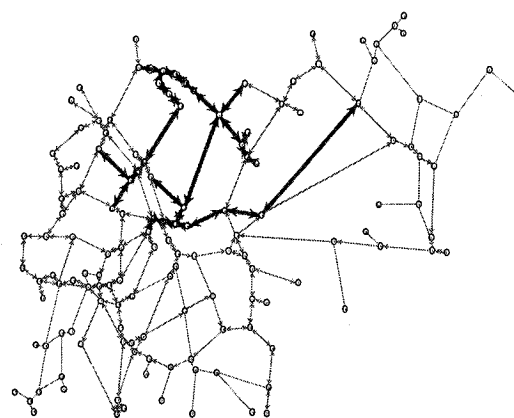
Scénario - Horizon 6



Scénario - Horizon 12

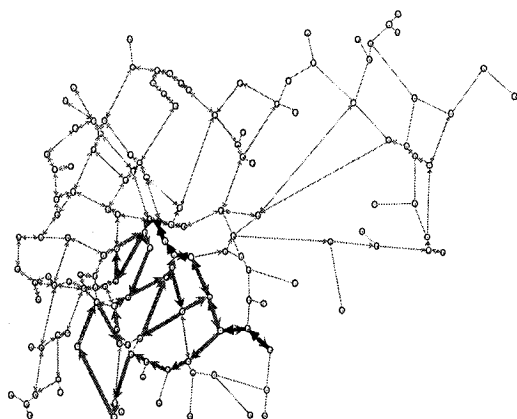


Scénario - Horizon 15

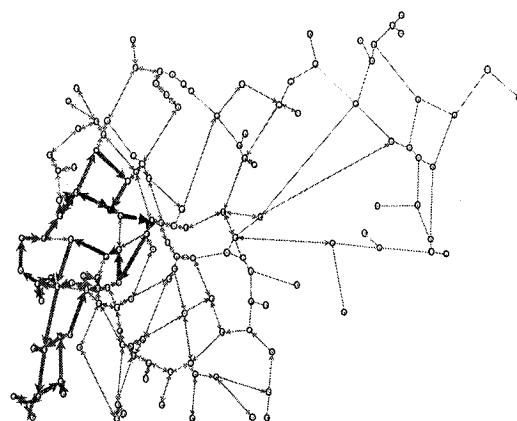


Scénario - PTAC

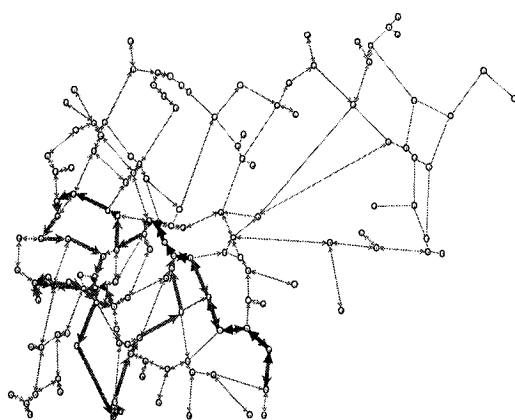
C-6: Comparaison tournée 6 des différents scénarios



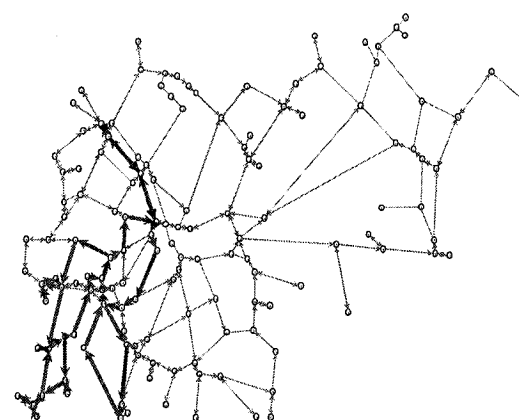
Scénario - Horizon 1



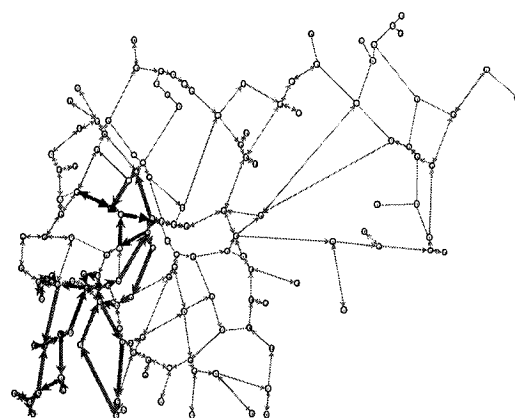
Scénario - Horizon 3



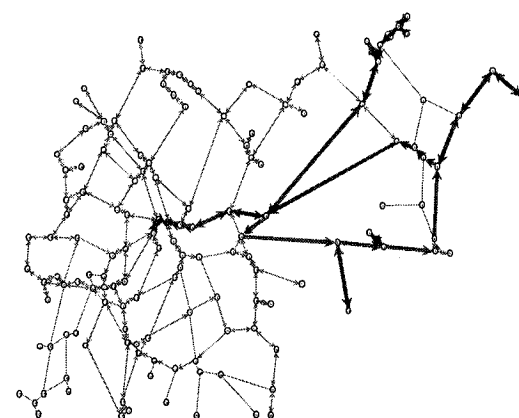
Scénario - Horizon 6



Scénario - Horizon 12

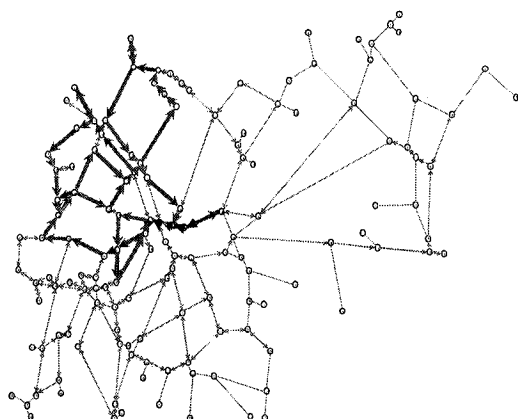
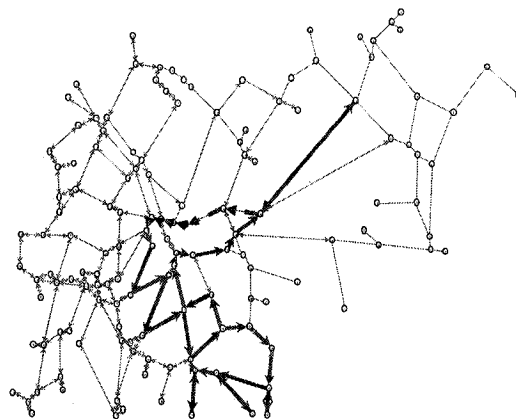
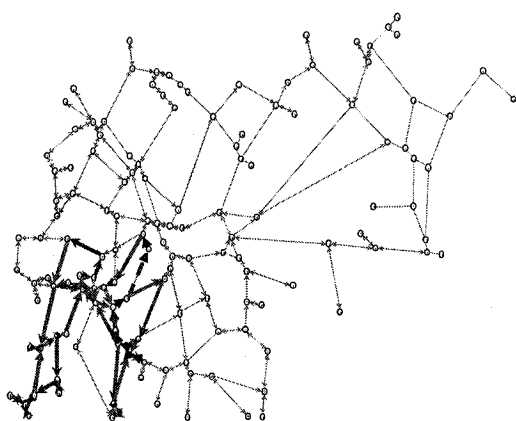
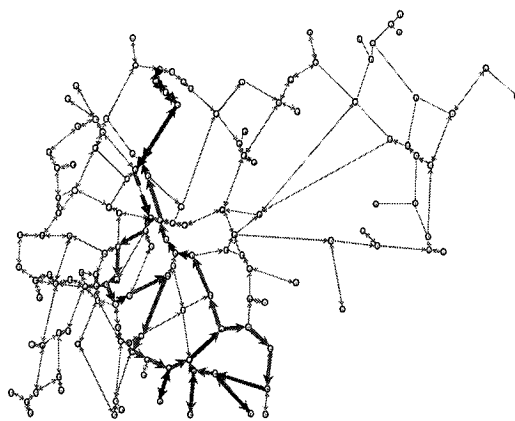
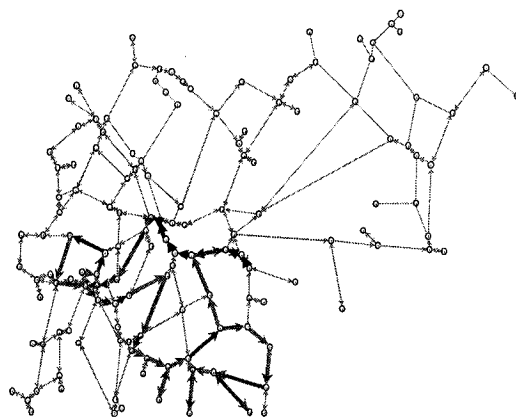
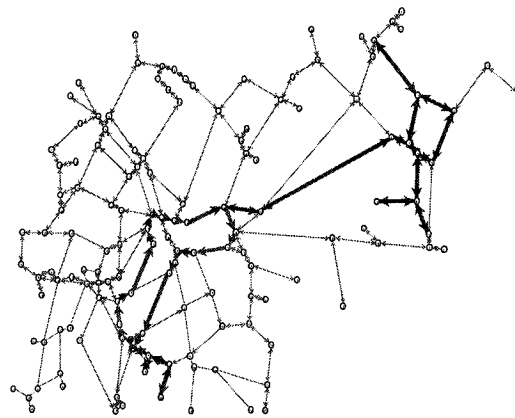


Scénario - Horizon 15

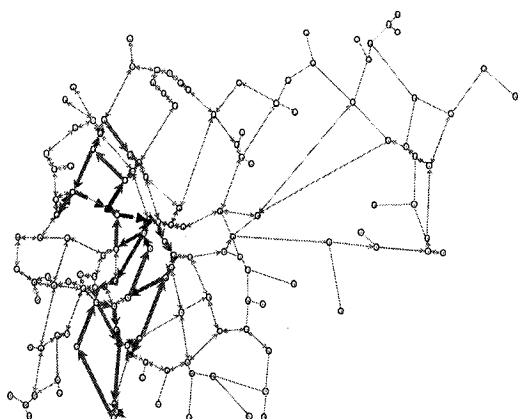


Scénario - PTAC

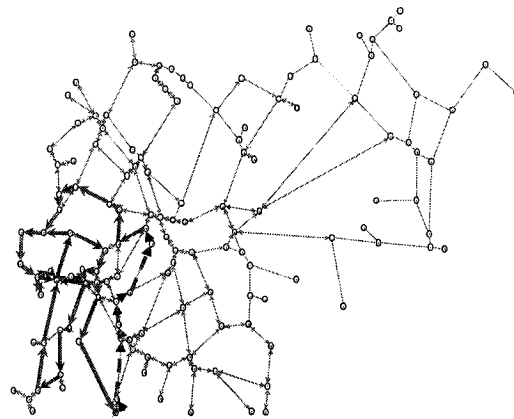
C-7: Comparaison tournée 7 des différents scénarios

**Scénario - Horizon 1****Scénario - Horizon 3****Scénario - Horizon 6****Scénario - Horizon 12****Scénario - Horizon 15****Scénario - PTAC**

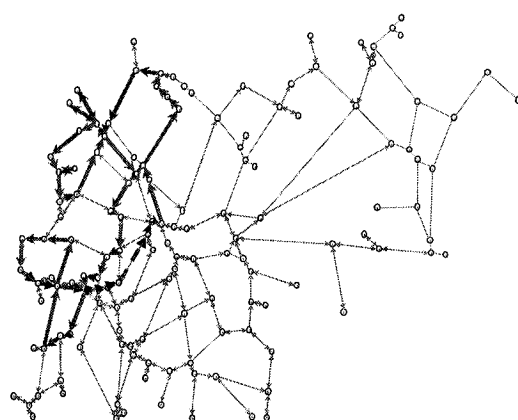
C-8: Comparaison tournée 8 des différents scénarios



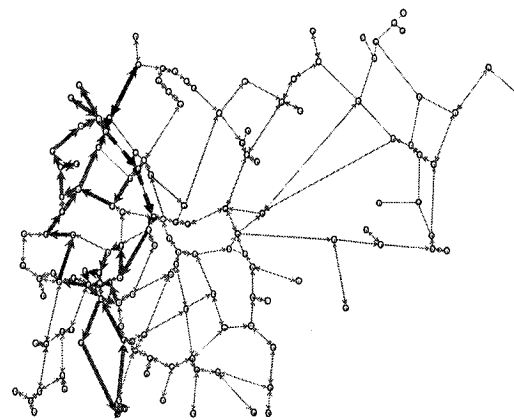
Scénario - Horizon 1



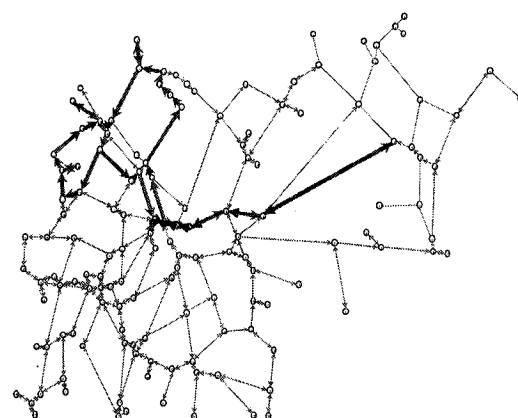
Scénario - Horizon 3



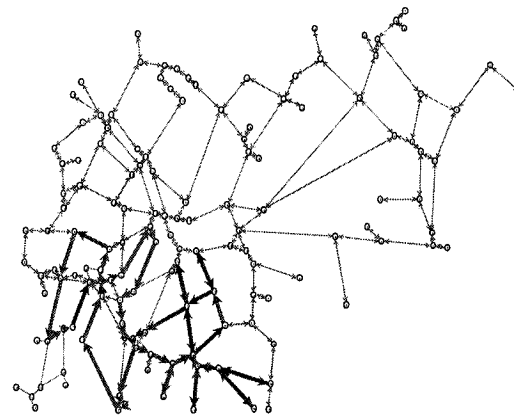
Scénario - Horizon 6



Scénario - Horizon 12

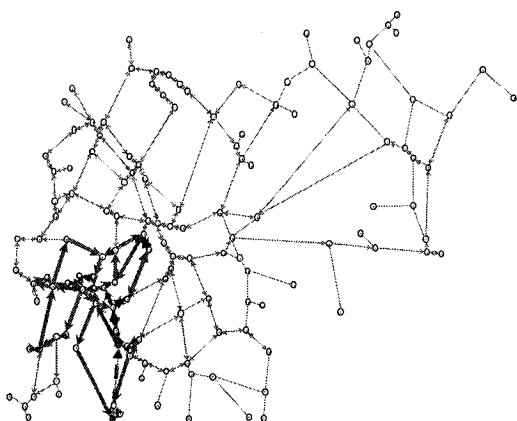


Scénario - Horizon 15

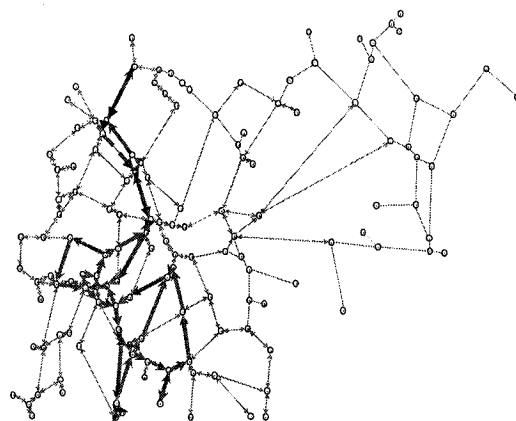


Scénario - PTAC

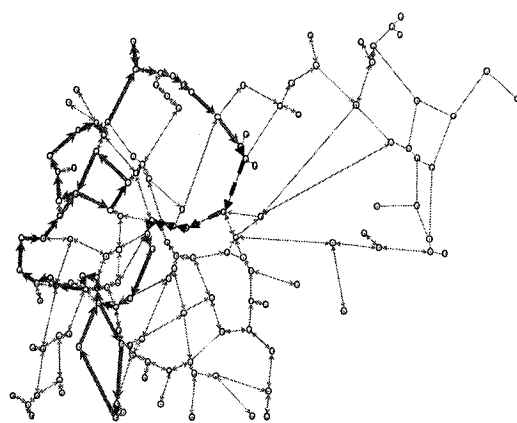
C-9: Comparaison tournée 9 des différents scénarios



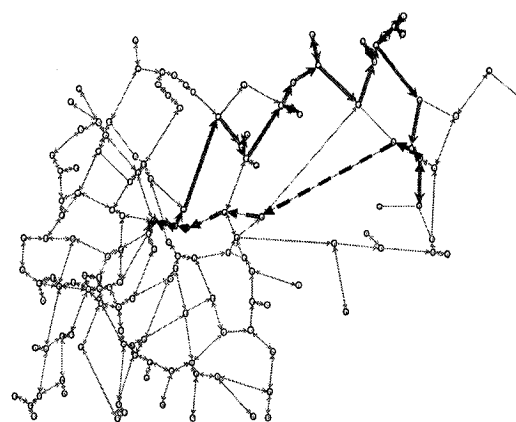
Scénario - Horizon 1



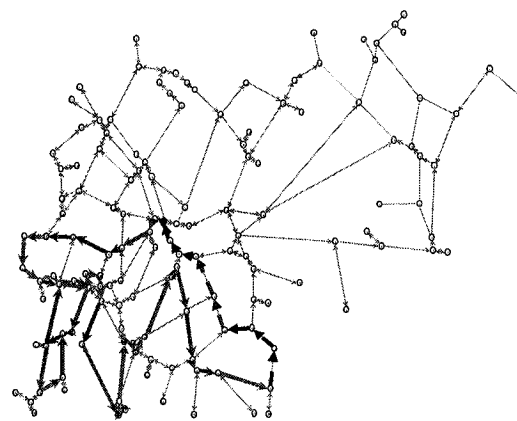
Scénario - Horizon 3



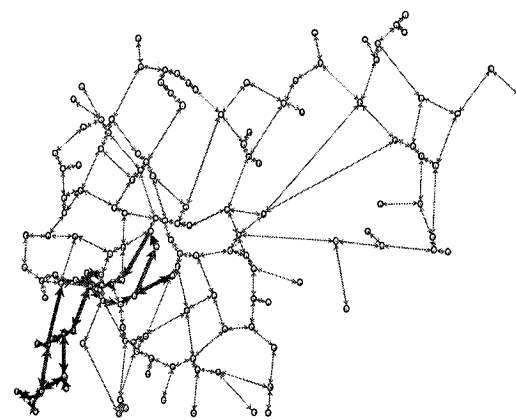
Scénario - Horizon 6



Scénario - Horizon 12

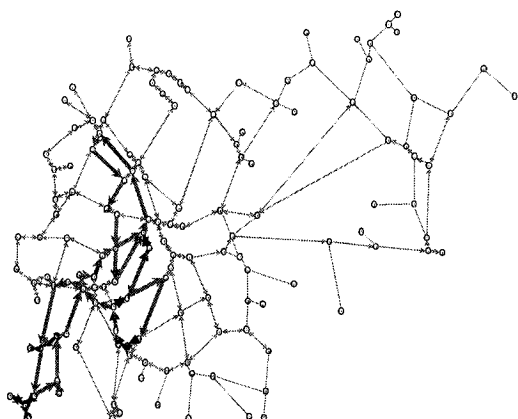


Scénario - Horizon 15

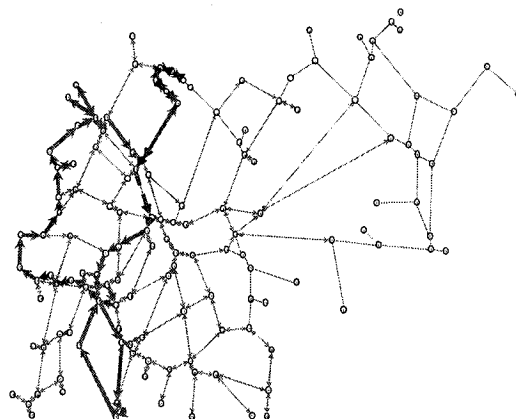


Scénario - PTAC

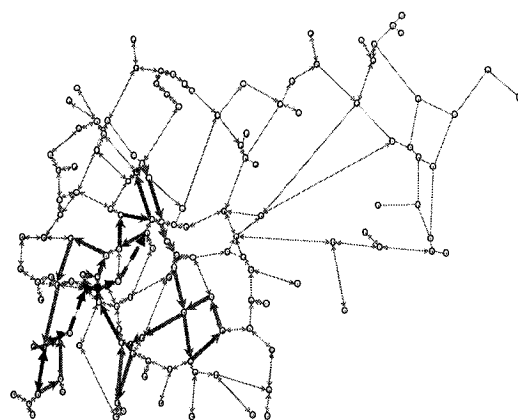
C-10: Comparaison tournée 10 des différents scénarios



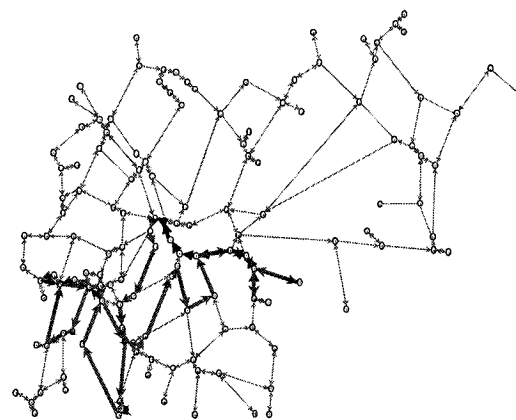
Scénario - Horizon 1



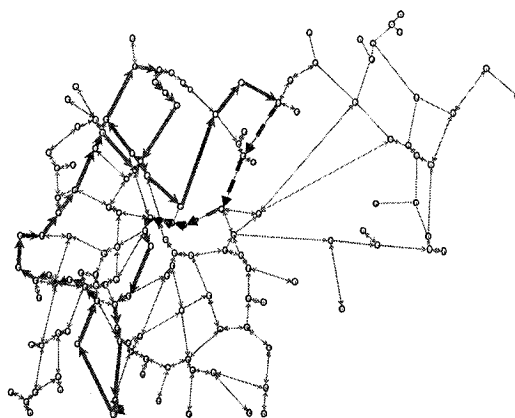
Scénario - Horizon 3



Scénario - Horizon 6

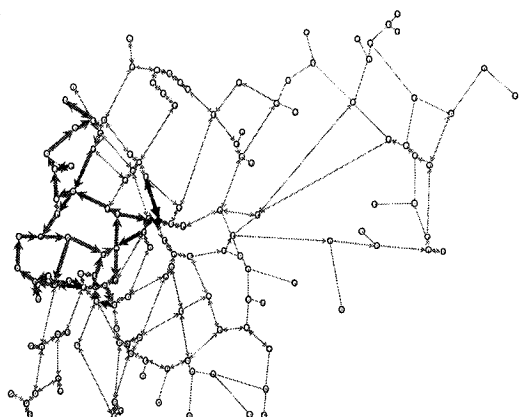


Scénario - Horizon 12

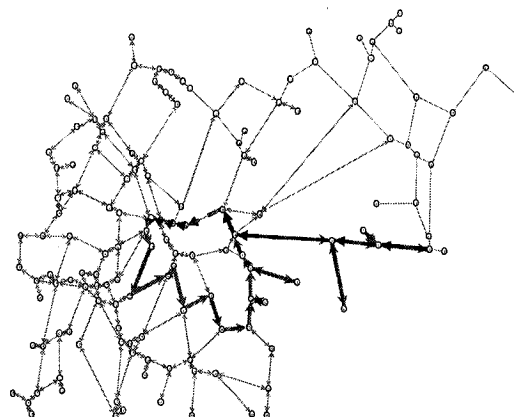


Scénario - Horizon 15

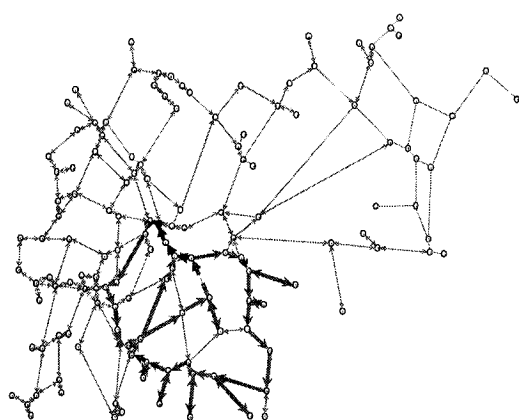
C-11: Comparaison tournée 11 des différents scénarios



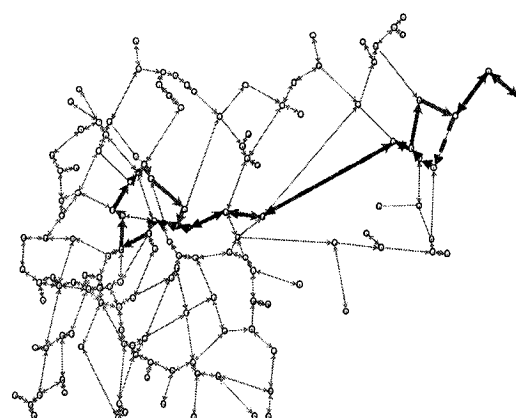
Scénario - Horizon 1



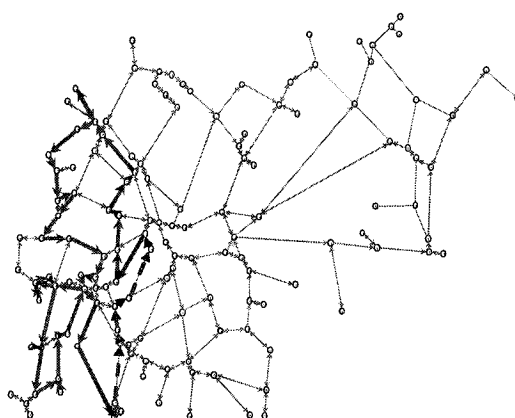
Scénario - Horizon 3



Scénario - Horizon 6

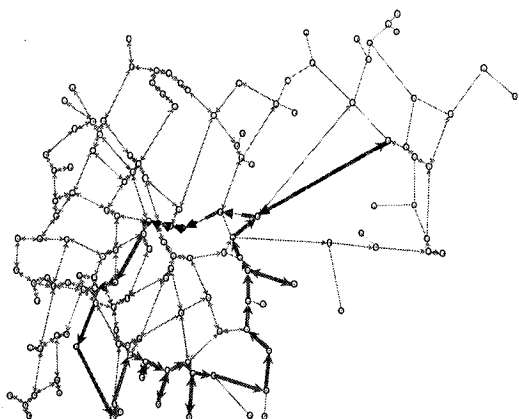


Scénario - Horizon 12

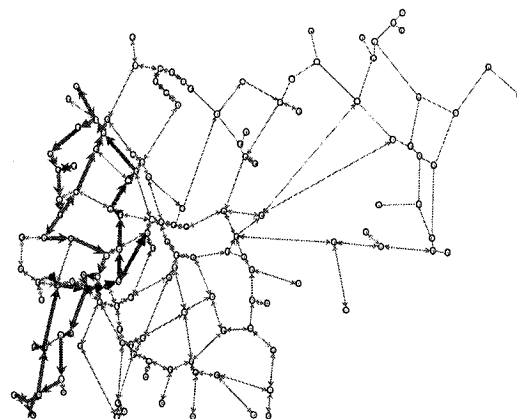


Scénario - Horizon 15

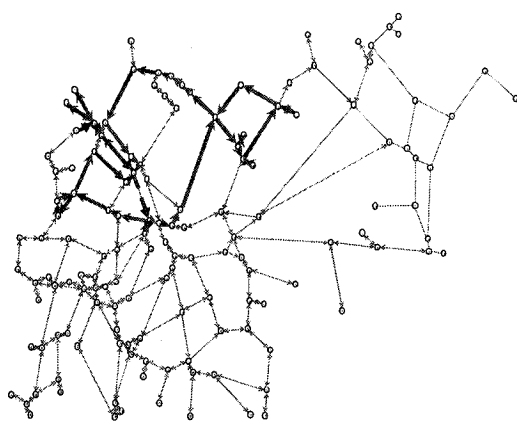
C-12: Comparaison tournée 12 des différents scénarios



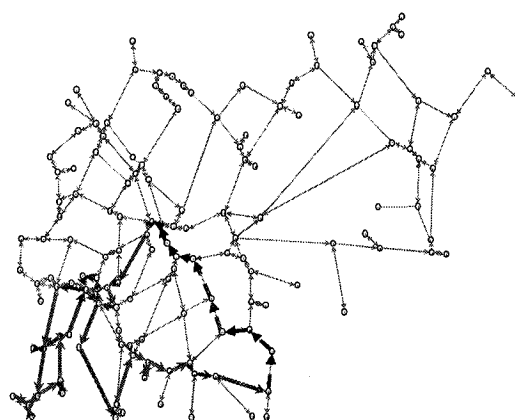
Scénario - Horizon 1



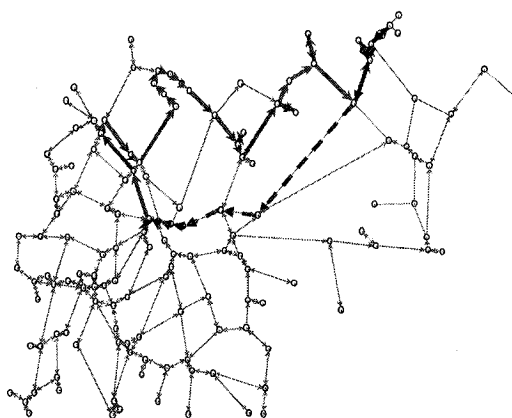
Scénario - Horizon 3



Scénario - Horizon 6

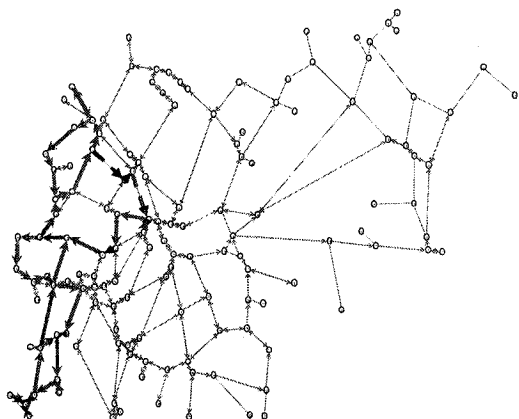


Scénario - Horizon 12

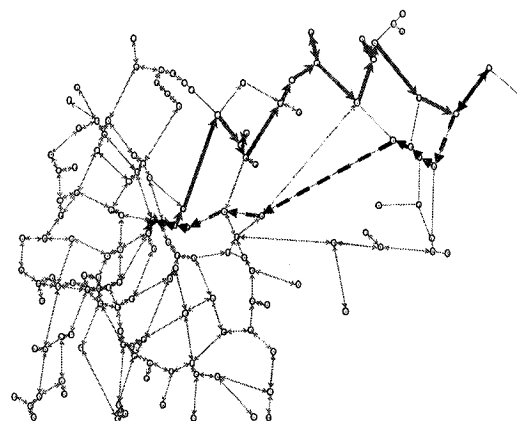


Scénario - Horizon 15

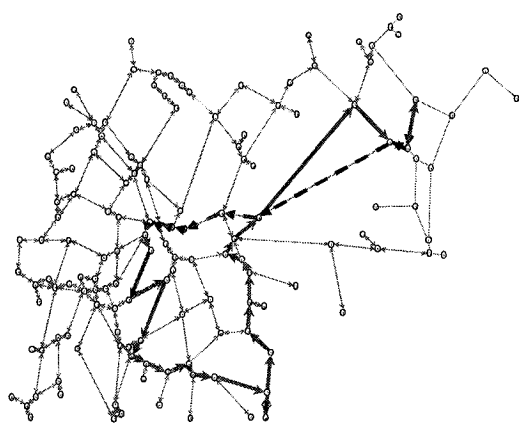
C-13: Comparaison tournée 13 des différents scénarios



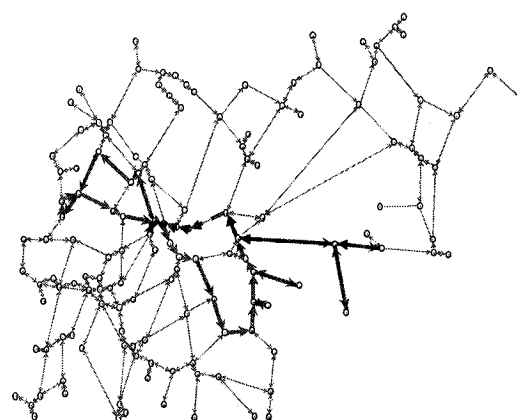
Scénario - Horizon 1



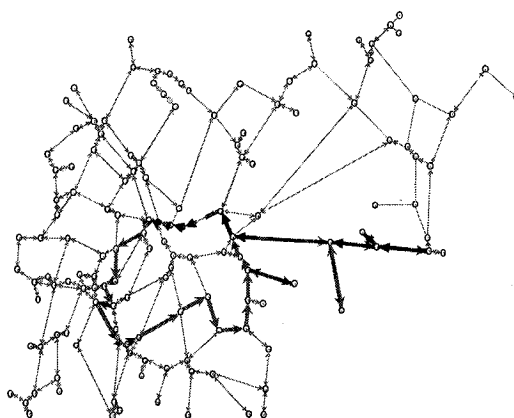
Scénario - Horizon 3



Scénario - Horizon 6

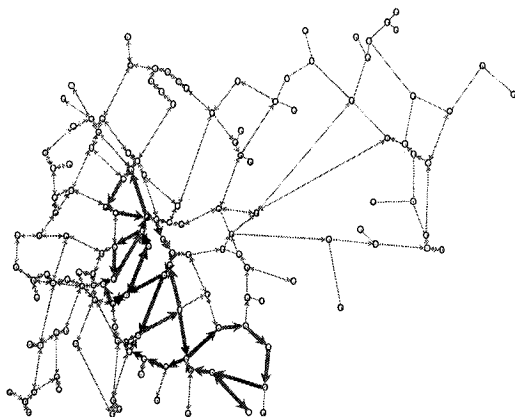


Scénario - Horizon 12

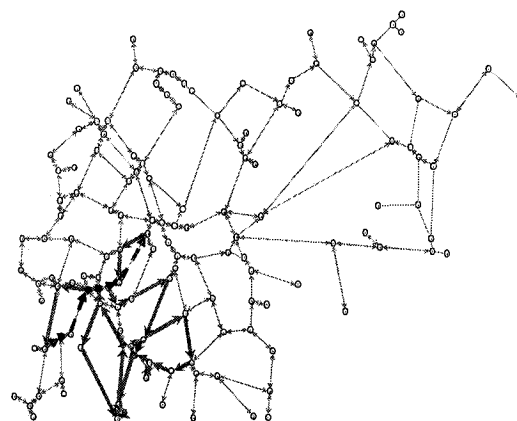


Scénario - Horizon 15

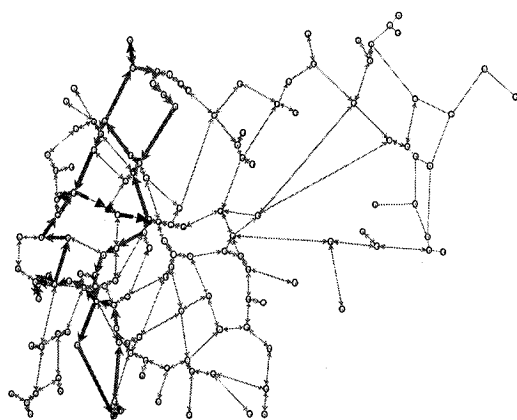
C-14: Comparaison tournée 14 des différents scénarios



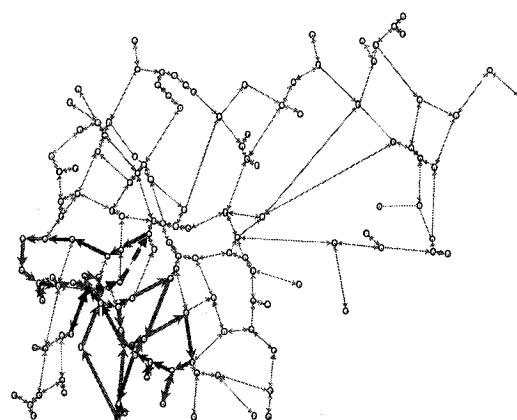
Scénario - Horizon 1



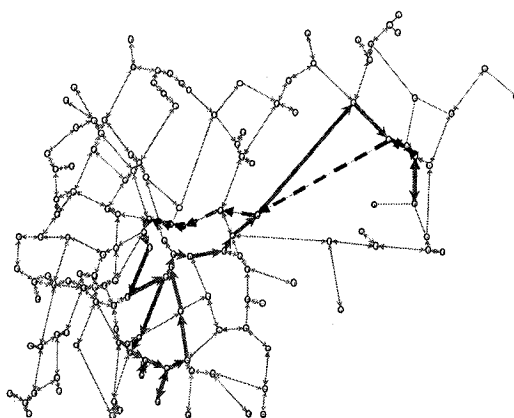
Scénario - Horizon 3



Scénario - Horizon 6

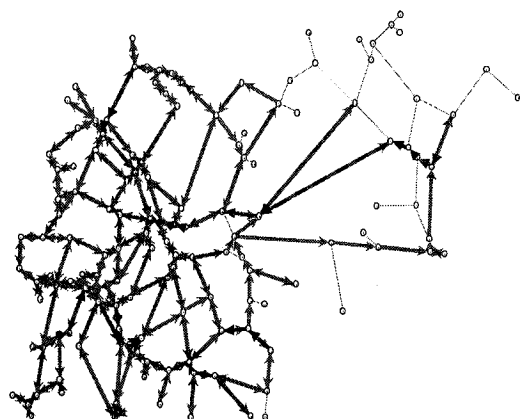


Scénario - Horizon 12

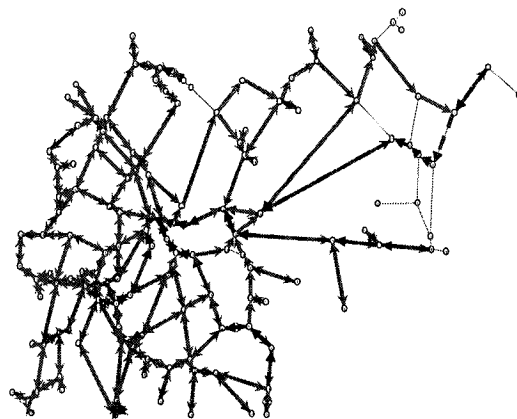


Scénario - Horizon 15

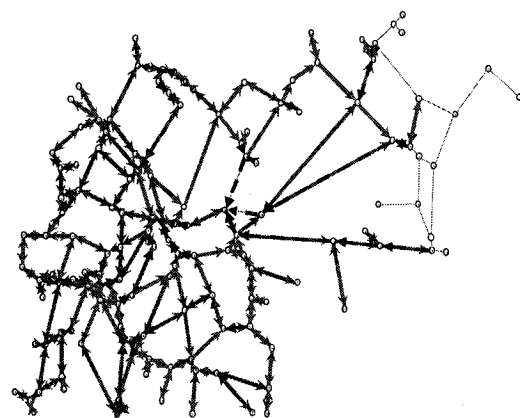
C-15: Comparaison tournée 15 des différents scénarios



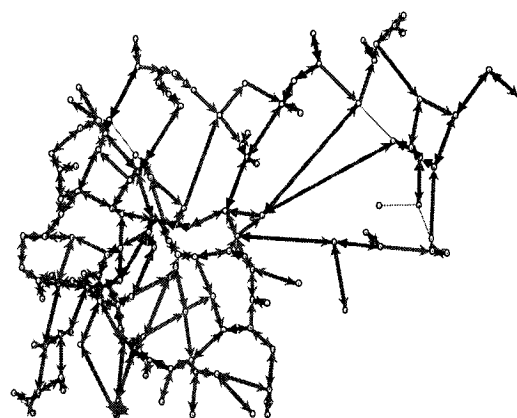
Scénario - Horizon 1



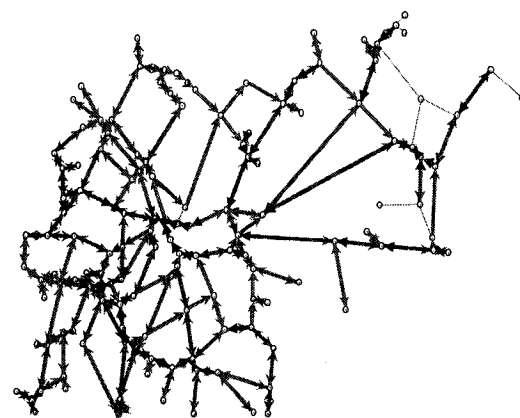
Scénario - Horizon 3



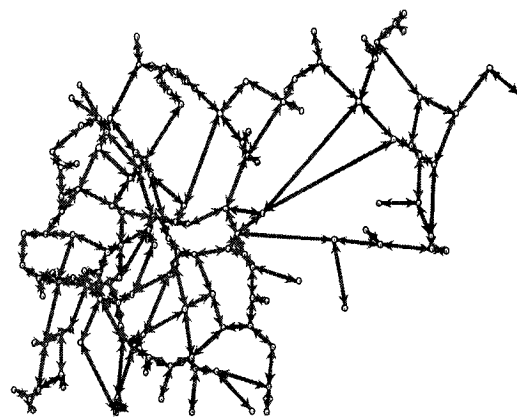
Scénario - Horizon 6



Scénario - Horizon 12



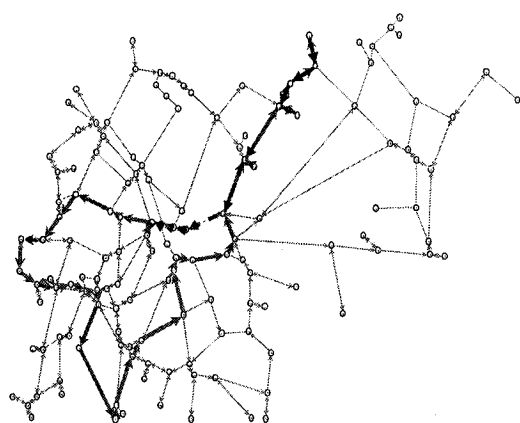
Scénario - Horizon 15



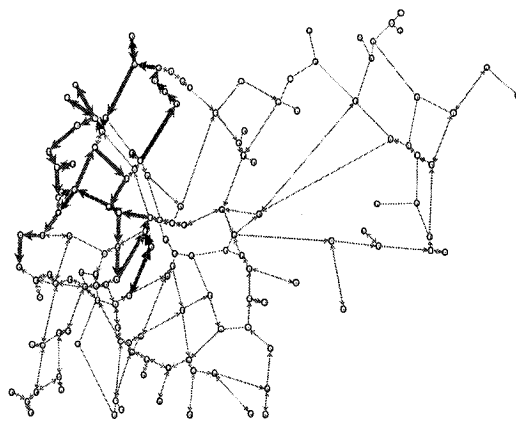
Scénario - PTAC

C-16: Comparaison couverture totale des différents scénarios

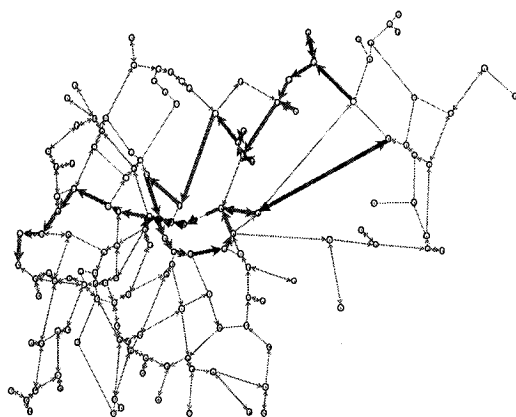
ANNEXE D - CIRCUIT CONSTRUITS – SITUATION D'INCIDENT



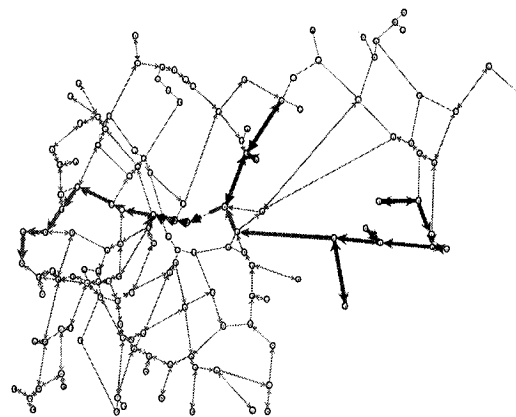
Scénario - Horizon 12



Scénario - Horizon 12 - 20

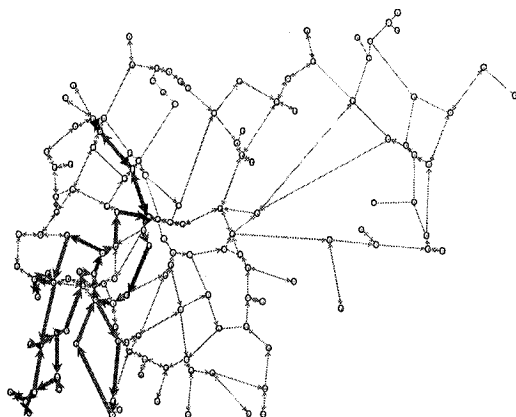


Scénario - Horizon 12 - 39

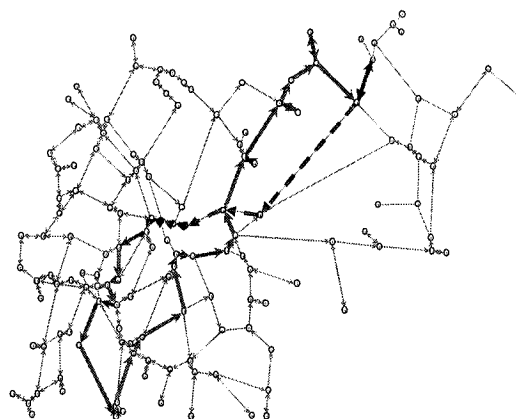


Scénario - Horizon 12 - 134

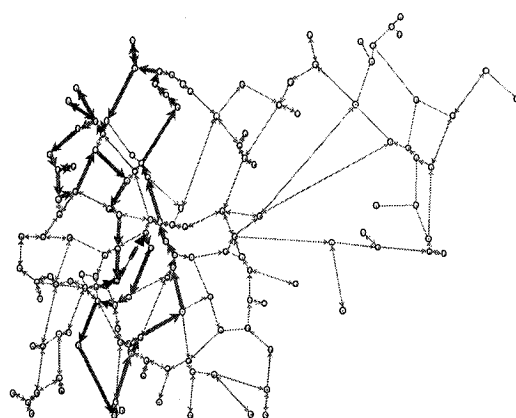
D-1: Comparaison tournées 6 - interrompues



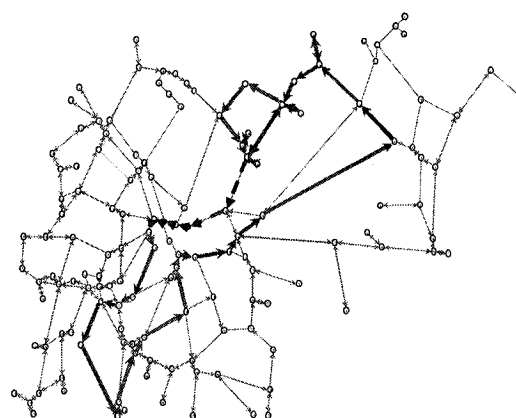
Scénario - Horizon 12



Scénario - Horizon 12 - 20

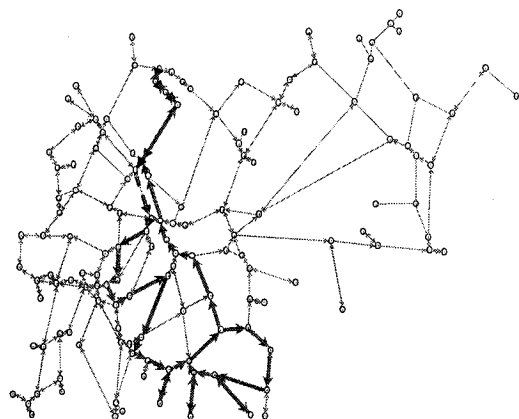


Scénario - Horizon 12 - 39

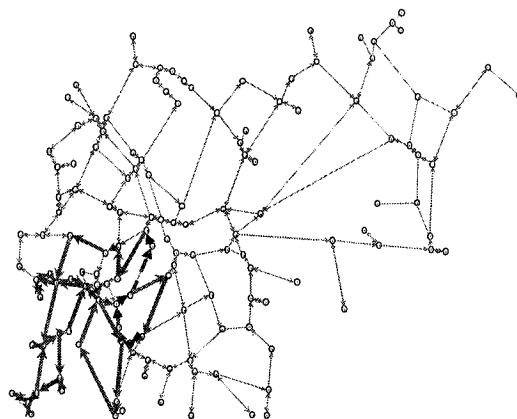


Scénario - Horizon 12 - 134

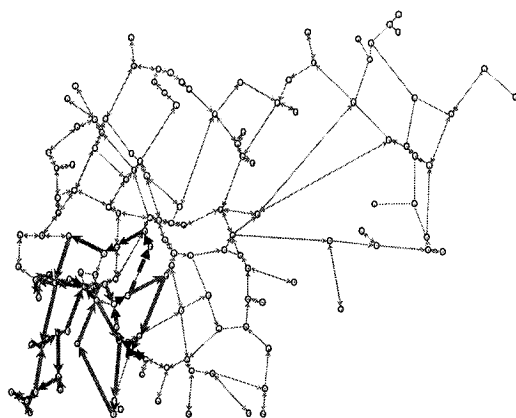
D-2: Comparaison tournées 7 - interrompues



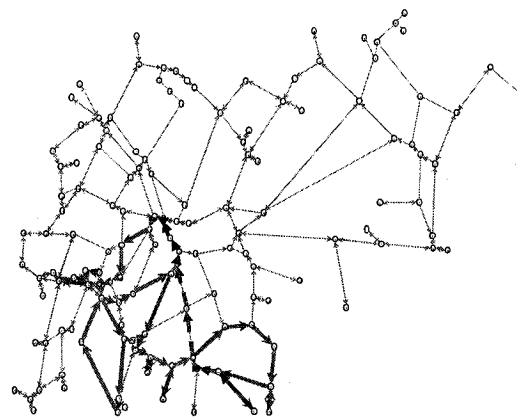
Scénario - Horizon 12



Scénario - Horizon 12 - 20

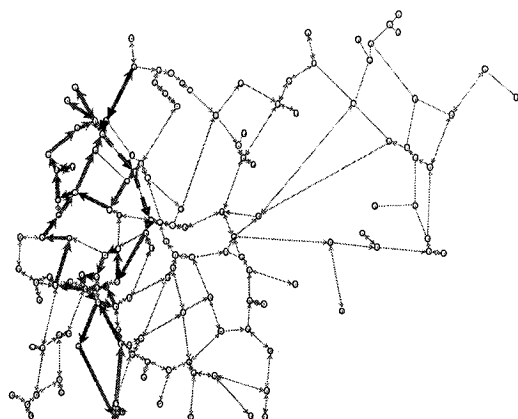


Scénario - Horizon 12 - 39

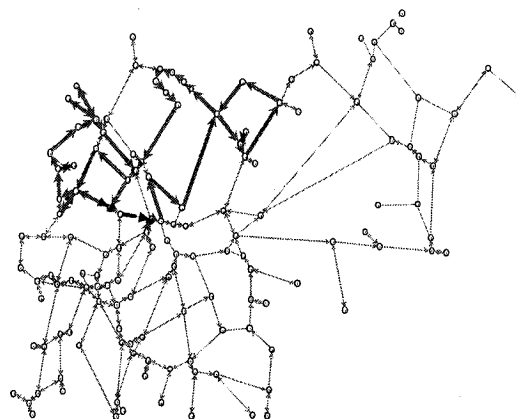


Scénario - Horizon 12 - 134

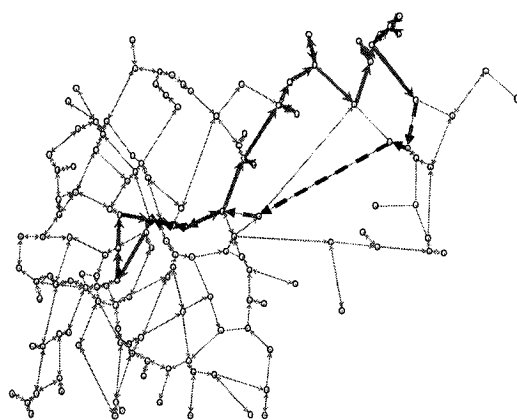
D-3: Comparaison tournées 8 - interrompues



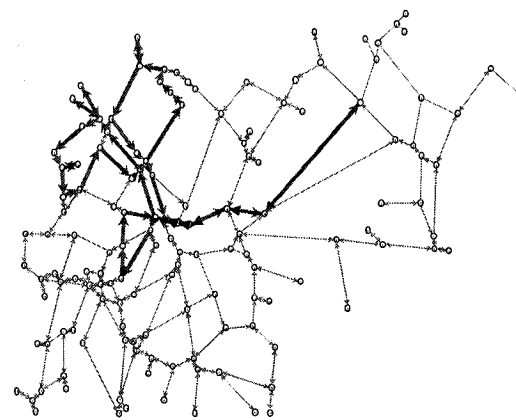
Scénario - Horizon 12



Scénario - Horizon 12 - 20

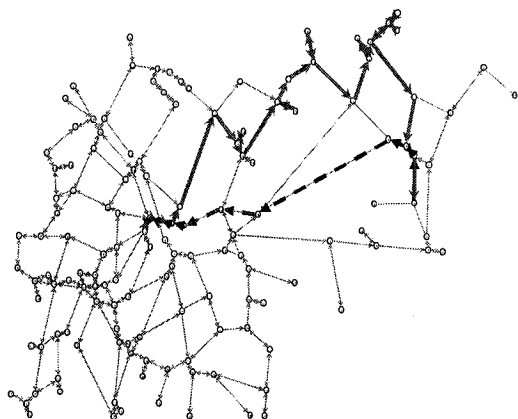


Scénario - Horizon 12 - 39

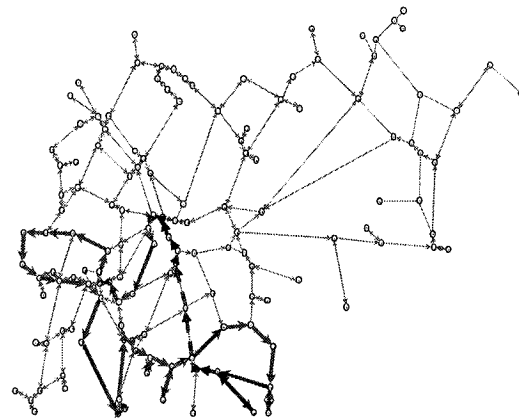


Scénario - Horizon 12 - 134

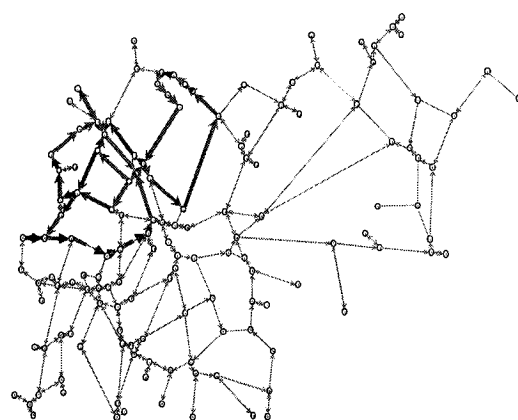
D-4: Comparaison tournées 9 - interrompues



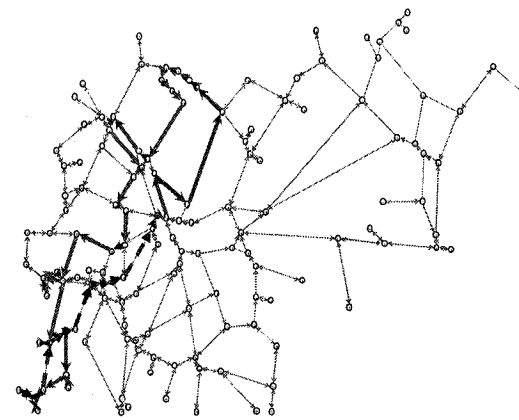
Scénario - Horizon 12



Scénario - Horizon 12 - 20

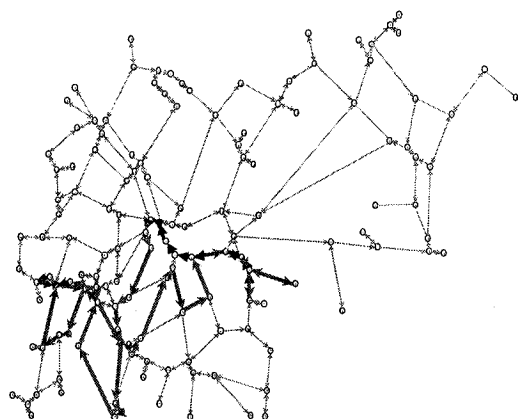


Scénario - Horizon 12 - 39

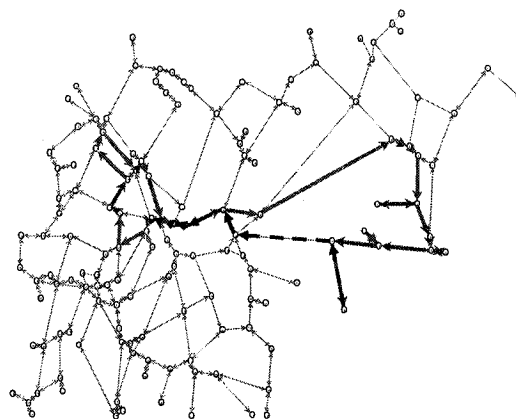


Scénario - Horizon 12 - 134

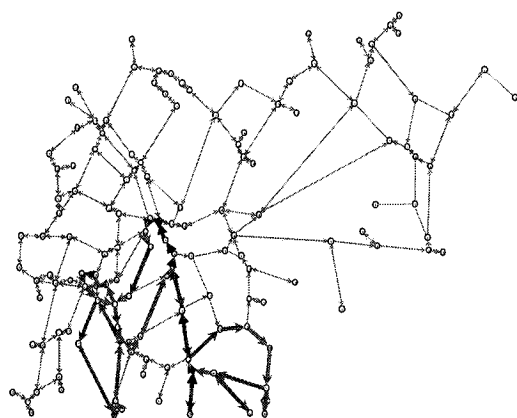
D-5: Comparaison tournées 10 - interrompues



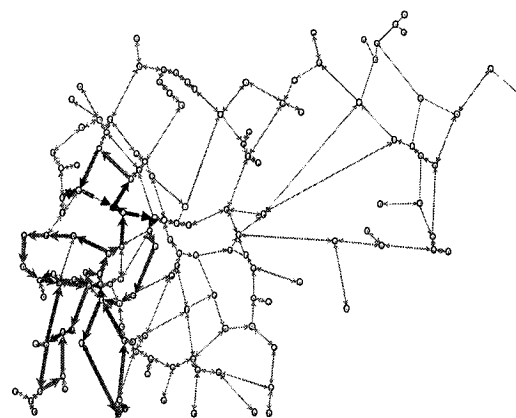
Scénario - Horizon 12



Scénario - Horizon 12 - 20

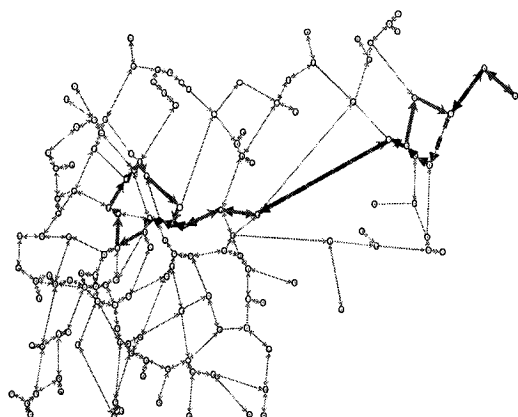


Scénario - Horizon 12 - 39

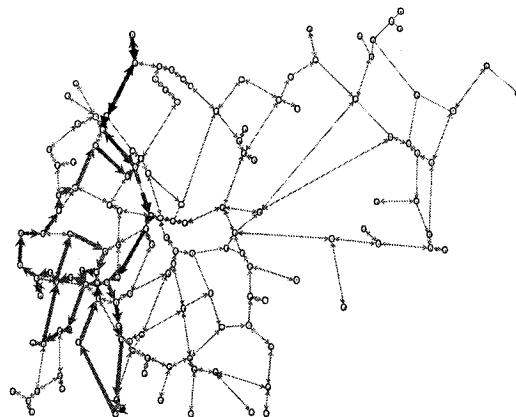


Scénario - Horizon 12 - 134

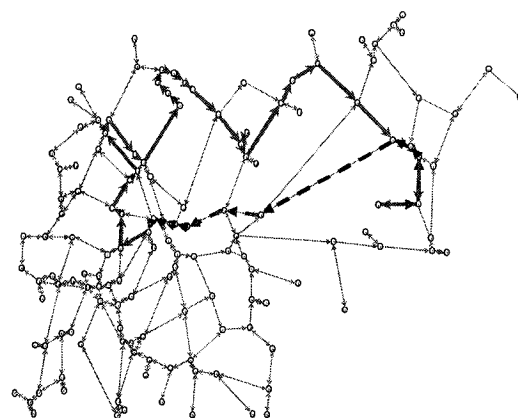
D-6: Comparaison tournées 11 - interrompues



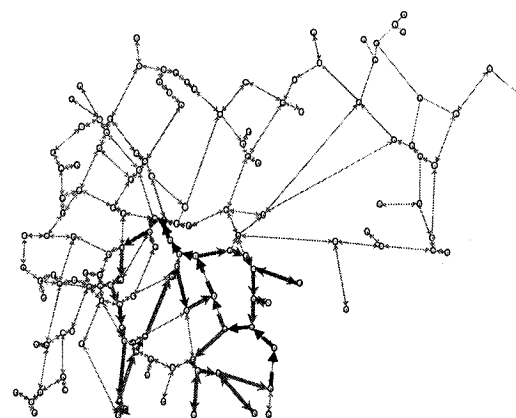
Scénario - Horizon 12



Scénario - Horizon 12 - 20

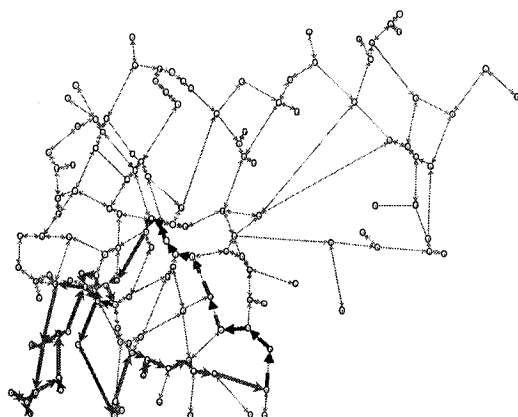


Scénario - Horizon 12 - 39

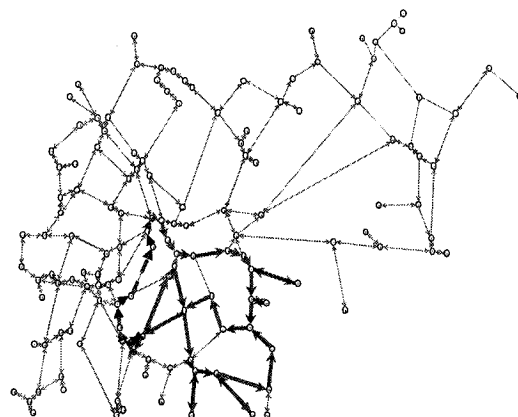


Scénario - Horizon 12 - 134

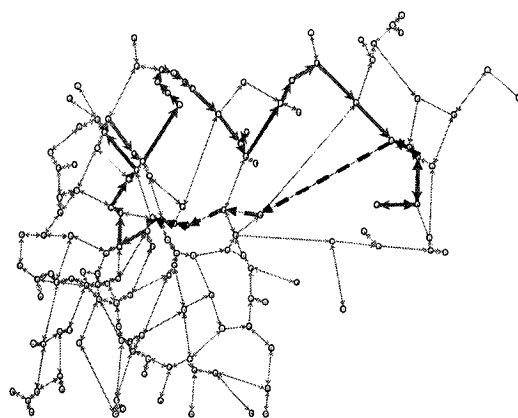
D-7: Comparaison tournées 12 - interrompues



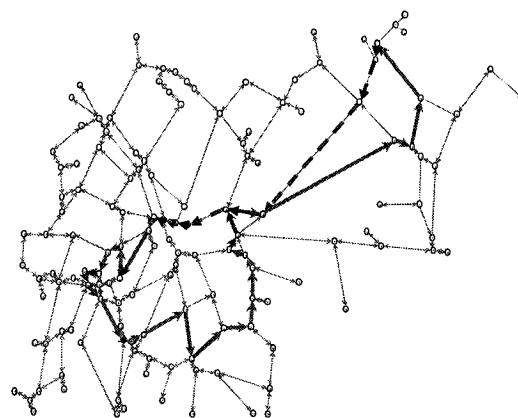
Scénario - Horizon 12



Scénario - Horizon 12 - 20

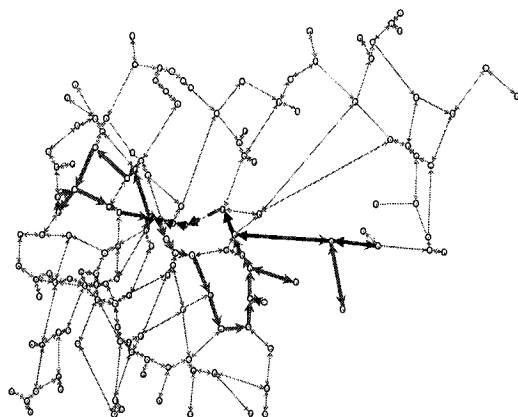


Scénario - Horizon 12 - 39

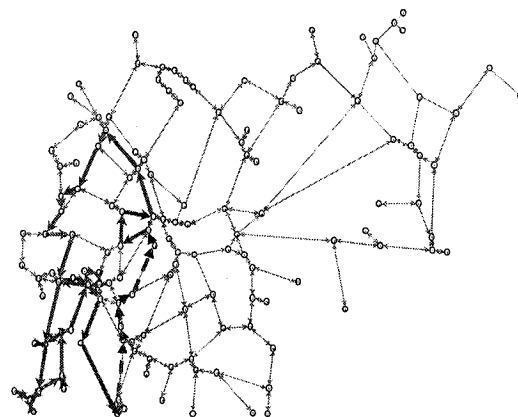


Scénario - Horizon 12 - 134

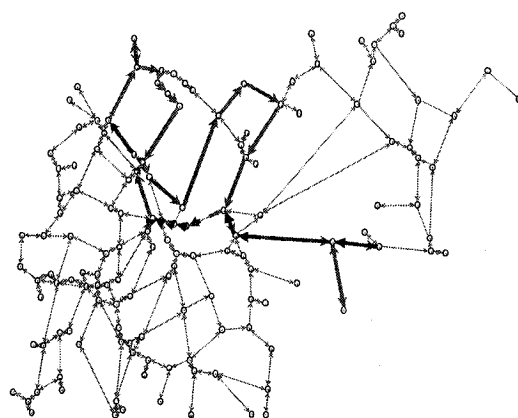
D-8: Comparaison tournées 13 - interrompues



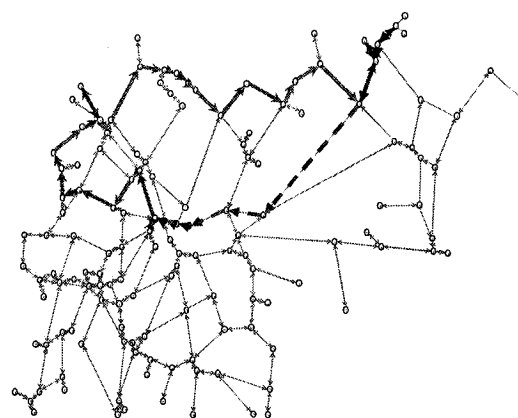
Scénario - Horizon 12



Scénario - Horizon 12 - 20

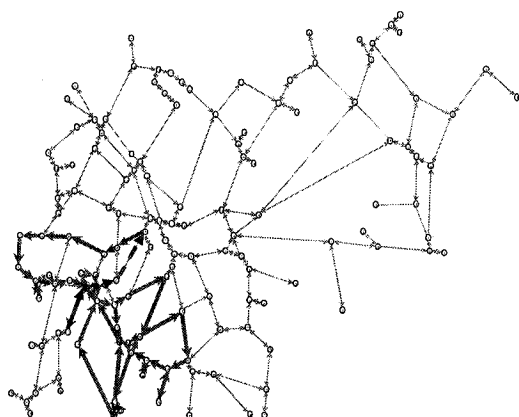


Scénario - Horizon 12 - 39

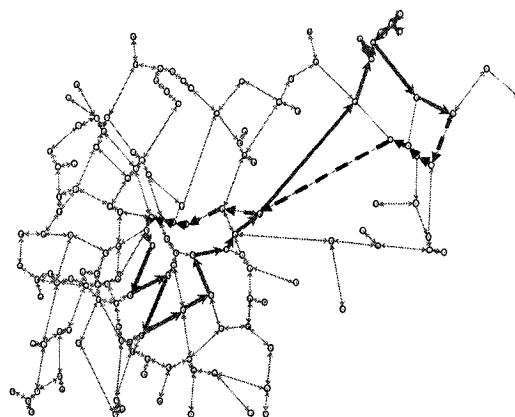


Scénario - Horizon 12 - 134

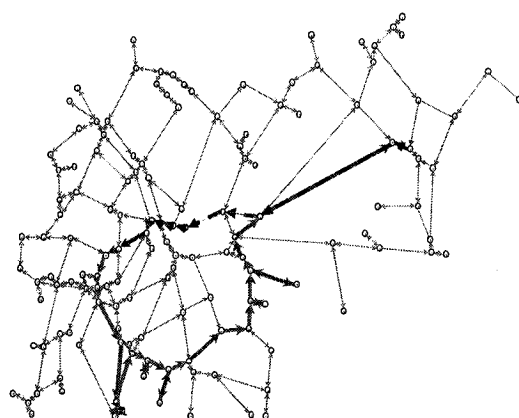
D-9: Comparaison tournées 14 - interrompues



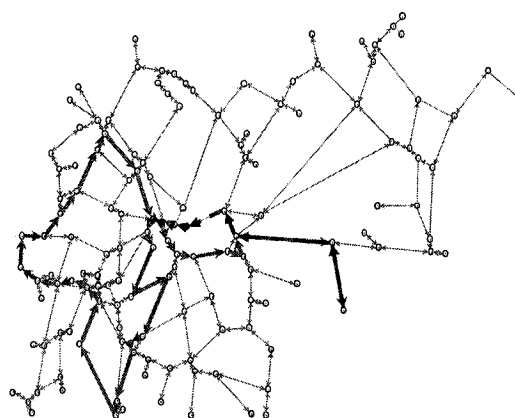
Scénario - Horizon 12



Scénario - Horizon 12 - 20

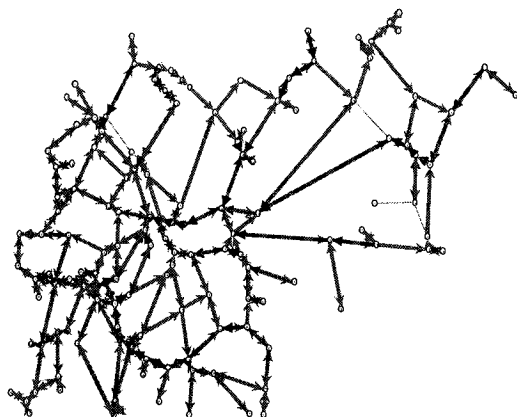


Scénario - Horizon 12 - 39

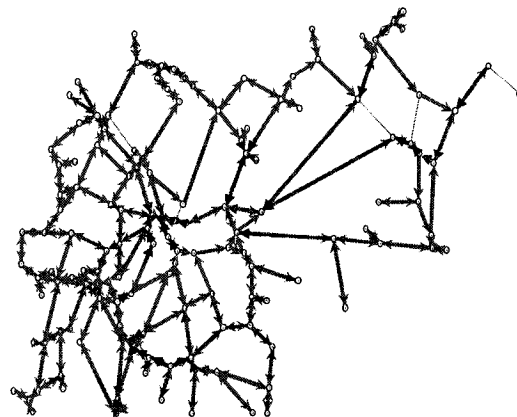


Scénario - Horizon 12 - 134

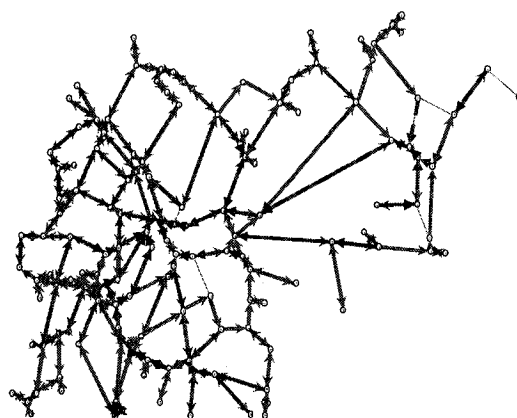
D-10: Comparaison tournées 15 - interrompues



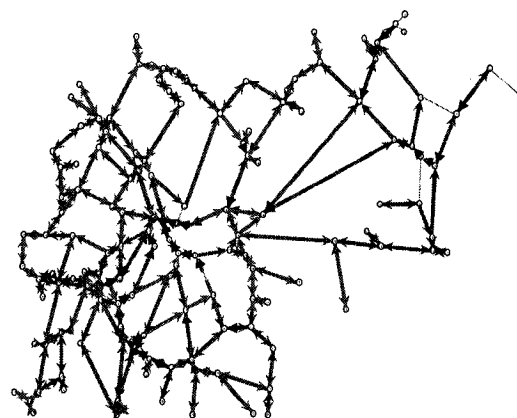
Scénario - Horizon 12



Scénario - Horizon 12 - 20



Scénario - Horizon 12 - 39



Scénario - Horizon 12 - 134

D-11: Comparaison couverture totale - interrompues