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

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

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

MODÉLISATION INFORMATIONNELLE ET MATHÉMATIQUE DES OPÉRATIONS DE SURVEILLANCE DU RÉSEAU ROUTIER

FABIEN MARZOLF
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)
SEPTEMBRE 2003

© Fabien Marzolf, 2003.

National Library of Canada
Bibliothèque nationale du Canada

Acquisitions and Bibliographic Services
Acquisisitons et services bibliographiques

395 Wellington Street
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

395, rue Wellington
Ottawa ON K1A 0N4
Canada

Your file Votre référence
ISBN: 0-612-86416-2
Our file Notre référence
ISBN: 0-612-86416-2

The author has granted a non-exclusive licence allowing the National Library of Canada to reproduce, loan, distribute or sell copies of this thesis in microform, paper or electronic formats.

L'auteur a accordé une licence non exclusive permettant à la Bibliothèque nationale du Canada de reproduire, prêter, distribuer ou vendre des copies de cette thèse sous la forme de microfiche/film, de reproduction sur papier ou sur format électronique.

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

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

Canada

UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL

Ce mémoire intitulé :

MODÉLISATION INFORMATIONNELLE ET MATHÉMATIQUE DES OPÉRATIONS DE SURVEILLANCE DU RÉSEAU ROUTIER

présenté par : MARZOLF Fabien
en vue de l'obtention du diplôme de : Maîtrise ès sciences appliquées
a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

M. CHAPLEAU Robert, ing., Ph.D., président
M. TRÉPANIER Martin, ing., Ph.D., membre et directeur de recherche
M. LANGEVIN André, Ph.D., membre et codirecteur de recherche
M. GALVAN Pierre Fernandez, Ph.D., membre

À Caro, à ton (mon) étoile, à celle qui aurait du être ma seule raison d'exister.

Les gens n'ont pas de problèmes parce qu'ils raisonnent froidement, intelligemment, logiquement. Ils ont des problèmes parce qu'ils sont déraisonnables et illogiques. Par conséquent, si vous voulez les aider, vous devez les rencontrer sur leur terrain, le terrain de l'illogisme.

MILTON H. ERICKSON

REMERCIEMENTS

L'accomplissement de cette aventure n'aurait pu se faire sans les conseils méthodologiques et techniques des professeurs Martin Trépanier et André Langevin. Merci pour votre support quotidien, pour m'avoir transmis de nombreuses connaissances et votre goût pour la recherche.

J'aimerais remercier le Ministère des Transport du Québec pour l'aide financière accordée dans le cadre de ce projet, M. Serge Hamel et toute l'équipe du Centre de Service de Sherbrooke pour leur collaboration.

Finalement, un grand merci à mes parents pour m'avoir soutenu dans la réalisation de cette aventure.

RÉSUMÉ

Le développement des systèmes de positionnement (GPS), des Systèmes d'Information Géographiques (SIG) et des méthodes mathématiques (théorie des graphes, programmation linéaire) permet d'entrevoir une utilisation combinée pour une planification et une gestion plus efficace des activités de surveillance du réseau routier. Malheureusement, ces trois composantes sont de natures très diverses et leurs développements ont été réalisés dans des optiques très différentes et souvent contradictoires, ce qui rend leur intégration plus délicate.

L'objet de ce mémoire est de développer une méthodologie d'analyse et de résolution de la problématique de planification des activités de monitoring avec prise en compte des activités opérées. Ces activités quotidiennes visent, à l'aide d'un véhicule doté d'un système de positionnement, à parcourir l'ensemble du réseau routier afin de s'assurer de sa viabilité. Cependant, certaines tâches connexes entraînent le déroutage du véhicule qui ne pourra compléter l'ensemble des tournées planifiées, et nécessitent ainsi une replanification des tournées en fonction des activités effectivement opérées. Pour cela, il faut intégrer une grande quantité d'information provenant de différentes sources au sein d'une méthode mathématique de planification.

La première étape de cette analyse consiste à établir des balises pour formaliser cet ensemble de données afin d'en permettre une utilisation efficace dans un outil de planification opérationnel. Basée sur l'analyse des flux de données ainsi que sur une approche orientée-objet en transport, elle permet dans un premier temps d'établir le lien entre les objets opérationnels (Incident, Localisation, Trajet) et les objets du SIG (Section, Arc, Vertex) et dans un deuxième temps entre les objets opérationnels et les objets de planification (Tournée, Itinéraire).

Une fois ce formalisme mis en place, il s'agit dans une deuxième étape, de l'intégrer à une méthode mathématique de planification. Pour cela, quatre méthodes de degré de dynamisme mais également de difficulté croissants ont été développées en adéquation avec un contexte opérationnel particulier. Les trois premières méthodes sont basées sur la résolution d'un programme linéaire d'affectation de circuits à des quarts de travail, d'une manière unique (méthode 1), par replanification de circuits prédéterminés (méthode 2) et par une utilisation combinée d'une replanification et d'une intégration des arcs non couverts aux différents circuits (méthode 3). La dernière méthode (méthode 4) se veut une méthode de reconstruction continuelle des circuits en fonction des activités opérées.

Le développement d'un outil de planification opérationnel permet de mettre en évidence les nombreux problèmes d'implantation transparents aux méthodes mathématiques et de démontrer le bien fondé de l'utilisation d'une structure de données cohérente et opérationnelle pour l'intégration des différentes composantes du problème. L'analyse des résultats des différentes expérimentations menées démontre d'une part la validité de l'axe de résolution proposé et d'autre part l'adaptation de la méthode de replanification combinée à une intégration des arcs non couverts à répondre le plus efficacement au problème. La mise en œuvre de la méthode de reconstruction permet également de se questionner sur la capacité des algorithmes classiques de tournées de véhicule sur les arcs, souvent complexes, à répondre à des problèmes opérationnels soumis à des contraintes autres que des contraintes mathématiques.

Finalement, on ne peut douter de l'importance et de la valeur ajoutée procurée par une utilisation combinée de systèmes de positionnement de plus en plus précis, de systèmes d'information géographiques adaptés au domaine du transport, et des méthodes mathématiques puissantes, permettant la prise en compte des activités opérées dans la planification en transport.

ABSTRACT

The development of global positioning systems (GPS), Geographic Information Systems (GIS) and mathematical methods (graph theory, linear programming) enable to foresee a combined use for a more efficient planning and management of the road network maintenance activities. Unfortunately, these three components are of different natures and their developments have been realized with different views, and this often in opposite directions. This makes their integration more delicate.

The goal of this thesis is to develop a methodology used to analyze and solve several problems encountered in the planning of monitoring activities, considering the operational data. These daily activities are used, with the help of vehicles equipped with a positioning system, to cover the road network to insure its validity. However, certain linked activities divert the vehicle from its route, preventing the completion of the planned routes. A new planning of the routes, considering the operational data will therefore be needed. For this, an important amount of information coming from different sources will need to be integrated with a mathematical planning method.

The first step of this analysis consists in establishing markup to structure the data in order to provide an architecture well adapted to the operational constraints and to integrate them in a decision support tool. Based on data flows analysis and on an newly Transportation Object-Oriented Modeling approach, this first step permits creating links between the operational objects (incidents, localization, distance) and the objects related to GIS (Sections, Arcs, Vertex) and also between the operational objects and the planning objects (Itinerary, Circuits).

Once this is done, the second step consists of integrating this first step in a mathematical planning method. For this, four methods of various dynamism levels but equally of

growing difficulty have been developed with the required adaptation to a particular operational context. The first three are based on the resolution of a linear program that assign planned routes to the different work-shifts: only once (method 1), by re-planning of pre-determined circuits (method 2) and by a combine use of a re-planning and integration of non covered arcs to different circuits (method 3). The last method (method 4) is a method of continual reconstruction of the circuits taking into account the actually completed activities.

The development of an operational planning tool permits to point out the numerous implementation problems of mathematical methods and to demonstrate the advantages of use of coherent and operational data for the integration of the different components of the problem. The analyses of the experimentations done demonstrate the validity of the proposed methods and of the adaptation of the re-planning method combined to an integration of non-covered arcs to address more efficiently the problem. The use of the reconstruction method questions the capability of the classical arc routing algorithms, usually complex, to address the operational problems submitted to constraints other than mathematical ones.

Finally, there is no doubt about the importance and about the added value brought by the combined use of positioning systems, which are more and more precise, of Geographic Information Systems and of the powerful mathematical methods, permitting the monitoring of the operated activities in transportation planning.

TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE ..... **IV**

REMERCIEMENTS ..... **V**

RÉSUMÉ ..... **VI**

ABSTRACT ..... **VIII**

TABLE DES MATIÈRES ..... **X**

LISTE DES TABLEAUX ..... **XIV**

LISTE DES FIGURES ..... **XV**

LISTE DES ABRÉVIATIONS ..... **XVIII**

LISTE DES ANNEXES ..... **XIX**

INTRODUCTION **1**

CHAPITRE 1 : UNE BASE THÉORIQUE RICHE ET PROMETTEUSE **4**

1.1 Le système de positionnement **4**

1.1.1 Une vue d'ensemble 4

1.1.2 Le système NAVSTAR-GPS 5

1.1.3 Performance du système de positionnement 7

1.1.4 Une performance accrue par une volonté d'ouverture 9

1.2 Les systèmes d'information géographiques (SIG) **10**

1.2.1 Définition d'un SIG 10

1.2.2 Une modélisation de la réalité 12

1.2.3 L'utilisation des SIG dans le domaine du transport et de la logistique 13

1.2.4 Une intégration délicate 15
1.2.5 Les applications commerciales 15
1.3 Les problèmes de tournées sur les arcs 18
1.3.1 Les problèmes de plus courts chemins 19
1.3.2 Le problème du Postier Chinois 25
1.3.3 Le problème du Postier Rural 30
1.3.4 Les problèmes de tournées sur les arcs avec capacité 33

CHAPITRE 2 : MODÉLISATION INFORMATIONNELLE ET MATHÉMATIQUE DES OPERATIONS 37

2.1 Une vision globale : l'approche par Diagramme de Flux de Données 37
2.1.1 Les éléments d'un DFD 38
2.1.2 Analyse des activités liées au monitoring du réseau routier 39
2.2 L'approche orientée-objet en transport 41
2.2.1 Définitions de objets 42
2.2.2 Approche orientée-objet pour le monitoring 43
2.3 Problématique d'intégration des données opérationnelles dans la planification des activités 48
2.4 Méthodes algorithmiques de planification des activités 52
2.4.1 Définition générale de la problématique de construction des tournées 52
2.4.2 Les approches de résolution 53
2.5 Mesure de la performance des activités 61
2.5.1 Performance de la méthode de planification 62
2.5.2 Performance des activités 64
2.5.3 Performance des autres acteurs 67
2.6 Vers la mise en œuvre de considérations théoriques 69

CHAPITRE 3 : MISE EN ŒUVRE D'UN OUTIL DE PLANIFICATION 70

3.1 Vue d'ensemble 70
3.2 De la réalité au modèle mathématique, du réseau au graphe 72

3.2.1 Obtention d'un graphe à structure particulière 72
3.2.2 Cohérence fonctionnelle et mathématique 75
3.2.3 Extraction du graphe 76
3.2.4 Modélisation du graphe 76
3.3 Valeur ajoutée procurée par le système informationnel 80
3.3.1 L'interface 80
3.3.2 Optimisation mathématique et structure de données 84
3.4 Approche statique : confection d'un horaire basé sur des circuits prédéterminés 87
3.4.1 Pré-requis 87
3.4.2 Résolution : confection d'un horaire 88
3.5 Une approche basée sur la replanification : variation des ensembles, déclaration physique et temporelle 91
3.5.1 Modélisation mathématique 91
3.5.2 Traitement de l'information 93
3.5.3 Résolution : choix de l'objectif 93
3.6 Une approche basée sur l'intégration : augmentation des circuits prédéterminés 97
3.6.1 Définition 97
3.6.2 Choix du circuit d'affectation 98
3.6.3 Ajout d'un arc à un circuit : définition de la mesure 99
3.7 Une approche basée sur la construction : confection théorique et opérationnelle 106
3.7.1 Définition des arcs obligatoires et regroupement des arcs 107
3.7.2 Transformation du graphe induit 110
3.7.3 Évaluation de la capacité – Augmentation du circuit 112
3.7.4 Circuit Eulérien et circuit opérationnel 112
CHAPITRE 4 : EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS 116
4.1 Protocole d'expérimentation 116

4.1.1 Description des données 116
4.1.2 Optimisation – Résolution des programmes linéaires 118
4.1.3 Suivi des activités 118
4.1.4 Évaluation de la performance des méthodes 119
4.2 Résultats 120
4.2.1 Méthodes de planification 120
4.2.2 Horizon de planification réel 128
4.2.3 Critique des méthodes de planification 130
4.2.4 Avantages des méthodes de planification 133
4.2.5 Méthode de construction 135

CONCLUSION 138

RÉFÉRENCES 143

ANNEXES 148

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1 : Précision du système Navstar-GPS....8
Tableau 2.1 : Exemple de propriétés et méthodes des objets SIG....46
Tableau 2.2 : Exemple de propriétés et méthodes des objets opérationnels....47
Tableau 2.3 : Exemples de propriétés et méthodes des objets de planification....48
Tableau 2.4 : Comparatif des différentes méthodes de planification....61
Tableau 2.5 : Synthèse des indicateurs de performance....68
Tableau 4.1: Caractéristique du réseau utilisé....116
Tableau 4.2 : Caractéristiques des circuits prédéterminés....117
Tableau 4.3 : Performance de la méthode de planification (100%)....121
Tableau 4.4 : Résultats pour un horizon restreint (100%)....121
Tableau 4.5 : Résultats de la maximisation des arcs de classe 1 (50% - 75%)....123
Tableau 4.6 : Résultats de la maximisation des arcs de classe 3 (méthode 2) (50% - 75%)....124
Tableau 4.7 : Résultat de la maximisation pondérée (50%)....125
Tableau 4.8 : Résultats de la maximisation de la somme pondérée améliorée (50%)...127
Tableau 4.9 : Résultats de la maximisation pondérée améliorée (50% - 75%)....128
Tableau 4.10 : Résultats pour un horizon de planification réduit (50% - 75%)....129
Tableau 4.11 : Horaire de travail obtenu par la méthode 3....129

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Détermination des coordonnées dans le plan 6
Figure 1.2 : Positionnement dans l'espace 7
Figure 1.3 : Précisions des différents systèmes GPS 9
Figure 1.4 : Relations entre les éléments du système informationnel (TREPANIER, 1999) 11
Figure 1.5 : Stockage des données dans un SIG (d'après LOGSDON, 1995) 12
Figure 1.6 : Architecture multi-couches d'un SIG (source GIS.com) 13
Figure 1.7 : Application de l'algorithme de Dijkstra 21
Figure 1.8 : Application de l'algorithme de Dijkstra inverse 22
Figure 1.9 : Les sept ponts de Königsberg 26
Figure 1.10 : Exemple de transformation d'un graphe en un graphe Eulérien 29
Figure 1.11 : Exemple d'utilisation de l'algorithme "*connect-and-balance*" 32
Figure 1.12 : Exemple d'un meilleur choix d'équilibrage du réseau 33
Figure 2.1 : Exemple de représentation d'un processus par DFD 39
Figure 2.2 : Contexte du processus (DFD) 40
Figure 2.3 : Description des objets en transport et caractéristiques des relations (TRÉPANIER, 1999) 43
Figure 2.4 : Modélisation orientée-objet des activités liées au monitoring 44
Figure 2.5 : Schématisation de la problématique d'intégration des données opérationnelles 49
Figure 2.6 : Exemple de difficulté d'association de la position à une route 51
Figure 2.7 : Synoptique de modélisation du problème 53
Figure 2.8 : Découpage des quarts de travail 54
Figure 2.9 : Modèle mathématique de confection de l'horaire 55
Figure 2.10 : Exemple de re-planification. 57
Figure 2.11 : Algorithmique générale d'intégration partielle des activités opérées. 58

Figure 2.12 : Algorithmique de l'approche de reconstruction continuelle.....60
Figure 3.1 : Implantation de la méthodologie proposée 71
Figure 3.2 : Graphe hiérarchique des méthodes mathématiques développées 72
Figure 3.3 : Représentation du réseau routier.....73
Figure 3.4 : Représentation du graphe mathématique résultant (SIG) 74
Figure 3.5 : Exemple d'incompatibilité du graphe.....75
Figure 3.6 : Propriétés de l'objet Noeud 77
Figure 3.7 : Exemples de méthodes de l'objet Nœud.....78
Figure 3.8 : Graphe mathématique induit par le réseau GIS 79
Figure 3.9 : Interface de construction interactive d'un circuit 81
Figure 3.10 : Interface d'interrogation des liens 82
Figure 3.11 : Méthode d'affichage des arcs appartenant à une classe.....83
Figure 3.12 : Affichage des arcs de classe 1 84
Figure 3.13 : Modélisation du problème de transport (fichier *.mod d'AMPL).....85
Figure 3.14 : Architecture d'accès aux données.....86
Figure 3.15 : Structure de données pour la confection de l'horaire 88
Figure 3.16 : Exemple de grille horaire obtenue 90
Figure 3.17 : Modèle mathématique de replanification.....92
Figure 3.18 : Exemple de replanification.....93
Figure 3.19 : Répartition des arcs de classe 3.....94
Figure 3.20 : Modèle mathématique d'affectation modifié 96
Figure 3.21 : Étapes de la méthode d'augmentation des circuits 98
Figure 3.22 : Méthode d'ajout d'un arc 100
Figure 3.23 : Exemple d'ajout d'un arc à un circuit 100
Figure 3.24 : Modèle mathématique d'affectation des arcs au circuits.....101
Figure 3.25 : Modèle mathématique modifié d'affectation des arcs aux circuits 103
Figure 3.26 : Fichier modèle (AMPL) du problème d'affectation des arcs aux circuits104
Figure 3.27 : Fichier de données (DAT) pour le modèle d'affectation des arcs 105
Figure 3.28 : Méthodologie de résolution de la méthode de construction.....106

Figure 3.29 : Cheminement itératif de construction d'un circuit 108
Figure 3.30 : Approximation linéaire de la mesure d'affectation généralisée 109
Figure 3.31 : Programme linéaire d'affectation généralisée 110
Figure 3.32 : Algorithme de connexion du graphe 111
Figure 3.33 : Algorithme de confection de l'anti-arborescence 113
Figure 3.34 : Exemple d'anti-arborescence enracinée au nœud N38 114
Figure 3.35 : Exemple de spécificité opérationnelle 115
Figure 4.1 : Structure de circuit idéale 131
Figure 4.2 : Distribution des liens omis par la méthode 3 (50%) 132
Figure 4.3 : Exemple de circuit augmenté 133
Figure 4.4 : Graphe résultant de la méthode de construction 137

LISTE DES ABRÉVIATIONS

DFD : Diagramme de flux de données

DGPS : Differential Global Positioning System

EGNOS : European Geostationary Navigation Overlay Service

ERP : Entreprise Ressource Planning

GDOP : Geometric Dilution Of Precision

GPS : Global Positioning System

GLONASS : GLObal NAvigation Satellite System

LADGPS : Local Area Differential GPS

NAVSTAR : NAvigation System Time and Ranging

OO-SIG : Système d'Information Géographique Orienté-Objet

PPS : Precise Positioning Service

SA : Selective Availability

SGBD : Système de Gestion de Base de Données

SIG : Système d'Information Géographique

SIG-T : Système d'Information Géographique pour le Transport

SIG-TOO : Système d'Information Géographique Orienté-Objet en Transport.

SPS : Standard Positioning Service

UERE :User Equivalent Ranging Distance

VBA : Visual Basic pour Application

WAAS : Wide Area Augmentation System

WADGPS : Wide Area Differential GPS

LISTE DES ANNEXES

ANNEXE A : ANALYSE INFORMATIONNELLE DES ACITIVITÉS DE MONITORING DE LA RÉGION DE L'ESTRIE.....154

ANNEXE B : MODÉLISATION ET VISUALISATION D'ALGORITHMES DE TOURNÉES SUR LES ARCS À L'AIDE D'UNE APPLICATON EXCEL.....170

ANNEXE C : CARACTÉRISTIQUES DU RÉSEAU ET DES CIRCUITS PRÉDÉTERMINÉS.....197

ANNEXE D : UTILISATION D'UN LANGAGE DE MODÉLISATION MATHÉMATIQUE ORIENTÉ-OBJET 226

INTRODUCTION

La surveillance du réseau routier (monitoring) est une opération journalière de parcours du réseau routier réalisée par les patrouilleurs du Ministère des Transport du Québec. Cette activité a pour but de s'assurer de la sécurité et de la viabilité du réseau par le biais d'une détection rapide des différents incidents s'y produisant. Même si cette activité est a priori basée sur une composante quasi statique représentée par le réseau routier physique, la variabilité des incidents rencontrés tant au niveau de leur fréquence, nature, heure d'apparition et localisation rend la tâche de planification des activités très délicate. Cette activité nécessite de plus une forte interaction avec d'autres services (signalisation, travaux).

L'avènement des nouvelles technologies dans le domaine des Systèmes d'Information Géographiques (SIG), de l'informatique embarquée, des langages de programmation et des systèmes de positionnement (GPS) permet d'obtenir et de traiter une quantité très importante de données traduisant les activités opérées pour fournir de précieux renseignements au planificateur. Les organisations oeuvrant dans le domaine du transport, tant au niveau publique que privé, se sont ainsi dotés d'applications commerciales à caractère géographique qui permettent pour la majorité d'entre elles d'intégrer la composante temps réel que procurent les systèmes GPS aux aspects classiques du traitement de l'information.

Les défis découlant sont multiples et variés. Ils sont dans un premier temps d'ordre technologique afin d'adapter les systèmes de positionnement aux véhicules en mouvement. Ils sont également d'ordre informatique afin de stocker et de faire transiter la grande quantité d'information entre ces différents systèmes. Ces défis sont sans doute également d'ordre mathématique, mais ils sont surtout et d'abord d'ordre informationnel

et humain afin de traiter de manière efficace l'information et de produire des solutions qui seront acceptées et validées par les usagers.

D'un point de vue mathématique, de nombreux chercheurs se sont intéressés aux problèmes de parcours et de tournées de véhicules, tant sur les nœuds que sur les arcs, et les récents développements intègrent un certain degré de dynamisme en incluant des composantes stochastiques ou temps réel. Dans le domaine du transport, certains chercheurs s'intéressent maintenant au traitement de cette masse importante d'information et à sa validité afin de l'intégrer aux activités de planification. Cependant, peu de travaux portent actuellement sur l'utilisation combinée d'outils informationnels et mathématiques dans la planification du transport.

L'objet de ce mémoire est de confronter ces deux mondes très distants afin de construire le pont permettant l'utilisation de données opérationnelles dans des algorithmes mathématiques robustes et puissants afin de produire des solutions en adéquation avec les contraintes opérationnelles et les exigences humaines. La conception de cet ouvrage d'art sera réalisée à partir des deux rives. Elle consiste d'une part au développement d'une structure et d'un formalisme permettant le traitement des données opérationnelles, et d'autre part en l'adaptation de concepts mathématiques face à ce formalisme. Articulé autour de trois chapitres, ce document présente une méthodologie d'analyse et de résolution d'un problème réel d'intégration de données opérationnelles à la planification de tournées de véhicules. L'expérimentation est basée sur le cas réel du monitoring du réseau routier de la région de l'Estrie au Québec.

Dans un premier temps, une revue de littérature permet de connaître l'état mais aussi l'impact de l'utilisation des systèmes de positionnement et des systèmes informationnels dans la planification du transport afin de pouvoir maîtriser les principales difficultés et limites d'utilisation de tels systèmes. Ce chapitre permet également de dresser l'inventaire des différents concepts et algorithmes mathématiques utilisés dans la

confection de tournées de véhicules sur les arcs. Cette analyse doit permettre à la fois de comprendre la mécanique de résolution mais également le flux d'information entrant et sortant des différentes méthodes.

Le processus d'analyse et de résolution de ce problème est traité dans les deux chapitres suivants. Le premier de ces chapitres est consacré à la modélisation du problème. Il présente dans un premier temps une méthodologie d'analyse par diagramme de flux de données du mode opératoire actuellement utilisé. L'analyse des flux informationnels et les différentes contraintes propres aux activités du monitoring mènent au développement d'un modèle objet qui traduit l'interaction entre les intervenants. Parallèlement, un modèle mathématique est développé afin de construire et d'optimiser les tournées de véhicules. Le dernier chapitre propose une méthode de résolution ainsi qu'une expérimentation appliquée au problème de monitoring du réseau routier dans la région de l'Estrie. Il décrit et analyse de manière détaillée les différents algorithmes utilisés ainsi que les résultats obtenus.

CHAPITRE 1 : UNE BASE THÉORIQUE RICHE ET PROMETTEUSE

L'utilisation de données opérationnelles dans la planification du transport et la confection de tournées de véhicule met en jeu trois composantes principales : le système de positionnement, le système informationnel et les algorithmes mathématiques. Ce premier chapitre se veut tout d'abord une description des fondements théoriques sur lesquels s'appuient ces trois composantes mais également une prise en compte des récents développements dans ces différents domaines afin de démontrer le fort potentiel d'une utilisation combinée.

1.1 Le système de positionnement

1.1.1 Une vue d'ensemble

Un système de positionnement, indépendamment de sa nature technologique, consiste à fournir différentes informations (position, vitesse et temps) caractérisant un récepteur en utilisant le principe de la triangulation. La détermination de ces caractéristiques est effectuée à l'aide de bornes fixes ou mobiles. Le plus connu de ces systèmes est un système de positionnement et de navigation par satellites représenté par l'acronyme GPS (*Global Positioning System*). Il existe actuellement deux constellations de satellites et donc deux systèmes permettant le repérage et la navigation à une échelle mondiale. Le premier, NAVSTAR-GPS (*NAVigation System Time and Ranging*) a été développé dans les années 1990 par le ministère de la défense américain et déclaré complètement opérationnel au début des années 1995. Son homologue russe, GLONASS (*GLObal NAvigation Satellite System*) est peu utilisé en Amérique du Nord et souffre de plusieurs retards dus aux conditions économiques difficiles dans cette partie du monde. L'Europe

est sur le point de se doter d'un tel system, EGNOS (*European Geostationary Navigation Overlay Service*), qui devrait être opérationnel fin 2003.

1.1.2 Le système NAVSTAR-GPS

Le système de positionnement global communément appelé GPS est lié au système NAVSTAR qui se compose de trois ensembles principaux (LOGSDON, 1995) :

- l'ESPACE, composé de 24 satellites opérationnels (28 au total) répartis suivant six orbites circulaires (4 par orbite) inclinés à 55 degrés, positionnés à une altitude de 20 200 km avec une période de révolution de 12 heures. Cette configuration assure qu'au moins 4 satellites (7 avec la constellation complète) soient visibles en n'importe quel point du globe terrestre ;
- le système de CONTRÔLE, composé de 5 stations de référence (Hawaï, Kwajalein, Ascension Island, Diego Garcia, Colorado Spring), 3 antennes (Ascension Island, Diego Garcia, Kwajalein) ainsi que d'une station principale située à Scriever Air Force Base dans le Colorado. Cette dernière permet la mise à jour des positions et des données des différents satellites ;
- l'USAGER, composé d'un récepteur fournissant les données sur la position, la vitesse et le temps.

Chacun des satellites de la constellation NAVSTAR émet simultanément sur deux fréquences distinctes : L1 à 1575.42 MHz qui véhicule le signal de navigation ainsi que le code pour SPS (*Standard Positioning Service*) et L2 à 1227.60 MHz utilisé pour mesurer le délai dû à la propagation dans l'ionosphère du signal pour PPS (*Precise Positioning Service*). Ainsi chaque satellite émet un message de navigation qui contient toutes les données nécessaires au récepteur pour effectuer les calculs de navigation. Ces données comprennent :

- une information de l'état de fonctionnement du satellite ;
- les informations nécessaires à l'acquisition du code du message ;

- les informations de précision du satellite ;
- une information concernant le retard de propagation dû à l'ionosphère ;
- les éphémérides du satellite.

La détermination de la position est basée sur le principe de la triangulation. Dans le plan, la connaissance de la distance par rapport à deux satellites permet de connaître la position exacte d'un point (l'autre est éliminé car n'appartenant pas à la surface de la terre).

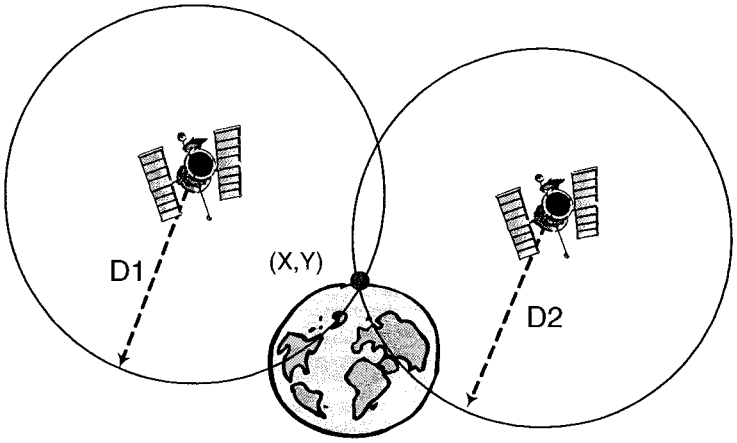


Figure 1.1 : Détermination des coordonnées dans le plan

Le principe est similaire dans l'espace mais il est nécessaire de connaître la distance par rapport à 3 satellites pour obtenir une position complète (X,Y,Z ou Latitude, Longitude, Élévation). Cependant, à cause d'un manque de synchronisation des horloges du récepteur et des satellites, il est nécessaire d'obtenir ces distances par rapport à 4 satellites et par la même occasion définir la quatrième dimension, le Temps.

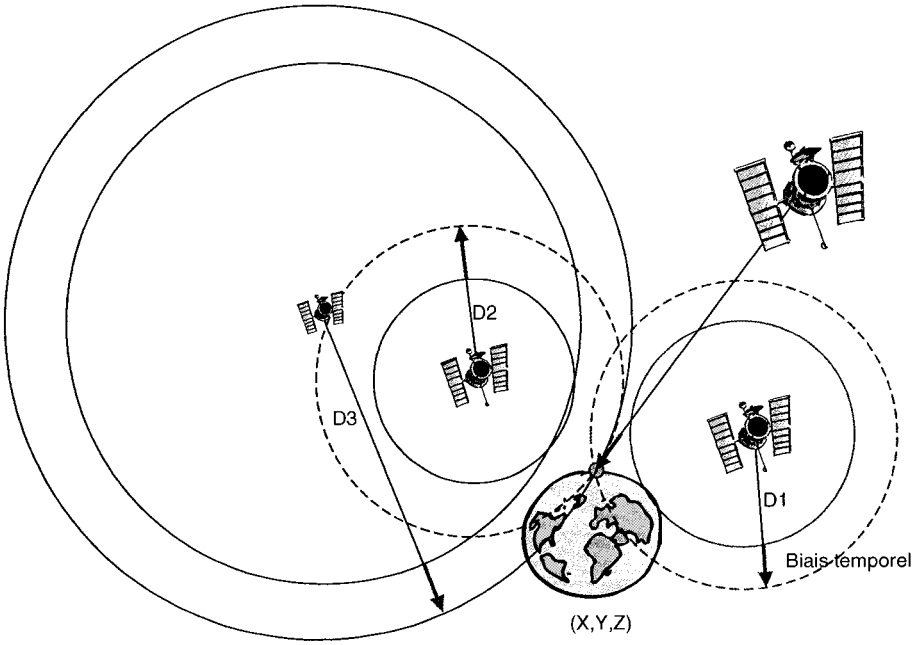


Figure 1.2 : Positionnement dans l'espace

1.1.3 Performance du système de positionnement

De nature militaire, le système GPS offre deux niveaux de service :

- un Service de Positionnement Standard (SPS) : ce service est continuellement disponible pour n'importe quel usager à travers le monde, est gratuit mais souffre d'imprécisions ;
- un Service de Positionnement Précis (PPS) qui n'est offert qu'aux personnes autorisées par le gouvernement américain (armée américaine, organisme gouvernementaux, etc.).

De plus, le système NAVSTAR est doté d'une composante de « détérioration » du signal qui limite la précision du GPS. Cette détérioration, nommée SA (*Selective Availability*) est obtenue par manipulation des données sur l'orbite du satellite ou de la fréquence de son horloge. Voici la précision du système telle que fournie dans le Federal Radionavigation Plan de 1999 (KAMINSKI, 1995).

Tableau 1.1 : Précision du système Navstar-GPS

	SPS	PPS
Précision horizontale	100 mètres	22 mètres
Précision verticale	156 mètres	27.7 mètres
Précision temporelle	340 nanosecondes	200 nanosecondes

Deux facteurs interviennent directement sur la précision de la position finale :

- la géométrie de la position des satellites par rapport au récepteur : ce facteur est appelé GDOP (*Geometric Dilution Of Precision*) et se scinde en quatre termes HDOP, VDOP, PDOP et TDOP pour les composantes horizontale, verticale, en trois dimensions et pour le temps ;
- la précision de la mesure de la distance entre le satellite et le récepteur appelée UERE (*User Equivalent Ranging Distance*)

Cette dernière mesure est soumise aux facteurs suivants :

- synchronisation de l'horloge GPS ;
- connaissance de la position exacte du satellite ;
- traversée de l'ionosphère par le signal ;
- précision de résolution des équations de détermination de la position.

La précision finale s'exprime alors comme le produit des deux erreurs soit :

Erreur finale de position = GDOP * UERE

L'utilisation des systèmes de navigation pour des applications demandant un bon niveau de précision et a été freinée par la volonté de la part du Département de la Défense américain de détériorer volontairement le signal. Ces dégradations (SA) procuraient des erreurs de positionnement de l'ordre de 100 à 150 mètres.

1.1.4 Une performance accrue par une volonté d'ouverture

Cependant, depuis le 1er mai 2000, le Département de la Défense américain a décidé de supprimer cette perturbation en fixant le niveau de détérioration à zéro permettant l'essor des applications basées sur les systèmes de positionnement. Cette décision permet également d'obtenir une très bonne performance avec des systèmes autonomes, toute aussi bonne que par l'utilisation de système différentiels (DGPS), c'est-à-dire moins de 20 m dans 99% des cas et moins de 5 m dans 42% des cas. (OCHIENG, 2002).

Différentes techniques de compensations ont été développée pour les récepteurs autonomes afin d'augmenter encore leur précision comme des systèmes LADGPS (*Local Area Differential GPS*), WADGPS (*Wide Area Differential GPS*), WAAS (Wide *Area Augmentation System*) offrant une précision de l'ordre de 3 m.

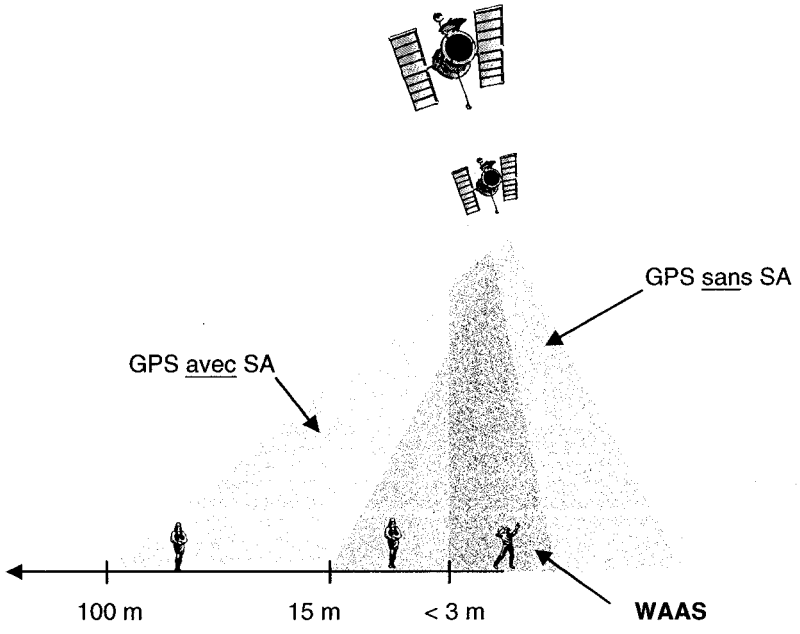


Figure 1.3 : Précisions des différents systèmes GPS

Ce regain de performance du système GPS a permis l'essor de nombreuses applications, tant dans le domaine personnel (système de navigation embarqué dans les automobiles) que dans le domaine du transport.

1.2 Les systèmes d'information géographiques (SIG)

Le développement des systèmes informatiques, des bases de données et les capacités graphiques grandissantes a permis l'essor des systèmes informationnels et des systèmes d'information géographiques dans de nombreuses activités de recherche et applications commerciales.

1.2.1 Définition d'un SIG

Le Federal Interagency Coordinating Committee (1998) définit un système d'information géographique comme « A system of computer, hardware, software, and procedures designed to support the capture, management, manipulation, analysis, and display of spatially referenced data for solving complex planning and management problems ».

Un SIG se veut avant tout un système informationnel. Il faut donc ajouter à ces composantes le personnel technique utilisé pour la gestion du système et qui sert de lien entre la réalité et le système informationnel (CHAPLEAU, 1992). On distingue ainsi cinq composantes interdépendantes d'un système informationnel :

- le personnel technique ;
- les procédures (ensemble des connaissances, méthodes et processus) ;
- le matériel ;
- les logiciels ;
- les bases de données.

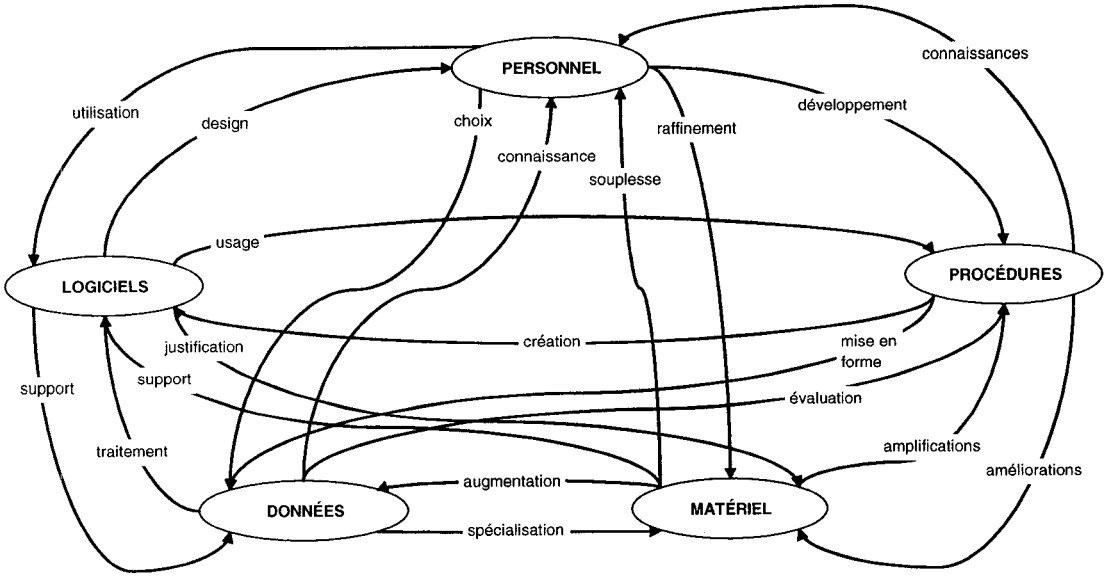


Figure 1.4 : Relations entre les éléments du système informationnel (TREPANIER, 1999)

Le terme SIG fait alors référence à une multitude et une variété de produits (TREPANIER 1999), dont on peut extraire trois grandes caractéristiques :

- la capacité cartographique ;
- le stockage et la manipulation de données (SGBD) ;
- la capacité et les outils d'analyse spatiale (requêtes, statistiques).

De par sa nature même, un SIG est appelé à stocker et à manipuler deux types de données : des éléments graphiques et des éléments non graphiques. Les éléments graphiques sont principalement des représentations digitales des caractéristiques d'une carte géographique et de ses icônes associés. Les éléments non graphiques sont quant à eux des caractéristiques, qualités et autres relations qui lient les différents objets graphiques.

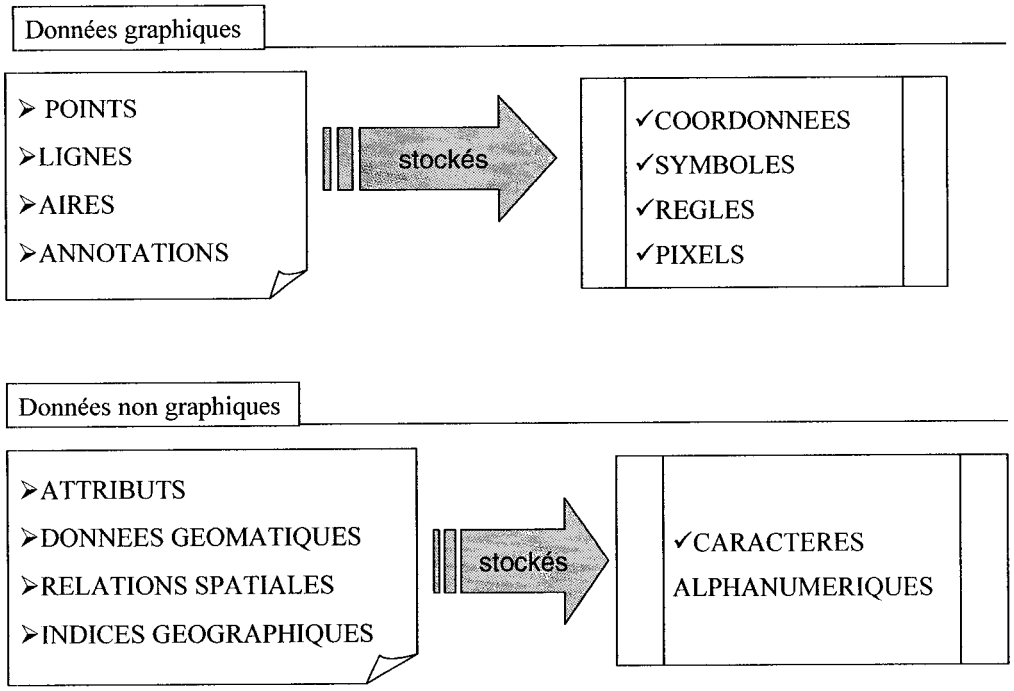


Figure 1.5 : Stockage des données dans un SIG (d'après LOGSDON, 1995)

1.2.2 Une modélisation de la réalité

Les aspects cartographiques et graphiques des SIG rendent leur utilisation très conviviale pour la représentation ou l'analyse de données spatiales. On distingue quatre formes de matérialisation des données (TREPANIER 1999) :

- la réalité : modélisation de phénomènes réels (routes) ;
- la topologie : utilisation d'éléments topologiques (points, lignes, surfaces) pour modéliser la réalité ;
- les modèles de bases de données : les bases de données servent à stocker les éléments topologiques ;
- le stockage physique des données : les gestionnaires de bases de données gèrent l'écriture/lecture sur des disques durs.

La visualisation est ensuite réalisée à l'aide d'une architecture multi-couches. Chacune des couches sert à la visualisation d'un type particulier de données (figure 1.6). Une couche contenant les relevés géodésiques (coordonnées) permet de maintenir les différentes couches à leurs bonnes places.

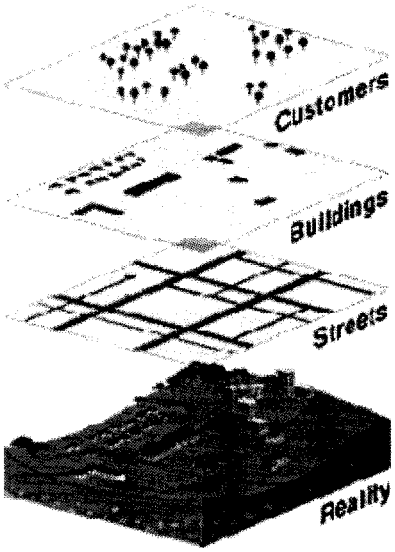


Figure 1.6 : Architecture multi-couches d'un SIG (source GIS.com)

1.2.3 L'utilisation des SIG dans le domaine du transport et de la logistique

Les récents développements technologiques ont permis d'accroître l'utilisation des SIG tant dans des projets de recherche que dans des applications commerciales. Les applications sont très variées et dépendent du niveau de détails requis pour l'analyse, du secteur d'activité rencontré ou du degré de dynamisme nécessaire.

Une première séparation des SIG peut être réalisée suivant le niveau de détails requis pour l'analyse. Dans une optique marketing, seule une vision globale est nécessaire et les SIG sont utilisés pour visualiser une agrégation de données dans un espace

relativement étendu. Il peut par exemple s'agir de l'évolution des ventes sur le territoire canadien.
La localisation d'une installation d'urgence fait appel à un niveau de détail plus élevé en utilisant généralement un réseau routier et les données qui le caractérise (ERKUT 2001). Cette deuxième application nécessite également l'utilisation de fonctions en accord avec le domaine d'exploitation (plus court chemin, couverture maximale).

Le domaine du transport est de plus un domaine particulier et même si les applications commerciales offrent de plus en plus de fonctionnalités, elles ne sont généralement pas adaptées aux problèmes opérationnels (CHAPLEAU ET AL.,1996). Le développement des systèmes d'information pour le transport (SIG-T) et orienté-objet (OO-SIG) permet de prendre en compte les spécificités du domaine, l'intégration des données opérationnelles ainsi que des différents acteurs le composant (DUEKER ET BUTLER, 2000). Ces acteurs, ou objets, sont basés sur une méthode d'analyse orientée-objet (RUMBAUGH, 1990), et sont regroupés en quatre méta-classes (TREPANIER ET CHAPLEAU, 2001) :

- les objets statiques ont une localisation fixe dans le temps et l'espace et ont un rôle de description du territoire (codes postaux) ;
- les objets dynamiques sont les acteurs du transport et contribuent à leur mouvement (une personne, un véhicule) ;
- les objets cinétiques sont des objets décrivent le mouvement (un chemin, un circuit) ;
- les objets systèmes représentent des groupes d'objets avec leurs différentes relations (réseau routier).

L'avènement des systèmes de positionnement et de communication impose une nouvelle difficulté d'intégration de données provenant de différentes sources, et donc de nature différente, au sein d'un même système. L'utilisation d'un système de positionnement GPS de plus en plus précis permet d'ajouter une composante en temps réel à l'outil d'analyse. Les systèmes de communication téléphonique fournissent quand à eux des

résultats immédiats ainsi qu'une rétroaction sur l'état véhicule. On retrouve cette utilisation conjointe de système de positionnement GPS, de système de communication téléphonique dans la gestion des flottes de véhicule (camionnage) au sein d'applications commerciales, ainsi que dans la gestion des véhicules d'urgences (DEREKENARIS, 2000).

1.2.4 Une intégration délicate

L'utilisation des SIG dans le domaine du transport et de la logistique nécessite ainsi une architecture et un formalisme particulier, un niveau de détails important et une intégration de données provenant de diverses sources. Outre les problèmes de formalisme discutés dans la section précédente (TREPANIER ET CHAPLEAU, 2001), plusieurs erreurs surviennent lors de l'intégration de carte provenant d'une multitude de standards et des visions de la part des concepteurs (NORONHA, 1999).
A ce sujet, les erreurs recensées sont :

- facteur d'échelle, niveau de précision, classification et topologie ;
- erreur d'alignement (coordonnées) ;
- nom des rues et adresses (géocodage) (par exemple : avenue se traduit par « av. » ou « av »)
- longueur des parcours.

Ces différentes imprécisions rendent ainsi l'intégration des données de positionnement très délicate et peuvent mener à des choix erronés lors de la recherche de coïncidence entre la position relevée et un objet du SIG.

1.2.5 Les applications commerciales

L'évolution des logiciels commerciaux dans le domaine de la gestion de flotte de véhicule et de routage a été conditionnée par ces nombreuses avancées technologiques

dans les domaines des systèmes d'information, des systèmes de positionnement et des systèmes de communication. Les concepteurs et vendeurs d'applications se sont emparés de ces technologies afin de développer de nouvelles solutions afin de rendre les entreprises plus compétitives.

Un des changements majeurs apparu dans ce domaine est l'apparition d'une certaine volonté d'ouverture afin de procurer aux clients des solutions mieux adaptées à leurs besoins souvent précis et très particuliers. De nombreuses compagnies offrent maintenant des librairies informatiques incorporant des contraintes classiques mais permettant également au client d'adapter son application à ses propres besoins. Cette nouvelle approche est motivée par le fait que généralement, les problèmes des entreprises sont bien plus compliqués que les problèmes académiques : ils possèdent des contraintes à chaque nœud et les heuristiques classiques ne sont pas toujours adaptées et efficaces dans ce type de problèmes (Hall, 2000).

Les capacités et les fonctionnalités des logiciels de tournées de véhicules se développent particulièrement dans trois secteurs d'activité :

- communication sans fil et localisation de véhicule ;
- intégration de la prise de commande et du système de confection des routes ;
- applications orientées Web.

Une nouvelle approche a également été développée dans l'architecture même des logiciels. En effet, dans les solutions traditionnelles, chaque mise à jour du système nécessitait la mise à jour de l'ensemble des stations et le temps de chargement des cartes ou des routes dépendait de chacune des stations. Elle suit celle de « .Net » développé par Microsoft en fournissant une architecture clients-serveurs qui permet l'installation d'un plug-in sur chaque station qui interagit avec l'application située sur le serveur.

La gamme de produits offerts sur le marché est vaste et les caractéristiques des applications sont très variées. L'évaluation peut être réalisée suivant quatre critères (Hall, 2002).

- **Algorithmique** : la majorité des algorithmes utilisés possèdent les outils de base comme l'ordonnancement d'arrêts sur une route, et presque tous sont capables d'affecter des arrêts à des routes et à des nœuds terminaux. L'affectation et l'ordonnancement des arrêts sur une route semblent être réalisés de manière simultanée, et non séquentielle. De plus, l'ensemble des calculs se fait à partir de la distance réelle sur le réseau. Cependant, les algorithmes sont pour la plupart propriétaires et sont différentiés en fonction de la taille des problèmes. Ainsi, certains sont limités à 10 000 arrêts et d'autres mettent en avant une taille illimitée de problème.

  La majorité des logiciels permettent également le routage en temps réel, c'est-à-dire lorsque le véhicule est en mouvement, ou à moindre mesure sur une base quotidienne. Environ la moitié des logiciels commerciaux présentés sont conçus pour la planification de routes futures.

- **Interface et caractéristiques** : d'un point de vue graphique et fonctionnel, l'ensemble des logiciels permettent la visualisation des routes et des arrêts sur une carte géographique et la de nombreux logiciels permettent l'édition et la modification par un simple « Glisser et Déplacer ». Cependant, un tel outil nécessite bien évidemment l'utilisation de cartes géographiques qui sont généralement vendues séparément. Il est également intéressant de noter que certains logiciels permettent l'utilisation de carte de différents standards.

  Certains produits permettent finalement l'intégration d'outils de communication et de localisation de véhicule afin d'intégrer des données temps réel.

- **Applications** : même si les applications semblent très diverses à première vue, les logiciels sont généralement très spécialisés. Cette spécialisation est dictée par les

interfaces, tant au niveau de la présentation des données que dans l'interaction avec d'autres logiciels (type ERP). Certains se spécialisent dans le domaine de la distribution de boisson, d'autres dans le domaine manufacturier.
A l'opposé, certains produits tentent de rester généraux et se démarquent en proposant une librairie d'optimiseurs plutôt qu'une famille d'interfaces.

- **Coûts** : les prix de tels logiciels sont très variables. Il faut ainsi s'attendre à payer bien plus de $10 000 US pour le logiciel seulement. Les cartes et autres données sont généralement vendues séparément. Le coût d'un logiciel n'inclue généralement pas non plus l'installation ou la formation du personnel, mais semble être généralement négociable suivant le nombre de licences ou les tailles des problèmes résolus.

Il important de noter que ces applications commerciales sont conçues pour traiter des problèmes de gestion et de tournées de véhicules sur les nœuds uniquement, problématique largement rencontrée dans les entreprises du secteur privé.

1.3 Les problèmes de tournées sur les arcs

On distingue, tant dans la littérature que dans les problèmes réels rencontrés, deux besoins en matière de tournées de véhicules. Le premier consiste à visiter ou acheminer un produit à un ensemble de nœuds du réseau. Cette première catégorie, dénommée Problème de Tournées de Véhicule (*Vehicle Routing Problem*) englobe une grande variété de problèmes allant du Problème du Voyageur de Commerce à des problèmes de tournées avec capacité et fenêtre de temps. Cette modélisation est bien adaptée lorsque la demande des clients est ponctuelle et localisée en un endroit précis. Largement traité dans la littérature, ce problème est adapté à la plupart des problèmes des entreprises privées. Lorsque la demande se situe sur les arcs, on parle de Tournées sur les Arcs (*Arc Routing Problem*). Cette problématique se matérialise notamment dans des problèmes de déneigement, d'épandage de sel sur les routes, de ramassage des ordures ménagères

ou de la surveillance du réseau routier. Ce problème apparaît également dans la littérature sous plusieurs formes et n'en demeure pas moins très varié car agrémenté de contraintes de capacité ou de fenêtres de temps.

Une deuxième segmentation est effectuée entre les problèmes non orientés où le coût (distance) d'aller d'un point A à un point B est le même que celui d'aller du point B au point A, et les problèmes orientés où ces coûts sont différents. Les problèmes de tournées sur les arcs sont généralement des problèmes très difficiles à résoudre (NP-Difficile) même dans le cas non orienté. Ainsi, il n'existe que très peu de méthodes exactes permettant de résoudre des problèmes de grande taille dans des temps raisonnables (temps polynomial).

Le problème de monitoring du réseau routier se définit ainsi comme un problème de tournées sur les arcs, utilisant un graphe orienté, et soumis à une contrainte de capacité (celle du véhicule). Mais, avant de s'intéresser proprement dit à ce type de problème, il est nécessaire de s'attacher aux concepts et algorithmes élémentaires sous-jacents permettant de maîtriser les différents concepts permettant d'entrevoir une résolution.

1.3.1 Les problèmes de plus courts chemins

Un des premiers fondements sur lequel repose la résolution des problèmes de tournées sur les arcs est la connaissance des plus courts chemins entre les différents nœuds du réseau. Cette connaissance est cruciale lors de la résolution de l'équilibrage du graphe dans le cas d'un problème de Postier Chinois ou Rural, dans la détermination de la tournée proprement dite, et permet également l'obtention d'un graphe réduit, base de nombreux algorithmes.

1.3.1.1 Plus court chemin d'un nœud à tous les autres

Le problème du plus court chemin d'un nœud à tous les autres consiste à trouver, à partir d'un nœud défini comme étant la source, la distance et le chemin le plus court pour se rendre à tous les autres nœuds du réseau.
L'algorithme le plus répandu pour traiter ce problème, lorsque les coûts sur les arcs sont positifs, est un algorithme d'étiquetage développé par Dijkstra et connu sous le même nom (DIJKSTRA, 1959).

Soit G = (N, A) un graphe orienté où N représente l'ensemble des nœuds et A l'ensemble des arcs. L'algorithme de Dijkstra repose sur deux catégories de nœuds : les nœuds marqués S et les nœuds non marqués $\overline{S}$. A chaque itération, l'algorithme identifie le nœud non marqué ayant la plus petite valeur d'étiquette (d) et lui associe une marque permanente, puis met à jour la valeur de l'étiquette des nœuds incidents A(i) (nœuds pour lequel il existe un arc provenant du nœud considéré) en fonction de la valeur de l'étiquette et du coût de l'arc (c_{ij}). Pour chaque nœud, l'algorithme maintient le prédécesseur au nœud considéré (pred(i)) dans le plus court chemin. A chaque itération, la valeur de l'étiquette représente une borne supérieure du plus court chemin du nœud source vers tous les autres noeuds. L'algorithme se définit comme suit (d'après AHUJA, 1993) :

Début

$S := \varnothing ; \bar{S} := N$

Pour chaque noeud, $d(i) := \infty$

Pour la source S, $d(s) := 0$ et $pred(s) := 0$

Faire tant que $|S| < |N|$

Début

soit i le noeud pour lequel $d(i) = \min \{d(j) : j \in \bar{S}\}$

$S := S \cup \{i\}$;

$\bar{S} := \bar{S} - \{i\}$;

Pour chaque arc $(i, j) \in A(i)$ faire

si $d(j) > d(i) + cij$ alors $d(j) := d(i) + cij$ et $pred(j) := i$

Boucle

Fin

Fin

L'exemple de la figure 1.7 illustre l'application de cet algorithme.

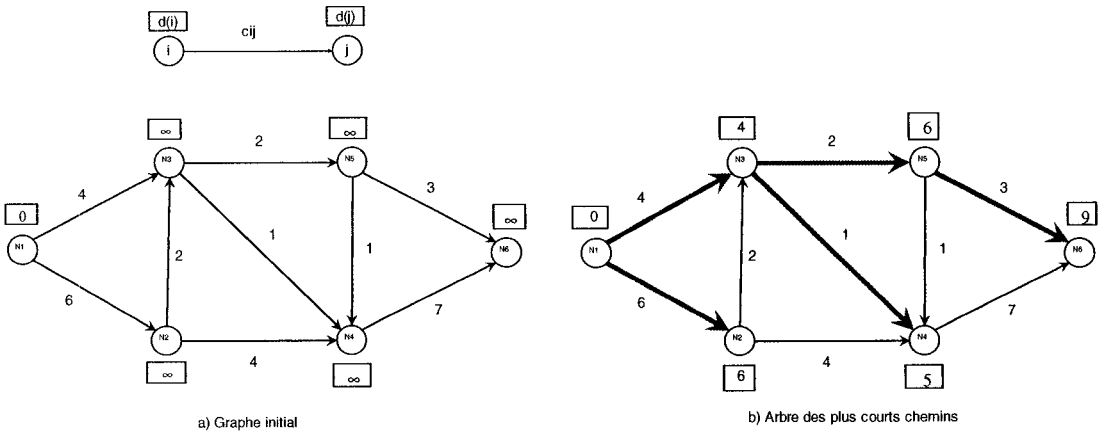


Figure 1.7 : Application de l'algorithme de Dijkstra

Il existe différentes variantes d'implémentation de cet algorithme. Certaines utilisent deux marquages des nœuds, un marquage temporaire et un marquage permanent. Cette méthode permet d'accélérer la recherche du prochain nœud à considérer en n'évaluant

que les nœuds marqués temporairement. D'autres méthodes utilisent une structure de donnée et de tri particulière qui accélèrent encore la recherche du prochain nœud à considérer (JOHNSON, 1977).
Le résultat de l'algorithme de Dijkstra est un arbre des plus courts chemins à partir du nœud source.

Une variante de l'algorithme de Dijkstra permet de déterminer l'arbre des plus courts chemins de chaque nœud vers un nœud puits. Cette variante maintient à chaque itération une borne supérieure du plus court chemin d'un nœud vers le nœud puits et considère les arcs entrants au nœud considéré à la place des arcs sortants. La figure 1.8 illustre l'application de cette variante.

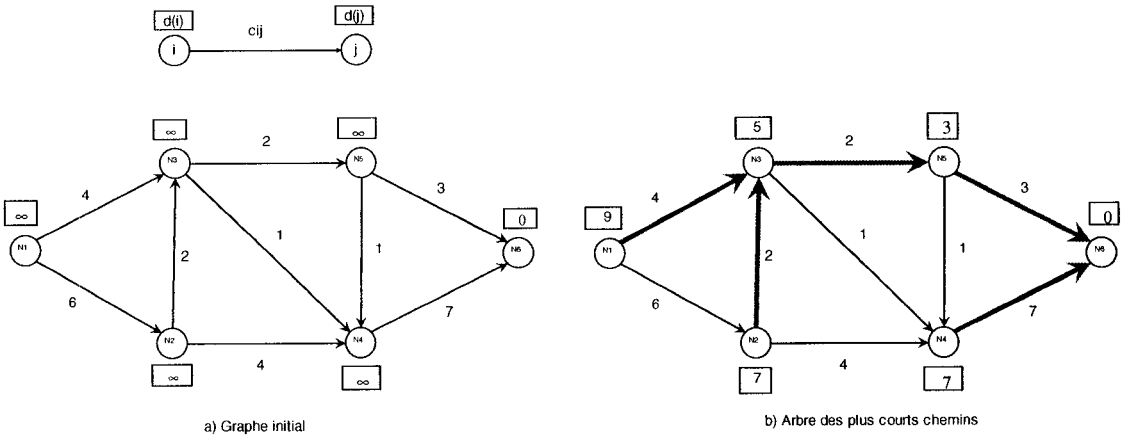


Figure 1.8 : Application de l'algorithme de Dijkstra inverse

L'algorithme de Dijkstra inverse fournit ainsi l'arbre de plus court chemin de tous les nœuds vers un nœud puits. Il fournit aussi une anti-arborescence dirigée vers le nœud puits (enracinée au nœud puits). Cette anti-arborescence permet, en l'empruntant, de se diriger de n'importe quel nœud vers le nœud puits de la façon la plus courte.

1.3.1.2 Plus courts chemins entre tous les nœuds

Si le graphe considéré ne contient que des coûts positifs, le problème des plus courts chemins entre tous les nœuds peut être résolu en utilisant *n* répétitions de l'algorithme de Dijkstra (*n* étant le nombre de nœuds du graphe). Un autre algorithme généralement utilisé, celui de Floyd-Warshall permet de trouver les plus courts chemins entre tous les nœuds même si les coûts sont de signes quelconques. Il utilise une matrice de distance d[i,j] entre chaque paire de nœuds (une distance infinie est assignée si aucun n'arc n'existe entre i et j) et maintient un prédécesseur pour chaque paire de nœud pred[i,j] qui représente le nœud précédent à j dans le plus court chemin de i à j. L'algorithme de Floyd-Warshall peut être défini comme suit (d'après AHUJA, 1993) :

Début

Initialisation

Pour chaque paire de noeud (i, j) faire

$d[i, j] := \infty$ et $pred[i, j] := 0$

Boucle

Pour chaque noeud faire $d[i, i] := 0$

Pour chaque arc (i, j) faire

$d[i, j] := cij$ et $pred[i, j] := i$

Boucle

Mise à jour

Pour k = 1 à n faire

Pour chaque paire de noeud (i, j) faire

si $d[i, j] > d[i, k] + d[k, j]$ alors

Début

$d[i, j] := d[i, k] + d[k, j]$

$pred[i, j] := pred[k, j]$;

fin

Suivant

Fin

L'algorithme de Floyd-Warshall fournit la distance du plus court chemin entre chaque paire de nœuds ainsi qu'un prédécesseur. Ce prédécesseur, qui représente l'avant dernier nœud dans le plus court chemin considéré, sert à définir de manière itérative ce chemin. L'algorithme présenté ci-dessous permet de remonter le chemin à partir du dernier nœud.

Début
Soit C le plus court chemin
i, j les deux noeuds du chemin considéré
$C := \varnothing$
si pred[i, j] <> 0
$C := \{j\} \cup C$
    Faire tant que i <> pred[i, j]
    j := pred[i, j]
    $C := \{j\} \cup C$
    Boucle
Fin

Il est à noter que dans le cas de problématique de transport sur réseau routier, les coûts sur les arcs représentent généralement les distances sur le réseau et sont donc positifs. Ainsi, l'utilisation de l'un ou l'autre de ces deux algorithmes est équivalent car du même ordre de complexité ($O(n^3)$ pour Floyd-Warshall et $n*O(n^2) = O(n^3)$ pour *n* répétitions de Dijkstra). La complexité n'inclut cependant pas la recherche du chemin en tant que tel à l'aide des prédécesseurs.

1.3.2 Le problème du Postier Chinois

Le problème du Postier Chinois se retrouve dans de nombreuses applications pratiques comme la distribution du courrier, le ramassage des ordures ménagères ou la validation de liens sur les pages Web (THIMBERLY, 2000) et est de fait très présent dans la littérature (EISELT, 1995). Introduit pour la première fois par le mathématicien chinois Guan (GUAN, 1962) il se définit comme suit : « un facteur doit couvrir toutes les rues qui lui sont assignées avant de retourner au bureau de poste. Le problème est de trouver le circuit à distance minimale que doit emprunter le facteur ». Il s'agit donc de déterminer un circuit couvrant au moins une fois l'ensemble des arcs du réseau.

Dans le cas d'un graphe orienté, l'existence d'une solution au problème du Postier Chinois repose sur deux caractéristiques du graphe :

- le graphe est fortement connexe, c'est-à-dire qu'il existe un chemin entre toutes paires de nœuds ;
- le graphe est Eulérien.

1.3.2.1 Graphe Eulérien

Cette caractéristique a été pour la première fois introduite par Euler en 1736 (NEWMAN 1953) comme récréation mathématique dans la ville de Königsberg (aujourd'hui Kaliningrad). Le problème, représenté à la figure 1.9, consiste à trouver un trajet ne traversant qu'une seule fois chacun des sept ponts traversant la rivière Pregel.

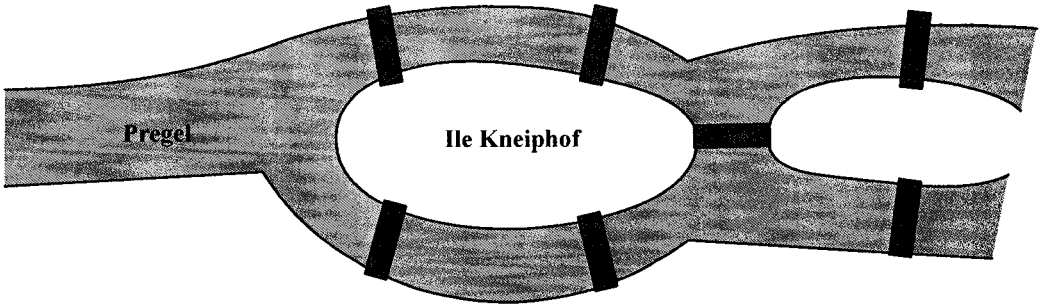


Figure 1.9 : Les sept ponts de Königsberg

Cette problématique mène à la définition d'un graphe Eulérien (FORD ET FULKERSON, 1962) : « un graphe est Eulérien si il existe un chemin (circuit) qui ne passe qu'une seule fois par chaque arête / arc ».

Les conditions pour obtenir un graphe Eulérien sont :

- si le graphe G est non orienté : G est connexe et chaque nœud doit être de degré pair, c'est-à-dire posséder un nombre pair d'arêtes incidentes ;
- si le graphe G est mixte, c'est-à-dire possédant des arcs et des arêtes : chaque nœud doit être incident à un nombre pair d'arcs et d'arêtes et pour toutes partitions des nœuds $\{S\,\overline{S}\}$, $|arête\,\{S\,\overline{S}\}| \geq |arcs\{S \rightarrow \overline{S}\} - arcs\{\overline{S} \rightarrow S\}|$
- si le graphe G est orienté : G est fortement connexe et le degré entrant et le degré sortant doivent être égaux, c'est-à-dire que le nombre d'arcs entrants et le nombre d'arcs sortants de chaque sommet doivent être égaux, ce qui se traduit par un degré net nul.

Cette condition nécessaire et suffisante montre que le problème des ponts de Königsberg n'admet pas de solution car l'île Kneiphof possède un degré impair.

1.3.2.2 Résolution du Problème du Postier Chinois

Dans le cas de notre étude, nous ne nous intéressons qu'aux problèmes orientés. Dans ce cas précis, le problème peut être résolu en temps polynomial et la résolution s'effectue en deux étapes.

Étape 1 : rendre le graphe Eulérien.

Étape 2 : construire une tournée commençant et se terminant à un nœud préalablement sélectionné.

La première étape consiste à identifier les nœuds déséquilibrés puis à déterminer un équilibrage à moindre coût en dupliquant des arcs reliant ces noeuds. Cette problématique revient alors à résoudre un problème de transport entre les nœuds

négativement déséquilibrés et les nœuds positivement déséquilibrés (EDMONDS ET JOHNSON, 1973 et ORLOF, 1974).

Soit D l'ensemble des nœuds déséquilibrés positivement, i.e où le nombre d'arcs sortants excède le nombre d'arcs entrants

Soit O l'ensemble des nœuds déséquilibrés négativement, i.e où le nombre d'arcs entrants excède le nombre d'arcs sortants.

$d^+(i)$ est le degré sortant d'un nœud, $d^-(i)$ son degré entrant.

c_{ij} représente le coût (distance) du plus court chemin de i à j.

x_{ij} représente le nombre de fois qu'un chemin (i,j) doit être dupliqué.

$$\text{Miminiser} \sum_{i \in O} \sum_{j \in D} c_{ij} x_{ij}$$

$$\text{Sous contraintes :}$$

$$\sum_{j \in D} x_{ij} = d^-(i) - d^+(i) \quad \forall i \in O$$

$$\sum_{i \in O} x_{ij} = d^+(i) - d^-(i) \quad \forall j \in D$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad \forall i \in O, j \in D$$

Pour le problème du transport, il a été démontré que si l'offre et la demande (dans notre cas la valeur absolue du déséquilibre) est entière, la solution est entière et donc x_{ij} sera entier.

Le résultat implique la duplication des arcs (i,j) un nombre de fois égal à x_{ij} si on travaille sur un graphe des plus courts chemins, où la duplication des plus courts chemins (i,j) un nombre de fois égal à x_{ij} si on travaille sur le graphe complet. La figure 1.10 illustre l'application de la méthode des transports à un graphe orienté.

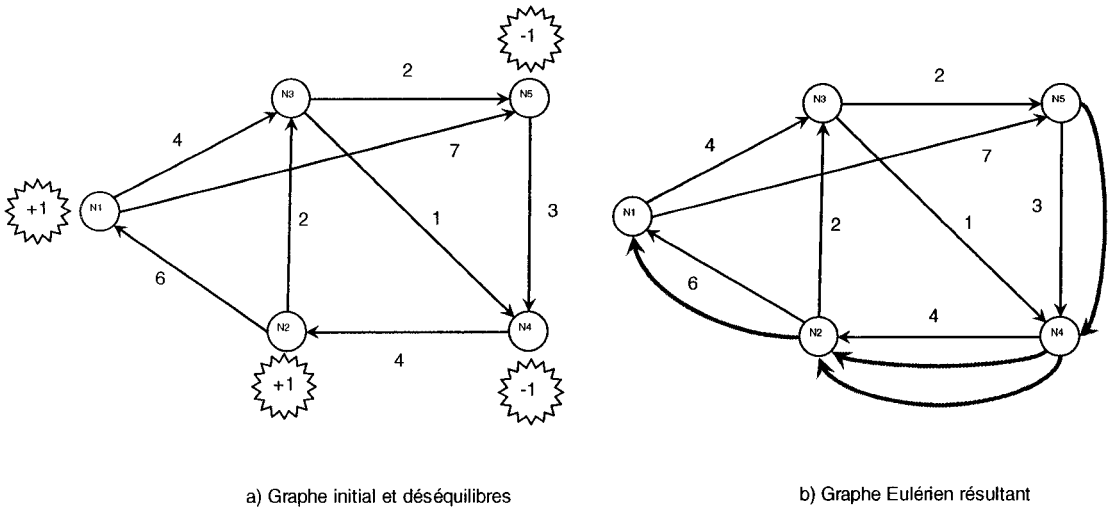


Figure 1.10 : Exemple de transformation d'un graphe en un graphe Eulérien

Cette manière de procéder nécessite l'utilisation d'un optimiseur ou d'une librairie permettant de résoudre des programmes linéaires. D'autres méthodes de flot minimum ou d'augmentation de flot (THIMBLEBY, 2000) permettent de résoudre ce problème de manière autonome, c'est-à-dire sans l'utilisation d'un solveur mathématique.

La deuxième étape de résolution du problème du Postier Chinois consiste à déterminer une tournée à partir d'un nœud préalablement sélectionné. Différentes méthodes sont applicables pour déterminer une telle tournée (CHRISTOFIDES 1975). Une des ces méthodes consiste à déterminer une anti-arborescence enracinée au nœud sélectionné comme point de départ (et d'arrivée) de la tournée. Puis, à chaque nœud, de ne choisir un arc de cette arborescence que si aucun autre arc sortant n'est disponible (VAN AARDENNE-EHREBFEST ET BRUIHN, 1951).

Cette méthode se décrit comme suit :

1. construire une anti-arborescence enracinée à un nœud v du graphe ;
2. ordonner et numéroter les arcs sortants de v de façon arbitraire, ordonner et numéroter les arcs sortants de n'importe quel nœud de façon arbitraire de telle sorte que le dernier arc numéroté fasse partie de l'anti-arborescence ;
3. construire une tournée débutant en v en utilisant, pour quitter n'importe quel nœud, l'arc non encore parcouru ayant le plus petit numéro.

1.3.3 Le problème du Postier Rural

Le problème du Postier Rural découle de la problématique précédente et de la constatation que rares sont les applications où il est nécessaire de visiter tous les arcs du réseau. On définit ainsi un sous-ensemble d'arcs, dits arcs obligatoires, devant être visités. La problématique est semblable au cas précédent, à savoir trouver la tournée de longueur minimale mais qui visite au moins une fois les arcs obligatoires. Comme dans le cas précédent, cette thématique fait l'objet de nombreux travaux (ORLOFF, 1974 et EISELT 1995) et n'en demeure pas moins un problème très difficile à résoudre (NP-Difficile) même dans le cas de graphe non orientés.

La résolution du problème du Postier Rural repose sur deux fondements :

- l'obtention d'un graphe connexe ;
- l'obtention d'un graphe Eulérien afin de pouvoir en déduire une tournée.

Le deuxième de ces fondements est comparable à celui invoqué dans le cas du problème de Postier Chinois est peut ainsi être modélisé et résolu par un problème de transport. Par contre, la nécessité d'obtenir un graphe connexe à partir d'un graphe qui ne l'est a priori pas traduit la principale difficulté de ce problème. En effet, l'ensemble des arcs obligatoires représente un graphe qui n'a généralement aucune des caractéristiques

mentionnées ci-dessus. Il y a donc une nécessité d'ajouter des arcs du graphe initial afin d'obtenir un graphe connexe et Eulérien.

Il existe ainsi différentes modélisations mathématiques sous forme de programme linéaire menant à la résolution par méthode exacte (CHRISTOFIDES, 1986) mais la complexité du problème lié à sa taille et aux points mentionnés précédemment n'en permettent pas une utilisation facile. Cette grande difficulté a amené le développement d'heuristiques permettant une résolution efficace en un temps acceptable (EISELT, 1995).

Parmi les différentes méthodes proposées, l'heuristique développée par Christofides et al. permet d'obtenir de très bon résultats et se traduit comme suit (CHRISTOFISES et al., 1986).
On définit le graphe d'origine G = (N, A) et $R \subset A$, l'ensemble des arcs obligatoires.
On en dérive le graphe G' = (N', A') le graphe des plus courts chemins.
$G_1, \ldots G_p$ représente les composantes connexes induites par les arcs obligatoires.
Ensuite :

1. construire une arborescence de longueur minimale enracinée à n'importe quel nœud et reliant les différentes composantes connexes. Soit $\overline{G}$ le graphe résultant (arborescence de longueur minimale) ;
2. en déduire un graphe Eulérien en ajoutant les arcs d'une façon minimale de telle sorte que pour chaque nœud, le nombre d'arcs entrants et sortants soit égal (problème de transport) ;
3. déterminer une tournée sur le graphe précédent (circuit Eulérien).

D'autres procédures permettent d'obtenir une solution viable mais elles se basent toutes sur les deux fondements énoncés précédemment, à savoir l'obtention d'un graphe connexe et Eulérien. Cette optique est matérialisée par l'heuristique « *connect-and-balance* » développée par Ball & Magazine (BALL, 1988) et illustrée à la figure 1.11.

Soit G_R = (N, R) le graphe des arcs obligatoires. On définit A_C comme l'ensemble des arcs à ajouter pour rendre le graphe augmenté connexe :

1. identifier les composantes connexes de G_R, si G_R est connexe, alors $A_C = \phi$ et aller à l'étape 3 ;
2. sélectionner un ensemble d'arcs de telle sorte que $R \cup A_c$ soit connexe ;
3. résoudre un problème de flot sur le réseau afin de sélectionner un ensemble d'arcs A_B qui rende le graphe équilibré ;
4. identifier un circuit sur le graphe augmenté.

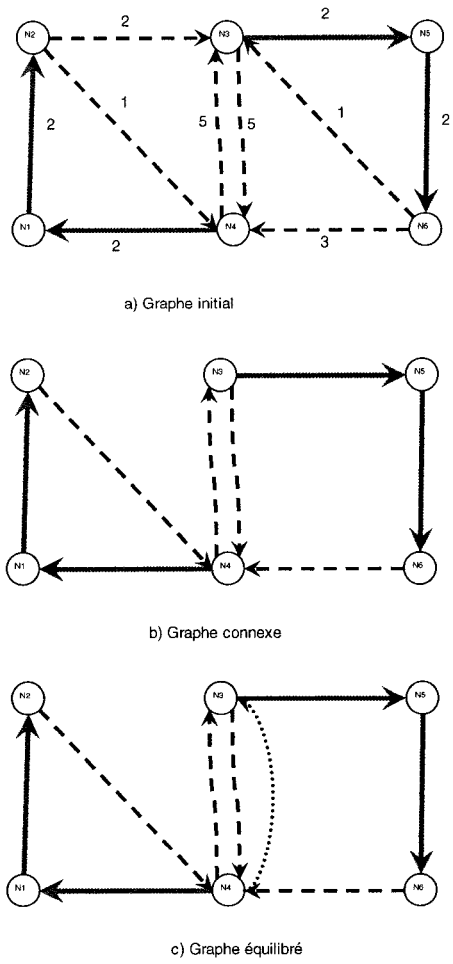


Figure 1.11 : Exemple d'utilisation de l'algorithme "*connect-and-balance*"

On s'aperçoit dans cet exemple simple qu'un meilleur choix d'arcs est possible afin de rendre le graphe connexe et Eulérien. La figure 1.12 illustre ce choix.

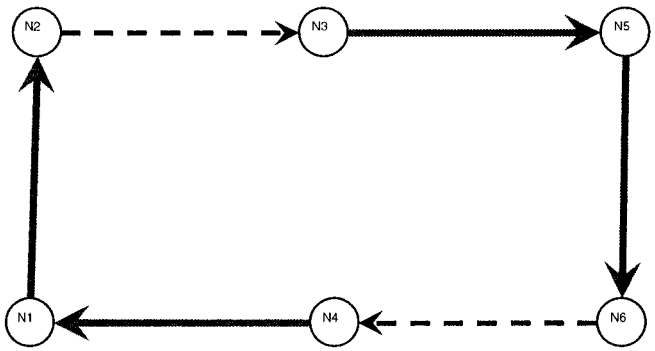


Figure 1.12 : Exemple d'un meilleur choix d'équilibrage du réseau

1.3.4 Les problèmes de tournées sur les arcs avec capacité

Les problèmes de tournée sur les arcs avec capacité (*Capacited Arc Routing Problems*) sont une généralisation des problèmes mentionnés précédemment. La généralisation de cette catégorie de problème, nommée Problème du Postier Rural avec Capacité, possède une définition similaire au problème décrit précédemment mais en ajoutant une contrainte sur la capacité totale du véhicule. Le respect de cette contrainte additionnelle complique encore plus un problème déjà difficile à résoudre. Cette spécificité inclut également une définition d'une caractéristique en terme de capacité sur chacun des arcs. Cette caractéristique est généralement établie par une « durée de service » propre aux arcs obligatoires.

Les principaux travaux de recherche dans ce domaine ont été réalisés sur des graphes non orientés. Le caractère NP-Difficile du problème a donné naissance à des heuristiques qui peuvent être regroupées en trois catégories :

- **Les méthodes constructives simples.** Ces méthodes consistent à construire des tournées admissibles en utilisant différentes règles de décisions : méthode gloutonne ou « *path-scanning algorithm* » (GOLDEN, 1983), en s'assurant que le retrait d'une tournée de déconnecte pas le graphe (CHRISTOFIDES, 1973) ou encore en fusionnant différents cycles en se basant sur les économies de Clarke & Wright (GOLDEN, 1981). On retrouve également des méthodes d'insertion d'arêtes dans les tournées (CHAPLEAU, 1984) ;

- **Les méthodes constructives à deux phases**. Ces procédures peuvent être classifiées en deux classes : la première, « Tournée & Groupes » (*Route-First, Cluster-Second*), qui consiste à l'obtention d'une grande tournée qui sera par la suite découpée en de multiples circuits respectant la capacité (ULUSOY, 1985), et la deuxième « Groupes & Tournées » (*Cluster-First, Route-Second*) où les arcs sont préalablement regroupées en grappes respectant la capacité puis une tournée est construite sur chacune de ces grappes (BENAVENT, 1990).

- **L'adaptation de méta-heuristiques**. Il s'agit de méthodes de recherche locale (tabou, recuit simulé) utilisées dans la résolution de problèmes sur les nœuds adaptés à des problèmes de tournées sur les arcs (EGLESE, 1994 et HERTZ, 2000).

Le problème peut, dans le cas orienté, être modélisé comme suit (DROR ET LEUNG, 1998 et DROR ET LANGEVIN, 2000) :

q_{ij} = demande le long de l'arc (i, j) $\in$ R

Q_v = capacité du circuit (véhicule) v

c_{ij} = coût d'un arc (i, j) $\in$ A ($c_{ij} \geq 0$)

x_{ij}^v = nombre de fois qu'un arc (i, j) $\in$ A est traversé par le circuit v

V = limite supérieure du nombre de circuit

$$y_{ij}^v = \begin{cases} 1 \text{ si l'arc (i, j)} \in \text{R est couvert par le circuit } v \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

0 est le noeud correspondant au dépôt

$$\min \sum_{(i,j)\in A} \sum_{v=1}^{V} c_{ij} x_{ij}^v$$

$$S.C$$

$$\sum_{k\in N} x_{ki}^v - \sum_{k\in N} x_{ik}^v = 0 \quad \forall i \in N, v = 1, 2, \ldots, V$$

$$\sum_{v=1}^{V} y_{ij}^v = 1, \forall (i, j) \in R$$

$$\sum_{(i,j)\in R} q_{ij} y_{ij}^v \leq Q_v \quad v = 1, 2, \ldots, V$$

$$x_{ij}^v \geq y_{ij}^v, \forall (i, j) \in R, v = 1, 2, \ldots, V$$

$$M \sum_{i\notin N[S], j\in N[S]} x_{ij}^v \geq \sum_{(j,k)\in S} x_{jk}^v, \begin{cases} \forall S \subseteq R \\ 0 \notin N[S] \\ v = 1, 2, \ldots, V \end{cases}$$

$$y_{ij}^v \in \{0,1\}, \forall (i, j) \in R, v = 1, 2, \ldots, V$$

$$x_{ij}^v \in Z^+, \forall (i, j) \in A, v = 1, 2, \ldots, V$$

M est une grande constante, N[S] est l'ensemble des noeuds incidents à un ensemble de noeuds S

Cependant, dû à la grande complexité du problème, les travaux menés jusqu'à présent se limitent à l'adaptation des méthodes développées dans le cadre non orienté pour des graphes orientés (MITTAZ, 1999). Mais, la spécificité du parcours unidirectionnel des arcs entraîne des complications dans l'adaptation de ces méthodes.

Une autre avenue explorée par les chercheurs consiste en une transformation de problème sur les arcs en problèmes sur les nœuds (LAPORTE, 1997). La résolution de cette transformation, qui a pour principal désavantage d'augmenter considérablement la taille du problème, a notamment été envisagée à l'aide de la méthode de génération de colonne, voir Dror et Langevin (2000) pour une revue de cette approche. Cependant, il ne faut pas perdre de l'esprit que même si cette méthode est très puissante, elle n'en reste pas moins très délicate à mettre en œuvre et fait appel à des experts dans le domaine.

CHAPITRE 2 : MODÉLISATION INFORMATIONNELLE ET MATHÉMATIQUE DES OPERATIONS

Même si la finalité de résolution d'un problème opérationnel est d'obtenir un résultat, un extrant, matérialisé dans le cas présent par un circuit à emprunter, il est nécessaire de conserver une vision globale du problème dans l'analyse à effectuer afin de maîtriser l'ensemble des différentes caractéristiques des acteurs et de leurs interactions. Ce chapitre vise à présenter une méthodologie d'analyse et de modélisation des activités liées au monitoring du réseau routier afin de mener au développement d'un modèle mathématique en adéquation avec les contraintes et composantes informationnelles régissant le système.

Cette approche est réalisée en trois étapes : une définition globale du problème est tout d'abord élaborée au niveau informationnel à l'aide de diagrammes de flux de données, qui mèneront dans une deuxième étape au développement d'un modèle objet servant à définir, mettre en forme et offrir un méthode de résolution du problème de planification des activités. La caractérisation informationnelle du problème permettra dans une étape ultime d'adapter des outils mathématiques existants afin de prendre en compte cette importante quantité d'information et de fournir des solutions opérationnelles qui seront acceptées par les usagers.

2.1 Une vision globale : l'approche par Diagramme de Flux de Données

L'approche privilégiée dans l'étude d'un processus en vue du design informationnel est similaire à l'approche système utilisée dans le domaine de la production manufacturière. Si dans ce dernier, nous nous intéressons à la caractérisation des flux de production afin de concevoir un système efficace, il s'agit dans ce cas d'identifier et de caractériser les

différentes composantes intervenant dans le cheminement de l'information au travers du processus. Cette modélisation est réalisée à l'aide d'un outil graphique, appelé Diagramme de Flux de Données.

2.1.1 Les éléments d'un DFD

Le Diagramme de Flux de Données se veut un outil graphique permettant une caractérisation et une définition de la circulation de l'information. Il vise à répondre aux questions « Quoi ? Quelles données circulent ? Quelles transformations sont effectuées sur ces données ? Par qui ? » qui permettront l'analyse et l'amélioration du traitement de l'information en vue du design d'un système informationnel (RIVARD, 2001). Cette modélisation, régie par une symbolique et par des règles de construction, regroupe les cinq grandes composantes d'un système informationnel (CONNOLLY, 2000) :

- le processus sert à représenter une fonction que le système doit effectuer et qui est exprimée en termes d'actions accomplies par les ressources de l'organisation (facturation, assignation d'un circuit) ;
- l'entité externe représente un sous-système relié à l'environnement du système décrit et peut représenter une personne, une institution ou un objet ;
- le dépôt sert à conserver tout ce qui circule au sein du système étudié par l'intermédiaire des flux de données ;
- le flux d'information qui représente le mouvement ou la circulation de l'information;
- la ressource qui sert à la mise en œuvre des processus.

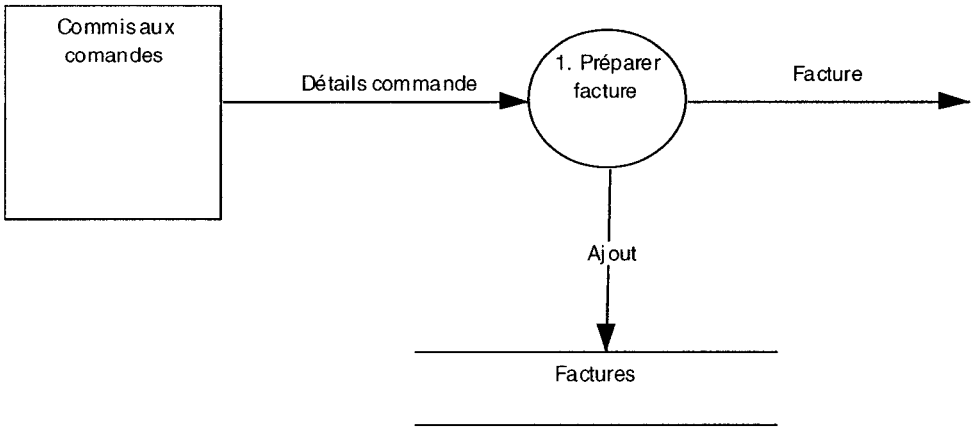


Figure 2.1 : Exemple de représentation d'un processus par DFD

Il existe différents formalismes pour la représentation d'un Diagramme de Flux de Données. Parmi eux, les plus utilisés sont Ward et Mellor, Yourdon et DeMarco, Merise ou Gane-Sarson. De plus, afin de faciliter l'étude et la compréhension, les processus complexes sont éclatés sous forme d'un autre diagramme afin de décrire la décomposition d'un processus en sous processus. L'ensemble des processus et des sous processus forment ainsi un arbre des processus. Nous utiliserons dans cette analyse le formalisme de Gane-Sarson.

2.1.2 Analyse des activités liées au monitoring du réseau routier

L'analyse des activités liées au monitoring du réseau routier ne se limitent pas simplement au parcours du réseau et à la détection des incidents mais englobent différentes tâches de planification, d'analyse et de traitement. On peut ainsi séparer le processus en quatre sous processus :

1. la planification des opérations ;
2. le monitoring du réseau ;
3. le traitement des incidents ;
4. l'analyse des activités.

La figure 2.2 représente le contexte du DFD, utilisant une vue d'ensemble du processus des activités liées au monitoring. Chacun des 4 processus est ensuite « éclaté » afin d'en faire ressortir les caractéristiques informationnelles.

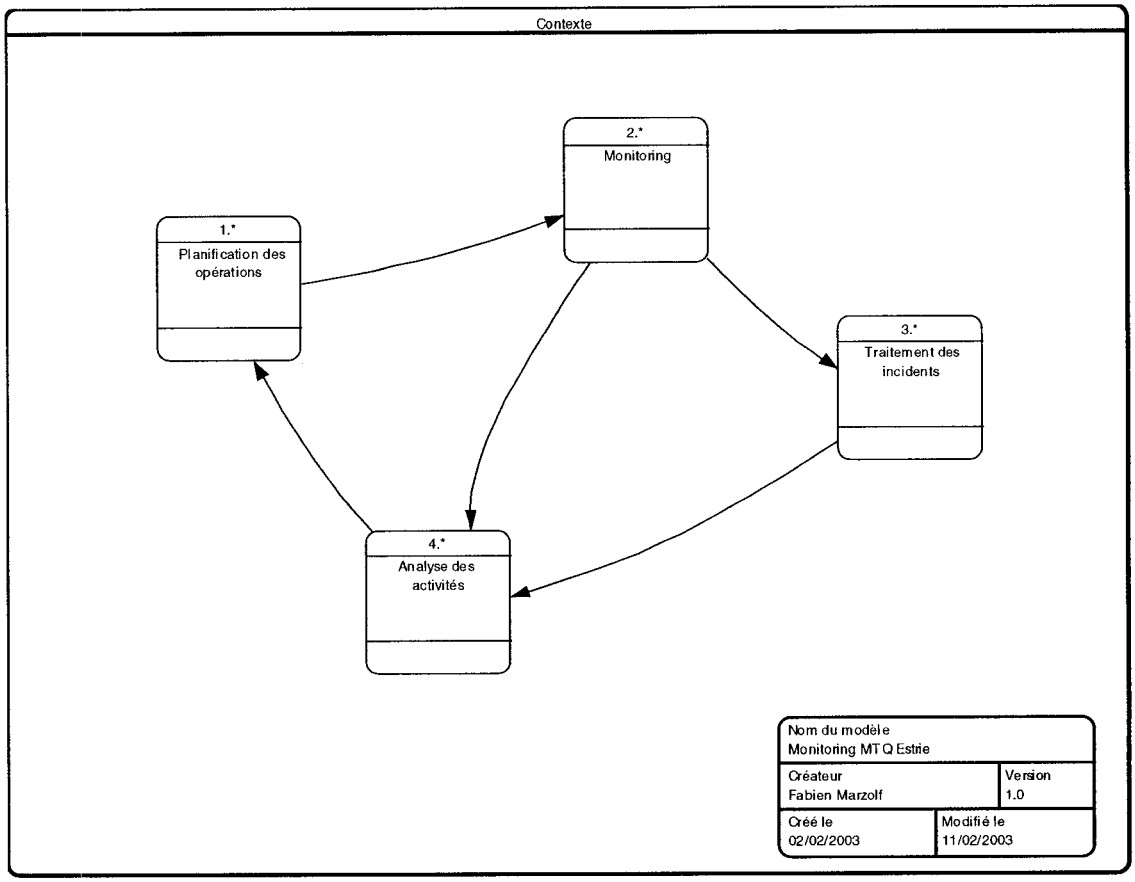


Figure 2.2 : Contexte du processus (DFD)

Cette segmentation « naturelle » découle du fait que chacune de ces activités est réalisée par une unité administrative différente mais n'induit pas forcément une segmentation géographique. Par contre, elle nécessite un échange continuel d'information entre les différents services afin de prendre en compte les données opérationnelles recueillies.

Le contexte du DFD est composé de quatre entités principales :

- **La planification des opérations**. Ce processus consiste principalement à la confection d'un horaire de travail constitué d'une liste ordonnée de circuits à parcourir et d'une thématique traduisant les exigences particulières à suivre en matière de surveillance pour chacun des circuits. Ce processus inclut également la mise à jour du réseau, des circuits et des thématiques en cas de changements.

- **Monitoring du réseau**. Le monitoring consiste à parcourir un circuit planifié, à repérer et à traiter les incidents détectés au cours de la tournée.

- **Traitement des incidents**. Ce processus découle du précédent et vise à faire un suivi des relevés effectués par le patrouilleur. Les différentes tâches (répartition, déterminer les travaux à effectuer, générer la feuille de route et l'ordre de travail) sont réalisées par les Centres de Services des régions concernées.

- **Analyse des activités**. Ce processus nouvellement mis en place a pour but de pouvoir évaluer les activités effectivement opérées. Il s'agit principalement d'une reconstruction du chemin réellement emprunté par le véhicule afin de pouvoir détecter les arcs planifiés qui n'ont pas été couverts. Il s'agit également de synthétiser les différentes informations concernant les incidents afin de déterminer les thématiques de monitoring.

L'analyse détaillée présentée en annexe A montre d'une part le lien informationnel existant entre les différents acteurs du processus et d'autre part l'importante quantité d'information à traiter afin d'assurer la cohésion de ces liens.

2.2 L'approche orientée-objet en transport

La modélisation orientée-objet se veut un outil d'analyse et de résolution de problème et doit être séparée de la composante programmation afin de ne pas compromettre son

intégrité en cas de changements technologiques. Elle repose sur une sémantique basée sur l'aspect programmation mais les définitions varient suivant les approches choisies. La modélisation orientée-objet en transport découle de cette définition afin d'appliquer à un domaine particulier cette approche générale.

2.2.1 Définitions des objets

Les objets de transport peuvent être regroupés en quatre métaclasses, qui décrivent efficacement les phénomènes réels apparaissant dans le domaine du transport (TREPANIER, 1999) :

- les objets dynamiques ;
- les objets cinétiques ;
- les objets statiques ;
- les objets systémiques.

La figure 2.3 représente ces quatre métaclasses ainsi que la notation utilisée pour caractériser les liens existants entre ces différents objets.

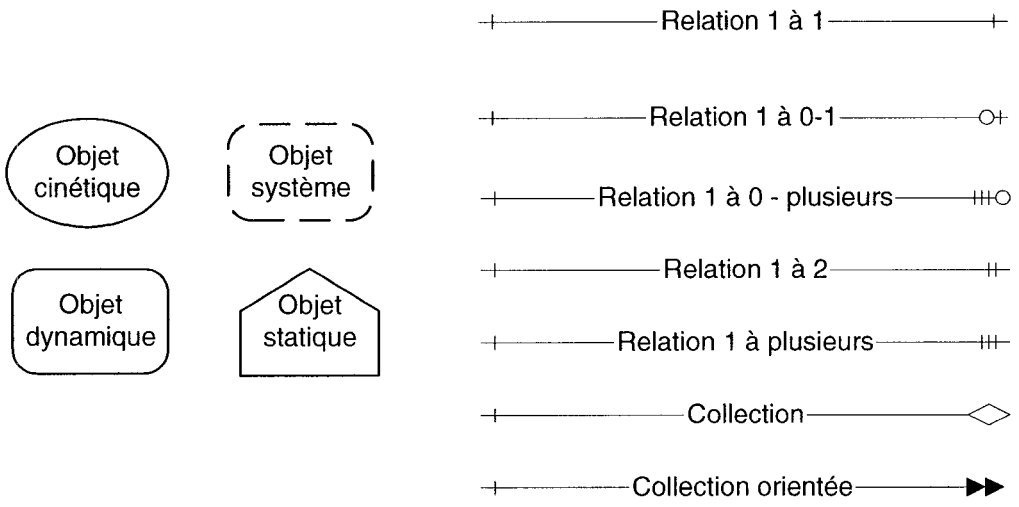


Figure 2.3 : Description des objets en transport et caractéristiques des relations (TRÉPANIER, 1999)

Comme dans l'approche orientée-objet traditionnelle, chacun des objets possède ses propres caractéristiques (propriétés) et ses propres fonctions (méthodes). Le passage de la réalité à la programmation se fait par l'entremise de concept d'abstraction, d'encapsulation et d'héritage, sémantique empruntée de la programmation orientée-objet.

2.2.2 Approche orientée-objet pour le monitoring

2.2.2.1 Modélisation

L'analyse de flux informationnels (section 2.1) permet d'avoir une vision globale du processus et de mettre en avant une grande quantité d'information diversifiée à prendre en compte. La résolution de cette problématique doit passer par l'établissement de balises afin de formaliser cette information et de permettre un traitement efficace. Ce formalisme est basé sur l'approche décrite précédemment et enrichie afin de l'adapter au problème particulier du monitoring du réseau routier.

La modélisation orientée-objet des activités liées au monitoring du réseau routier (figure 2.4) induit un regroupement des objets en trois classes principales :

- les objets de planification : ils représentent l'aspect planification de la tâche. On retrouve principalement dans cette classe des objets décrivant la tournée et l'itinéraire à suivre pour une tâche à effectuer (requête) ;
- les objets du Système d'Information Géographique (SIG) qui se veulent une représentation analytique du réseau ;
- les objets opérationnels sont une représentation des acteurs influant sur les activités effectivement opérées.

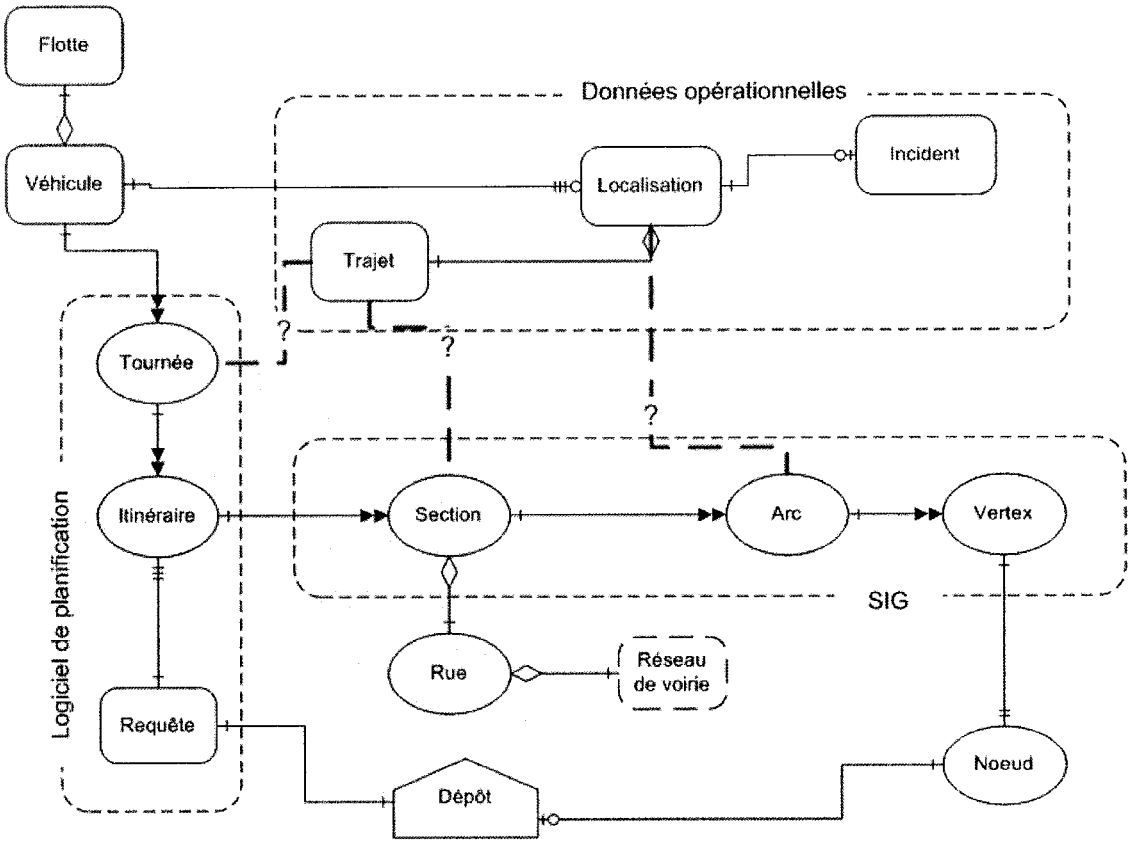


Figure 2.4 : Modélisation orientée-objet des activités liées au monitoring

L'approche développée permet d'une part de caractériser de manière précise les différents acteurs interagissant au sein du processus étudié. Elle permet en particulier de caractériser les liens entre les différents groupes d'objets et de caractériser les différentes problématiques liées au traitement de l'information. Cette problématique se retrouve principalement aux deux niveaux présentés sur la figure 2.4 : au niveau de l'interaction entre l'aspect opérationnel et du système d'information et au niveau de la relation entre l'aspect planification et l'aspect opérationnel. Ce premier lien représente une problématique de recherche de coïncidence entre le trajet du véhicule (et toutes les informations s'y rapportant) et les objets du SIG. Le deuxième lien représente le cœur de la problématique étudiée dans cet ouvrage, c'est-à-dire le développement de méthodes de planification permettant d'intégrer les activités réalisées.

Mais avant d'entrevoir une résolution de cette problématique, il faut s'attacher à une bonne caractérisation des différents objets.

2.2.2.2 Les objets SIG

Les objets SIG sont des objets traduisant les caractéristiques du réseau réel à surveiller. On y retrouve les objets suivants :

- l'objet Arc qui représente idéalement le chemin entre deux intersections du réseau ;
- l'objet Vertex qui sert à représenter les arcs (entité minimale) ;
- l'objet Section qui représente une section de rue ou de route, définie comme une collection orientée d'arcs.

Ces objets sont caractérisés par différentes propriétés et méthodes propres au réseau et aux diverses fonctionnalités qu'on retrouve actuellement dans les SIG. Il s'agit notamment de caractéristiques spatiales. Le tableau 2.1 propose des exemples de propriétés et méthodes associées aux objets SIG.

Tableau 2.1 : Exemple de propriétés et méthodes des objets SIG

Propriétés	Description	Exemple de valeur
Arc.id	Identificateur alphanumérique de la l'arc	"A234"
Section.Couverture	Nombre de fois qu'une section a été parcourue	3
Arc.VitesseCommerciale	Vitesse commerciale utilisée sur l'arc	35 km/h
Méthodes	**Description**	**Résultat**
Section.Afficher	Affichage d'une section de route	Visualisation d'une section
Arc.Incident.Compte	Nombre d'incidents relevés en coïncidence avec l'arc	2
Arc.CalculCouverture	Couverture de l'arc vis-à-vis des localisations en coïncidence avec l'arc (entier)	5

La définition des objets SIG est cruciale car ils seront des intrants directs aux méthodes et algorithmes mathématiques développés pour la planification des activités.

2.2.2.3 Les objets opérationnels

L'enrichissement du modèle objet en transport consiste principalement en l'ajout de la composante opérationnelle matérialisée par les trois objets dynamiques suivants :

- l'objet Trajet représente un ensemble de localisation visant à définir les déplacements réels du véhicule ;
- l'objet Localisation caractérise le véhicule dans l'espace et dans le temps ;
- l'objet Incident matérialise les incidents relevés au cours des opérations.

Chacun de ces objets est caractérisé par un ensemble des propriétés et méthodes permettant de décrire son état et les différentes opérations pouvant être effectuées d'un point de vue opérationnel. C'est dans cette formalisation que réside le traitement de données qui permettra l'intégration avec les autres acteurs du problème.

Le tableau 2.2 montre des exemples de propriétés et méthodes associées aux objets opérationnels.

Tableau 2.2 : Exemple de propriétés et méthodes des objets opérationnels

Propriétés	Description	Exemple de valeur
Incident.Type	Type d'incident détecté	"Détritus"
Localisation.latitude	Longitude de la localisation (réel)	45.5035
Trajet.Longueur	Longueur du trajet effectué	140.22 km
Méthodes	**Description**	**Résultat**
Localisation.TrouverArc	Recherche de coïncidence avec un arc du réseau	Identificateur d'un arc su SIG
Localisation.CalculCoordonnees	Calcul des coordonnées X,Y,Z à partir de la longitude, latitude, élévation	Une coordonnée (X,Y,Z)

2.2.2.4 Les objets de planification

Les objets de planification résultent par leur définition même des outils de planification et doivent faire le lien entre les deux classes d'objets décrites précédemment. Ils représentent de plus les extrants des méthodes et algorithmes mathématiques développés pour la planification des activités. Le tableau 2.3 illustre quelques propriétés et méthodes des objets de planification.

Le formalisme adopté nécessite une définition des objets adaptée au contexte opérationnel :

- une Tournée représente un ensemble d'itinéraires à suivre ;
- un Itinéraire représente une suite ordonnée de sections à parcourir ;
- une Requête représente le besoin en terme de parcours du réseau.

Tableau 2.3 : Exemples de propriétés et méthodes des objets de planification

Propriétés	Description	Exemple de valeur
Tournée.Longueur	Longueur de la tournée (réel)	154.25 km
Itinéraire.Item(2).Nom	Nom du deuxième item (section) d'un itinéraire	"Zone1"
Méthodes	**Description**	**Résultat**
Itinéraire.AjouterClient	Ajouter un client (arc) à un itinéraire	Itinéraire augmenté d'un arc
Tournée.DeterminerTour	Déterminer le l'ordre du parcours des arcs de la tournée	Un itinéraire à parcourir

2.3 Problématique d'intégration des données opérationnelles dans la planification des activités

La mise en place de balises et d'un formalisme dans le traitement des données montre la nécessité d'intégration des données opérationnelles à deux niveaux :

- au niveau de la planification (conception) des circuits ;
- au niveau de la collecte des données (opération).

La figure 2.5 illustre une schématisation de la problématique ainsi que les deux nœuds d'intégration des données.

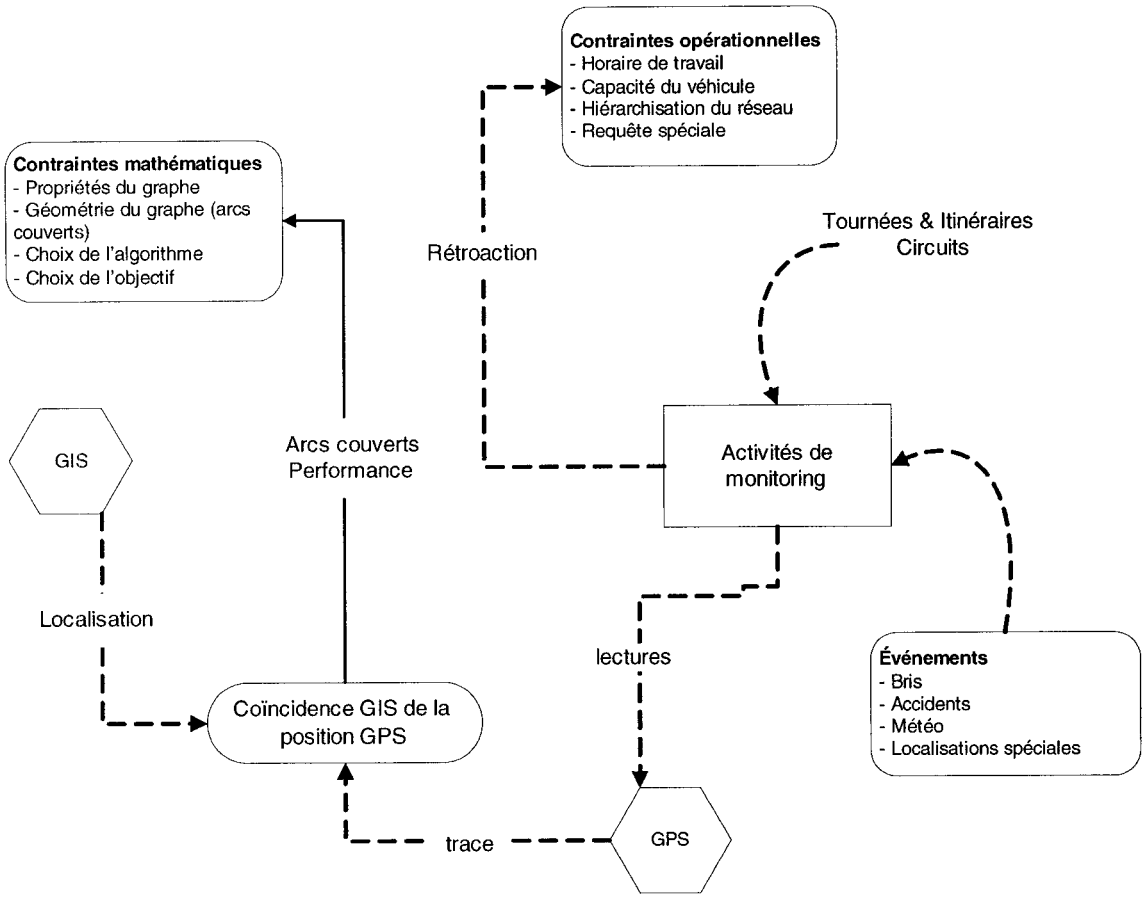


Figure 2.5 : Schématisation de la problématique d'intégration des données opérationnelles

D'un point de vue des opérations, la problématique se matérialise par la recherche de coïncidence entre les positions GPS relevées et le chemin effectivement opéré. Cette problématique se retrouve à deux sous niveaux : d'une part dans l'association de la position relevée (point) avec un objet du réseau (route) (figure2.6) et d'autre part dans la reconstitution du chemin emprunté (ensemble d'arcs).

Ce traitement représente un défi informatique important et est présentement réalisé à l'aide d'un algorithme de projection. Différents travaux de recherche tentent d'améliorer la performance de cette recherche de coïncidence entre la position GPS et les objets

représentants le réseau routier (WHITE, 2000). Les algorithmes utilisés se classent en deux catégories :

- les algorithmes de recherche de coïncidence (« *map matching* ») qui consistent à faire coïncider l'estimé de la position avec les objets du réseau les plus proches ;
- les algorithmes d'estimation statistique (« map matching as statistical estimation ») qui utilisent une séquence de points et tente de faire coïncider la courbe reliant ces points avec un objet du réseau.

Les nouveaux développements algorithmiques tentent ainsi de concilier ces deux approches.

Cependant, même avec une algorithmique développée, ces méthodes souffrent encore d'un manque de performance. Les principales causes sont :

- la fréquence des relevés : la prise de données est souvent en accord avec la vitesse de véhicule et non avec le découpage du réseau ;
- la précision du GPS : même si les progrès technologiques et la déréglementation permettent d'obtenir une précision de l'ordre de 3 m, le système est soumis à certaines fluctuations dues à la propagation des signaux, à la configuration des satellites et à la densité d'habitation du milieu concerné ;
- la densité du réseau : même si les activités se déroulent dans un cadre non urbain, il n'en reste pas moins que certains zones présentent une densité de routes plus importante (échangeurs d'autoroute, municipalités) ;

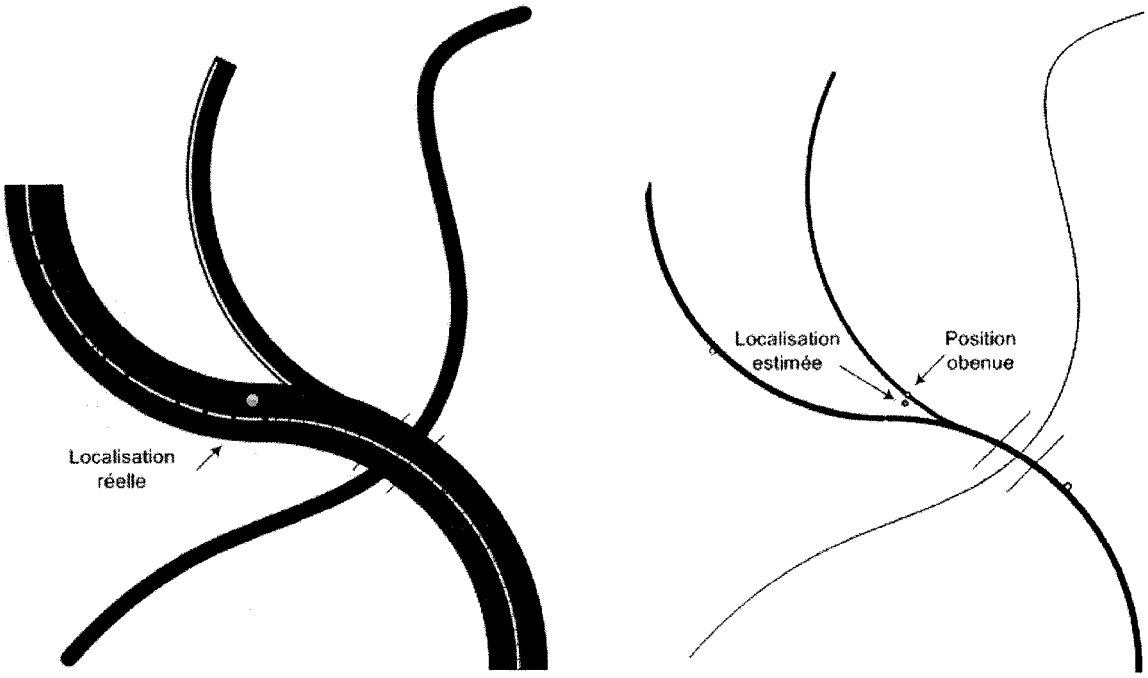


Figure 2.6 : Exemple de difficulté d'association de la position à une route

La reconstitution du parcours, c'est-à-dire la recherche de coïncidence entre le trajet planifié et le trajet opéré du véhicule, est soumise à deux causes d'erreurs :

- la construction (définition) du réseau est primordiale afin d'éviter toute ambiguïté concernant la couverture ou non d'un arc. De ce fait, l'existence d'une intersection doit obligatoirement se traduire par la découpe du tronçon en deux arcs. Cette définition du réseau n'est pas toujours présente car elle a souvent été réalisée en accord avec d'autres contraintes opérationnelles ;
- l'outil d'analyse doit être en mesure de prendre des décisions en tenant compte de la séquence des arcs visités et de corriger les oublis et les mauvaises correspondances.

L'aspect planification, quant à lui, représente le cœur de cette étude et nécessite le développement et l'adaptation d'outils algorithmiques en adéquation avec le formalisme adopté.

2.4 Méthodes algorithmiques de planification des activités

Les outils et méthodes mathématiques développés doivent servir à la construction et à l'optimisation des tournées (et des itinéraires) en respectant les différentes contraintes opérationnelles inhérentes au problème. La mise en œuvre des différentes méthodes développées dans cette section est présentée au chapitre 3.

2.4.1 Définition générale de la problématique de construction des tournées

Le problème de confection des tournées se définit au sens mathématique comme un problème de Tournée sur les Arcs avec Capacité. Étant donné un réseau complètement orienté, l'objectif de la planification consiste, au cours d'un horizon de planification de deux semaines, à parcourir l'ensemble des arcs en respectant les contraintes suivantes :

- l'ensemble des arcs appartenant à la catégorie « autoroute » doit être couvert une fois la semaine et une fois la fin de semaine ;
- l'ensemble des arcs appartenant à la catégorie « route nationale » doit être couvert une fois par période de 7 jours ;
- l'ensemble de autres arcs doit être couvert sur une période de 14 jours ;
- il y a 20 quarts de travail d'une durée de 7.5 heures par période de 7 jours.

Cet ensemble de contraintes est complété par une redéfinition constante du réseau en fonction des activités effectivement opérées sur les tournées planifiées, qui doit être basé sur le formalisme mis en place précédemment. Les arcs dits « obligatoires » sont ceux qui n'ont pas été couverts au cours de la période considérée.

La figure 2.6 présente une schématisation de cette modélisation du problème.

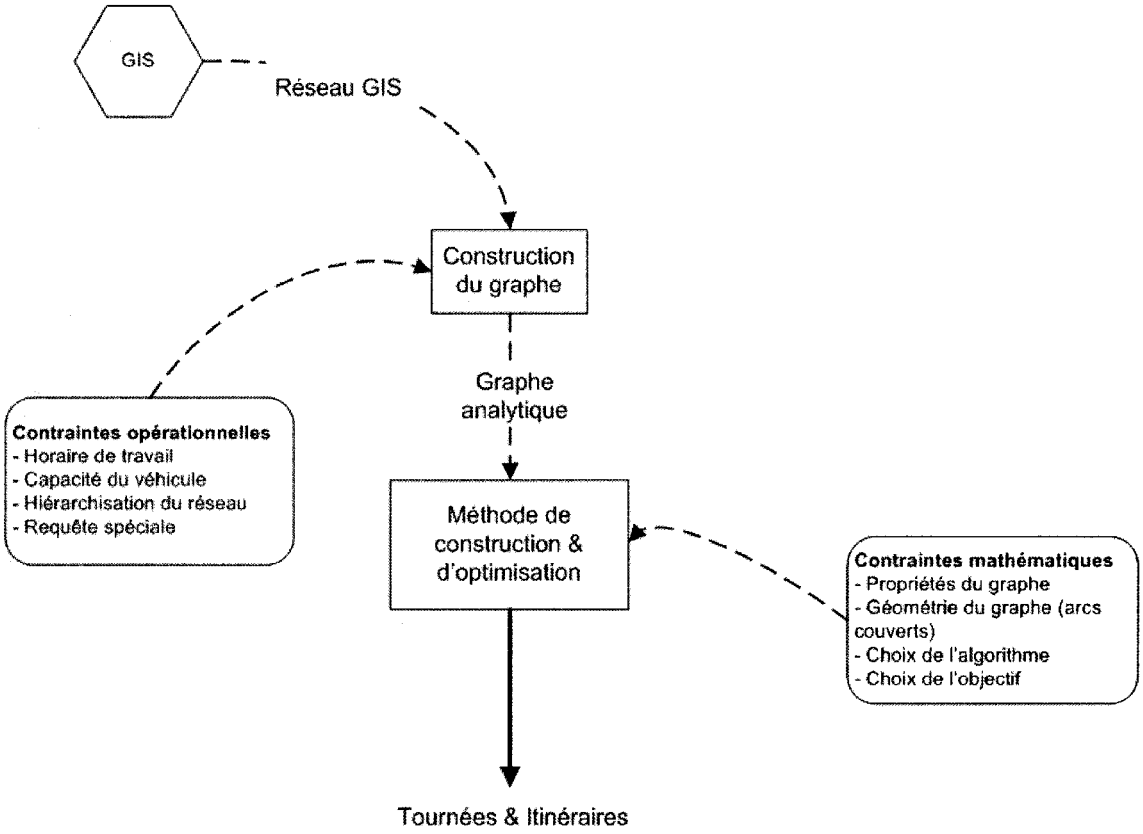


Figure 2.7 : Synoptique de modélisation du problème

2.4.2 Les approches de résolution

Avant d'entrevoir le développement d'algorithmes mathématiques en vue de résoudre cette problématique, il faut s'intéresser au choix de la méthode à employer et à son degré de dynamisme qui conditionnera le reste des développements. Cette section présente quatre méthodes de résolution du problème de planification des activités qui diffèrent non seulement par leur degré de dynamisme mais également par la difficulté de développement, de traitement et d'intégration des données.

2.4.2.1 Une affectation de circuits prédéterminés

Cette première approche vise à définir une séquence de parcours de différents circuits prédéterminés au cours de l'horizon de planification de deux semaines afin de respecter les exigences en matière de fréquences de passage sur les différentes classes de routes. Il s'agit donc principalement d'une affectation de circuits fixes aux différents quarts de travail.

L'ensemble des quarts de travail est scindé en trois sous-ensembles FS1, S1, FS2, S2 qui représentent respectivement la première fin de semaine (2 jours), la première semaine (5 jours), la deuxième fin de semaine (2 jours) et la deuxième semaine (5 jours). La figure 2.8 présente ce découpage.

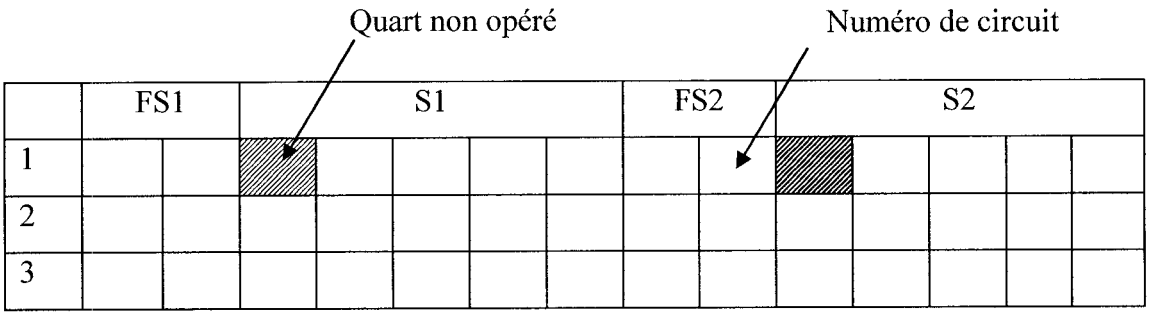


Figure 2.8 : Découpage des quarts de travail

Le modèle mathématique développé et présenté à la figure 2.9 vise à obtenir une affectation des circuits aux différents quarts de travail afin de satisfaire la couverture hiérarchisée du réseau.

Soit : $Q = FS_1 \cup S_1 \cup \quad FS_2 \cup S_2$ l'ensemble des quarts de travail,
K l'ensemble des circuits prédéterminés,
A l'ensemble des arcs,
C_1, C_2, C_3 les trois classes de routes.

$$\partial_{ik} = \begin{cases} 1 \text{ si l'arc } i \text{ appartient au circuit } k \\ 0 \text{ sinon.} \end{cases}$$

La variable de décision :

$$y_{kj} = \begin{cases} 1 \text{ si le circuit k est affecté au quart de travail j} \\ 0 \text{ sinon.} \end{cases}$$

$$\max \sum_{k \in K} \sum_{j \in Q} \sum_{i \in C_1} \partial_{ik} y_{kj} \qquad (1)$$

$s.c.$

$$\sum_{k \in K} y_{kj} \leq 1 \qquad \forall \mathrm{j} \in Q \qquad (2)$$

$$\sum_{j \in \alpha} \sum_{k \in K} \partial_{ik} y_{kj} \geq 1 \qquad \forall i \in C_1 \text{ et pour } \alpha = FS_1, S_1, FS_2, S_2$$

$$\sum_{j \in \alpha} \sum_{k \in K} \partial_{ik} y_{kj} \geq 1 \qquad \forall i \in C_2 \text{ et pour } \alpha = FS_1 \cup S_1, FS_2 \cup S_2 \qquad (3)$$

$$\sum_{j \in \alpha} \sum_{k \in K} \partial_{ik} y_{kj} \geq 1 \qquad \forall i \in C_3 \text{ et pour } \alpha = FS_1 \cup S_1 \cup FS_2 \cup S_2$$

$$y_{kj} = \{0;1\} \qquad (4)$$

Figure 2.9 : Modèle mathématique de confection de l'horaire

L'objectif (1) de ce modèle est de maximiser le passage sur les arcs de classe 1. Le choix de l'objectif peut être différent et sera discuté au chapitre 3. Le premier groupe de contraintes (2) impose qu'au plus un circuit peut être affecté à une case horaire. Contrairement à un modèle « classique » d'affectation, il n'est pas imposé ici d'affecter obligatoirement un circuit à un quart de travail. De plus, un circuit pourrait être affecté de multiples fois. Le deuxième groupe de contraintes (3) traduit les exigences en matière de fréquences de passage. Ainsi tous les arcs de classe 1 (autoroutes) doivent être affectés pour les deux fins de semaines et les deux semaines. Pour les arcs de classes 2,

cette affectation doit être faite pour les 7 premiers jours et les 7 jours suivants. Pour les autres arcs, représentés ici par la classe 3, l'affectation doit être faite au cours des 14 jours. Le dernier groupe de contraintes (4) assure l'intégrité des variables.

L'existence d'une solution repose donc sur la caractéristique des circuits à satisfaire les contraintes de fréquences de passage. Le patron d'affectation peut ainsi être répliqué pour couvrir un horizon de planification plus vaste.

2.4.2.2 Une approche basée sur la re-planification

La première approche présentée utilise un horizon de planification qui est figé une fois l'affectation effectuée. Cette approche statique peut mener à des conflits vers la fin de l'horizon de planification car les circuits affectés dans cette zone ne sont pas adaptés, a priori, aux événements apparus aux cours des périodes précédentes. Afin de contrer cet effet, il apparaît un besoin de re-planification en fonction de l'horizon et des besoins restant à couvrir.

La deuxième méthode est dérivée de la confection du programme directeur de production (PDP) dans l'approche MRP (*Materials Requirements Planning*). Dans cette approche, lorsque les prévisions sont modifiées, on effectue une « passe » de calcul afin de mettre à jour les quantités à mettre en production (commandes planifiées). Dans notre cas, les activités opérées vont avoir un impact sur les arcs restant à couvrir et la re-planification va avoir pour effet de transférer ces arcs non couverts vers d'autres quarts de travail plus éloignés dans le temps (figure 2.10).

	FS1	S1					FS2		S2				
1			*15*	*9*	*17*	*21*	*13*	*18*		*6*	*12*	*8*	*1*
2		*10*	*8*	*2*	*14*	*11*	*1*	*7*	*12*	*20*	*21*	*2*	*23*
3		*16*	*4*	*3*	*5*	*3*	*4*	*26*	*18*	*3*	*11*	*6*	*10*

Re-planification

Circuits déjà opérés

Figure 2.10 : Exemple de re-planification.

La re-planification est basée sur le modèle d'affectation (section 2.4.2.1) mais avec une nouvelle définition des ensembles (pour l'exemple de la figure 2.10, FS1 = ϕ) et une mise à jour de l'ensemble des arcs A qui ne contient maintenant que les arcs qui n'ont effectivement pas encore été couverts. Cette approche plus dynamique nécessite ainsi une définition de l'intervalle de re-planification (tous les quarts, tous les jours, toutes les périodes).

2.4.2.3 Une intégration partielle

La troisième méthode de planification tire profit de la replanification mais en modifiant les circuits prédéterminés afin de répondre plus efficacement aux différentes contraintes par une intégration des arcs qui n'ont pas été couverts et pas seulement, comme dans la deuxième méthode, par la réaffectation d'un circuit prédéterminé au complet.

L'intégration des arcs non couverts aux circuits existants doit être basée sur des règles de décision qui visent à répondre aux questions suivantes : « à quel quart / circuit intégrer chacun des arcs ? » et « où l'intégrer à l'intérieur d'un circuit ? ».

Cette tâche doit être réalisée à la fin de chaque quart de travail (ou fin de journée) et suit l'algorithmique présentée à la figure 2.11.

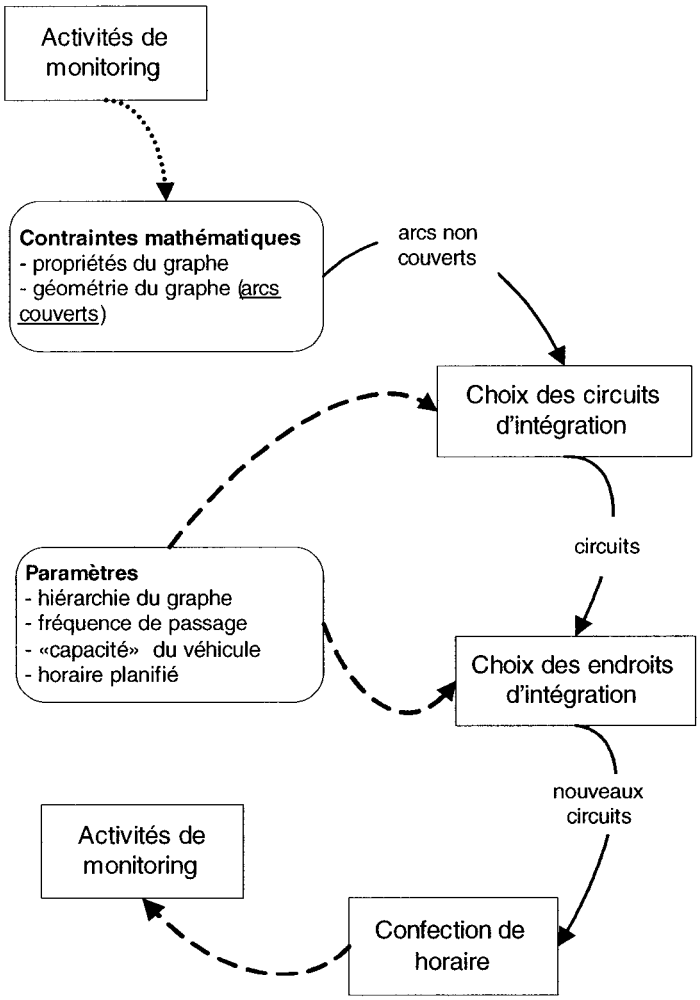


Figure 2.11 : Algorithmique générale d'intégration partielle des activités opérées.

La prise de décision au niveau du circuit à considérer est conditionnée par :

- l'« urgence » avec laquelle il faut couvrir l'arc ;
- l'équilibrage de la charge des circuits.

L'intégration d'un arc non couvert à un circuit choisi est également soumise à deux critères :

- la place de l'arc dans la séquence de parcours du circuit ;
- la minimisation de la distance additionnelle parcourue.

Cet axe de résolution est l'objet de différents travaux de recherche et quelques méthodes ont été développées afin de permettre une bonne intégration de nouveaux « clients » à des circuits existants (MITTAZ, 1999) (cf section 3.6.3).

2.4.2.4 Une reconstruction continuelle

Les approches décrites jusqu'ici sont toutes basées sur l'existence de circuits qui sont plus ou moins adaptés pour prendre en compte les activités effectivement opérées. Cette dernière approche (méthode 4) met l'emphase sur un fort degré de dynamisme car la construction des circuits se fait sur un horizon de planification plus restreint et permet la prise en compte d'un plus grand nombre de contraintes, d'une plus grande quantité d'information opérationnelle.

Le cœur de cette approche réside dans la construction d'un circuit basé sur un groupe d'arc préalablement choisi. Le choix de ces arcs et la définition de l'itinéraire sont effectués en fonction :

- de la définition du réseau en fonction des activités opérées ;
- de la nécessité de couverture de l'arc (fréquences de passage) ;
- de la nature de l'arc (classe) ;
- du respect de la capacité du véhicule ;

- de toutes autres contraintes opérationnelles (historique des incidents, arc sous surveillance particulière).

L'horizon de planification peut aller d'une journée à quelques heures et la construction pourrait même être réalisé en temps réel. La figure 2.12 schématise l'algorithmique utilisée dans cette approche.

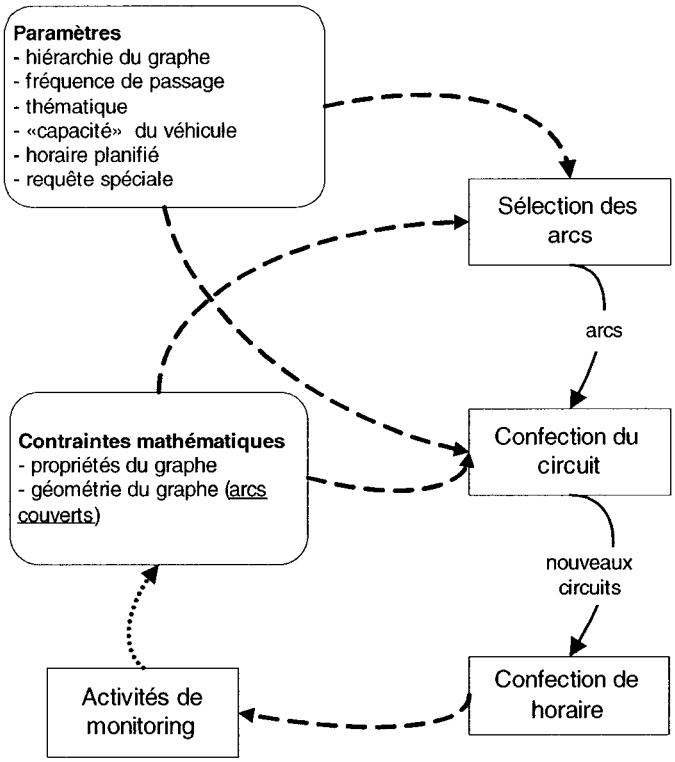


Figure 2.12 : Algorithmique de l'approche de reconstruction continuelle

2.4.2.5 Différents besoins sous différents degrés de dynamisme

Même si ce chapitre ne se veut qu'une définition d'une approche de résolution sans rentrer dans les rouages de la mécanique d'implantation (traités au chapitre 3), il ressort des méthodes développées différentes caractéristiques à prendre en compte avant de

s'engouffrer dans une algorithmique plus élaborée. Le tableau 2.4 présente un comparatif des différentes méthodes suivant des critères d'algorithmique et de traitement de l'information.

Tableau 2.4 : Comparatif des différentes méthodes de planification

	Méthodes	Degré de dynamisme	Algorithmique	Traitement de l'information
1	Affectation	Faible	Programme linéaire d'affectation	Circuits statiques (mise à jour occasionnelle)
2	Re-planification	Moyen	Affectations multiples	Circuits statiques + identification de la couverture
3	Intégration	Moyen	Affectations multiples + intégrations	Circuits dynamiques + identification de la couverture
4	Reconstruction	Fort	Algorithme de construction	Informations multiples des arcs

Du point de vue de l'usager, le degré de dynamisme est souvent le point sur lequel l'emphase sera mise lors du développement du système informationnel. Cependant, il ne faut pas perdre de l'esprit qu'un degré de dynamisme fort aura d'importantes répercussions sur la complexité de l'algorithmique mise en place comme sur l'information à traiter et à maintenir à jour. Ainsi, la méthode de reconstruction continuelle semble a priori être celle qui offre le plus de potentiel pour répondre aux besoins des usagers, elle n'en reste pas moins la plus compliquée à mettre en œuvre car demandant une algorithmique très dynamique et un besoin informationnel riche et exact.

2.5 Mesure de la performance des activités

Les processus opérationnels sont soumis à une variabilité qui entraîne un écart face à ce qui est planifié. De ce fait, il est nécessaire d'évaluer la performance de l'opéré et des

différents acteurs impliqués par rapport à une référence, par exemple les activités planifiées. Cette évaluation permet de ce fait de quantifier la capacité des acteurs à répondre aux différents besoins mais doit également servir de boucle de rétroaction et de critère de décision dans la démarche de planification. Cette mesure est présentée sous forme d'indicateurs de performance compréhensibles par tous les acteurs intervenants et qui serviront à bâtir une analyse et améliorer la prise une décision gouvernée par des objectifs souvent contradictoires (LARSON, 1981).

Le formalisme de données mis en place et les méthodes de planification développées font apparaître trois classes d'indicateurs :

- les indicateurs de performance de la méthode de planification ;
- les indicateurs de performance des activités opérées ;
- les indicateurs de performance des acteurs.

2.5.1 Performance de la méthode de planification

La performance de la méthode de planification vise à mesurer l'impact de l'outil utilisé afin de répondre aux besoins opérationnels.
Il s'agit dans un premier temps de s'assurer de l'efficacité de la méthode face aux contraintes de fréquences de passage sur les différentes classes de routes durant les périodes considérées.

$$IPA_{q,c} = \sum_{\tau[q]} Tournée.Arc.Classe(c).Compte$$

où $\tau[q]$ représente l'ensemble des tournées planifiées durant la période q

Par exemple un $IPA_{FS1,\ classe\ 1} = 15$ signifie que 15 arcs de classe 1 sont visités durant la première fin de semaine (FS1) par les tournées planifiées.

Cet indicateur permet de maintenir un historique de rencontre des exigences pour chacun des arcs du réseau.

On préfère souvent à ce type de mesure une mesure plus globale permettant d'avoir une seule mesure pour un horizon plus large (contrairement à une mesure par période). L'agrégation de ces données, sous forme de moyenne par exemple, permet certes d'avoir une seule mesure, mais fausse également quelque peu les données.

$$IPMA_{q,c} = f\left[\sum_{\tau[q]} Tournée.Arc.Classe(c).Compte\right]$$

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

L'agrégation peut également être réalisée en terme de longueur en comparant la longueur des arcs des tournées avec la longueur des arcs du réseau, pour chacune des période ou pour un ensemble de périodes.

$$IPL_{q,c} = \frac{\sum_{\tau[q]} Tournée.Arc.Classe(c).Longueur}{\sum_{A} Arc.Classe(c).Longueur} \quad A \text{ est l'ensemble des arcs}$$

$$IPML_{q,c} = f\left[\frac{\sum_{\tau[q]} Tournée.Arc.Classe(c).Longueur}{\sum_{A} Arc.Classe(c).Longueur}\right] = f\left[IPL_{q,c}\right]$$

De ce fait, un $IPL_{FS1_0S1,classe\ 2} = 0.8$ signifie que 80 % de la longueur totale des arcs de classe 2 sera « parcourue » par les tournées planifiées durant les 7 premiers jours..

Finalement, l'étude doit être entreprise en terme de couverture de chacun des arcs du réseau, en fonction de sa classe et de la période en coïncidence. La longueur unitaire représente la longueur de l'arc en rapport avec sa couverture.

$$IPC_{q,c} = \frac{\sum_{\tau[q]} Tournée.Arc.Classe(c).LongueurUnitaire}{\sum_{A} Arc.Classe(c).Longueur}$$

Par exemple, $IPC_{S1,classe\ 1} = 0.75$ indique que 75 % de la longueur totale des arcs de classe 1 a été couverte. Contrairement à l'indicateur précédent, même si un arc est parcouru plus d'une fois, sa longueur n'est comptabilisée qu'une seule fois.

Il est important de faire la distinction entre la notion de tournée et de circuit. Un circuit est une collection orientée d'arcs du réseau. Une tournée une collection orientée d'arcs d'un circuit, c'est-à-dire l'ensemble des arcs de la tournée pouvant être visité durant un quart de travail.

2.5.2 Performance des activités

La performance des activités vise quant à elle à traduire ce qui a effectivement été opéré. Il s'agit d'une part de comparer l'opéré par rapport aux exigences et de comparer l'opéré par rapport au planifié d'autre part.

2.5.2.1 Performance de l'opéré par rapport aux exigences

L'indicateur le plus élémentaire dérivant de cette définition vise à comparer la longueur « unitaire » du parcours opéré par rapport à la longueur du réseau. On entend par longueur « unitaire » la longueur d'un arc prise une seule fois même si l'arc est parcouru plus d'une fois dans la période considérée.

La sommation est effectuée pour tous les trajets effectués dans la période sur laquelle on désire obtenir un indicateur. La notion de trajet est définie par une collection orientée d'arcs réellement visités durant le quart de travail.

$$IALU_q = \sum_{T[q]} \frac{Trajet.LongueurUnitaire}{Réseau.Longueur}$$

$T[q]$ est l'ensemble des trajets effectués durant la période q

Ainsi, un $IALU_{2semaines}$ = 0.85 signifie que 85% de la longueur totale du réseau a été visitée au moins une fois.

Par opposition, l'indicateur de longueur parcourue permet de s'assurer de la capacité théorique à parcourir un réseau ou une classe particulière.

$$IAL_q = \sum_{T[q]} \frac{Trajet.Longueur}{Réseau.Longueur}$$

L'objet réseau peut tout autant représenter l'ensemble du réseau à couvrir mais également une fraction de ce réseau à opérer durant un horizon plus restreint.
Bien entendu, cet indicateur peut être exprimé en fonction de la classe de route considérée :

$$IALU_{q,c} = \sum_{T[q]} \frac{Trajet.Arc.Classe(c).LongueurUnitaire}{Réseau.Arc.Classe(c).Longueur}$$

$$IAL_{q,c} = \sum_{T[q]} \frac{Trajet.Arc.Classe(c).Longueur}{Réseau.Arc.Classe(c).Longueur}$$

Ce même indicateur peut être interprété sous un angle de couverture et ainsi en nombre d'arcs plutôt qu'en distance :

$$IAN_{q,c} = \sum_{T[q]} \frac{Trajet.Arc.Classe(c).Couvert.Compte}{Réseau.Arc.Classe(c).Compte}$$

Par exemple, une valeur $IAN_{FS2,\ classe\ 2}$ = 0.32 signifie que 32 % des arcs de classe 2 ont été effectivement couverts durant la deuxième fin de semaine.

Comme mentionné dans le cas précédent, il est souvent plus facile d'interpréter un seul indicateur plutôt qu'une répétition de celui-ci au cours des différentes périodes étudiées, en ayant en considération la perte d'information due à l'agrégation des résultats. Les deux indicateurs précédents induisent :

$IAML_c = f[IAL_c]$ et $IAMN_c = f[IAN_c]$

Dans cette optique de globalité, on aurait tendance à vouloir agréger différents indicateurs basés sur les classes de routes en un seul. Cette agrégation peut être réalisée à l'aide d'une pondération des différentes classes

$IAG = \sum_c \alpha_c . IAX_c$ où IAX_c est un des indicateurs développés ci - dessus

et α_c la pondération affectée à chacune des classes

2.5.2.2 Performance de l'opéré par rapport au planifié

Cette deuxième catégorie de mesure des activités opérées vise à traduire dans quelle mesure les tâches opérées suivent les tâches planifiées.

Cette mesure peut prendre une forme désagrégée en identifiant une liste des arcs planifiés couverts lors du trajet.

$IALA = Liste(Tournée.Arc.Nom) \mid Liste(Tournée.Trajet.Arc.Nom)$

Cette mesure peut également être traduite en terme de longueur.

$$IAAL_{q,c} = \frac{\sum_{\tau[q]} Trajet.Arc.Classe(c).LongueurUnitaire}{\sum_{T[q]} Tournée.Arc.Classe(c).Longueur}$$

Par exemple, si on considère la période de la première semaine FS1 et les 6 circuits planifiés, un $IAAL_{FS1,classe1} = 0.65$ signifie que 65 % des tournées (en terme de longueur) planifiées ont été effectivement parcourues.

Comme dans les cas précédents, elle se décline en terme d'arcs et peut être agrégée en considérant l'ensemble des classes.

Cette mesure de performance de l'opéré par rapport au planifié permet même de mesurer l'acceptation des itinéraires générés par les usagers en comparant l'ordre de parcours des arcs.

IAO_a = Itinéraire.Arc(a).PlaceSéquence - Trajet.Arc(a).PlaceSéquence $\forall a \in A$

Ainsi, un IAO de 0 indique que l'arc a été visité dans la séquence prévue.

2.5.3 Performance des autres acteurs

La justesse des indicateurs de performance des activités opérées est bien entendu conditionnée par l'exactitude des données du réseau mais également par la capacité des acteurs (véhicule/patrouilleur, système de positionnement, réseau) à traduire l'opéré. C'est pourquoi il est nécessaire de mettre en place une série d'indicateurs permettant le suivi de ces acteurs.

Les méthodes de planification développées sont toutes conditionnées par la capacité du véhicule, qui est traduite en terme de temps (durée de la journée) et convertie en distance qui peut être parcourue. Cette distance est limitée par la vitesse commerciale du véhicule sur chacun des arcs ou sections. Cette vitesse doit être mise à jour grâce aux relevés des localisations.

$$Arc.VitesseCommerciale = f(Véhicule.Localisation.Arc.Vitesse)$$

Le système de positionnement et les composantes informatiques touchant à la détermination et au traitement de la localisation a une influence sur la mise à jour du réseau (notamment sur la couverture des arcs ou la recherche du trajet parcouru). La performance se traduit par une qualité de localisation.

$$ISP = f(Localisation.Qualité)$$

Cette performance se traduit également par l'exactitude avec laquelle le système rend le trajet parcouru.

$$ISC = TrajetCalculé.Arc.Compte - Trajet.Arc.Compte$$

Le tableau 2.5 synthétise l'ensemble des indicateurs développés :

Tableau 2.5 : Synthèse des indicateurs de performance

Catégorie	Indicateur	Description
Méthode de planification	$IPA_{q,c}$, $IPMA_{q,c}$	Nombre d'arcs de classe c visités par les tournées planifiées.
	$IPL_{q,c}$, $IPML_{q,c}$	Pourcentage de la longueur des arcs de classe c parcourue par les tournées planifiées.
	$IPC_{q,c}$	Pourcentage de la longueur des arcs de classe c couverte par les tournées planifiées.
Activités / Exigences	$IAL_{q,c}$	Pourcentage de la longueur des arcs de classe c parcourue par les trajets réalisés.
	$IALU_{q,c}$	Pourcentage de la longueur des arcs de classe c couverte par les trajets réalisés.
	$IAN_{q,c}$	Pourcentage du nombre d'arcs de classe c couvert par les trajets réalisés.
Activités / Planifié	IALA	Liste des arcs planifiés couverts lors du trajet.

Catégorie	Indicateur	Description
	$IAAL_{q,c}$	Pourcentage de la longueur des arcs de classe c planifiés couverte par les trajets réalisés.
	IAO	Mesure de la coïncidence entre la séquence de parcours des trajets réalisés et des tournées planifiées.
Autres acteurs	ISP	Mesure de la qualité de la localisation.
	ISC	Mesure de la coïncidence entre le trajet calculé et le trajet effectivement réalisé.

2.6 Vers la mise en œuvre de considérations théoriques

Ce deuxième chapitre présente ainsi une méthodologie d'analyse d'un problème à caractère informationnel. L'approche par DFD et la modélisation orientée-objet a permis, par la prise en compte de l'information provenant des activités opérées, d'entrevoir quatre méthodes de résolution du problème, c'est-à-dire quatre méthodes de planification des opérations de monitoring ainsi que d'un ensemble d'indicateurs de performance capable traduire la capabilité et l'efficacité des méthodes de répondre aux différentes exigences.

Cette étape, certes cruciale, n'est pas l'aboutissement du projet mais permet d'entrevoir la mise en œuvre d'un outil de planification. Les chapitres 3 et 4 ont ainsi pour objet de présenter d'une part comment cet outil a été développé et d'autre part les résultats et comparaisons des différentes méthodes.

CHAPITRE 3 : MISE EN ŒUVRE D'UN OUTIL DE PLANIFICATION

Le design d'un outil à caractère informationnel nécessite qu'on s'attache à la modélisation du processus afin d'en construire son architecture qui conditionnera la validité du système. Mais, même en ayant défini de la manière la plus exacte ce squelette, il reste de nombreux défis à surmonter afin de rendre cet outil fonctionnel (LARSON, 1981). Ceci est d'autant plus vrai lorsqu'on utilise, comme dans le cas présent, des composantes de différentes natures devant interagir entre elles. L'objet de ce chapitre est de mettre l'accent sur la mécanique d'implantation du système de planification des tournées de monitoring, ce qui permet d'identifier les problèmes de résolutions qui sont transparents aux modèles mathématiques.

3.1 Vue d'ensemble

La méthodologie proposée dans la résolution de la problématique d'intégration des données opérationnelles dans les activités de monitoring du réseau routier se veut ainsi un lien entre les composantes informationnelle et algorithmique du problème. La figure 3.1 présente une vue d'ensemble de l'implantation de la méthodologie décrite précédemment.

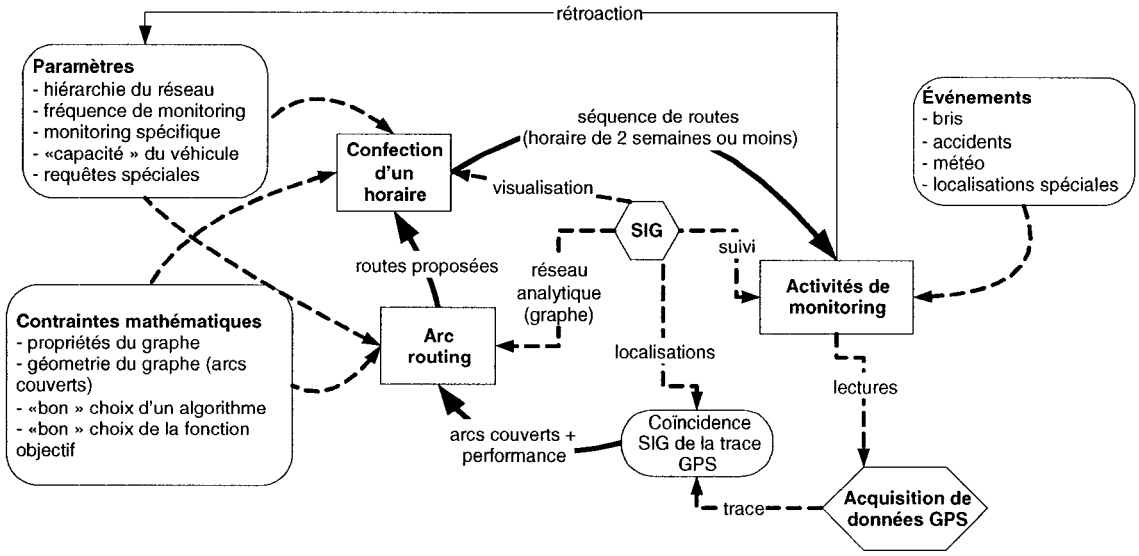


Figure 3.1 : Implantation de la méthodologie proposée

La méthodologie présentée comporte une composante « classique » de résolution à l'aide des différents paramètres décrivant le problème ainsi que des caractéristiques mathématiques des algorithmes et du réseau utilisés. Une des contributions de cette étude est d'inclure un suivi des activités à la planification. Ce suivi est articulé autour du SIG qui sert de lien entre les activités opérées localisées par le système de positionnement (GPS) et les outils mathématiques. La composante mathématique est représentée ici par la confection d'une séquence de parcours de différents circuits au cours d'un horizon de planification de deux semaines. L'accent est mis sur le développement de différentes méthodes de résolution de difficultés croissantes tant d'un point de vue algorithmique qu'au niveau du traitement de l'information. La figure 3.2 présente l'architecture des méthodes mathématiques développées.

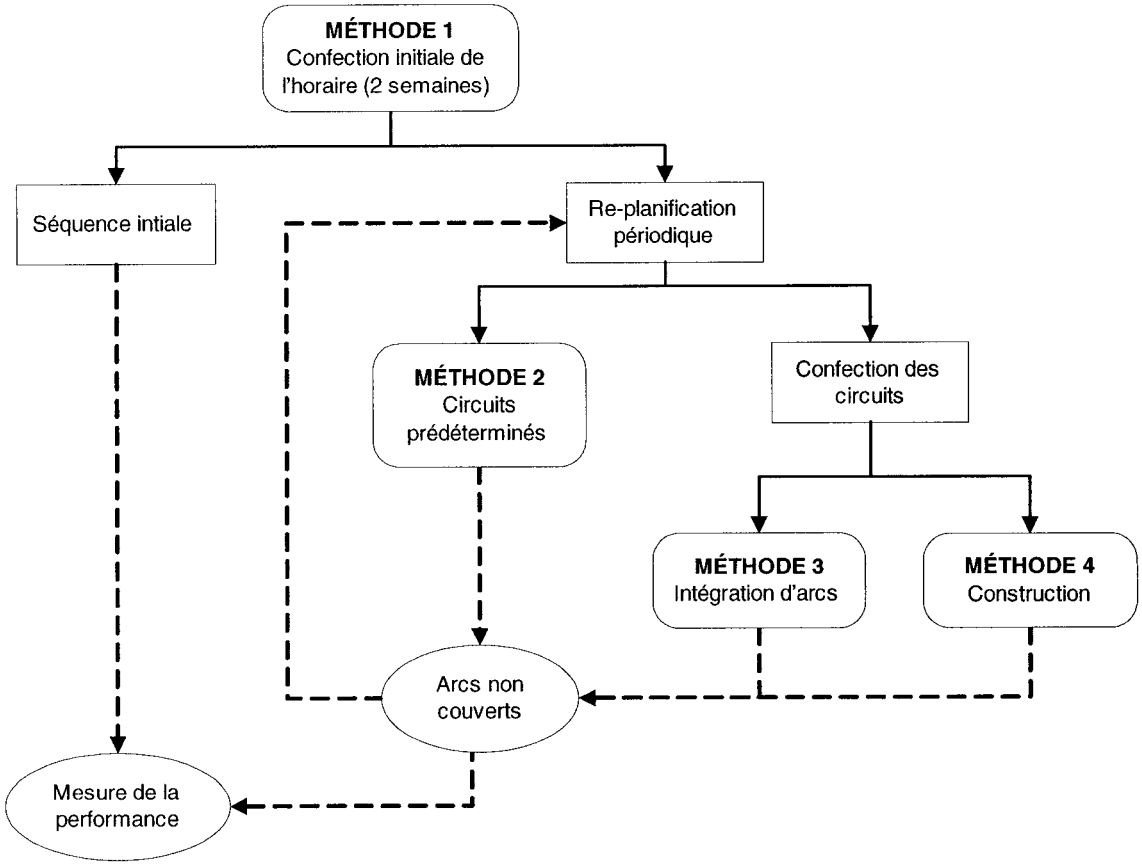
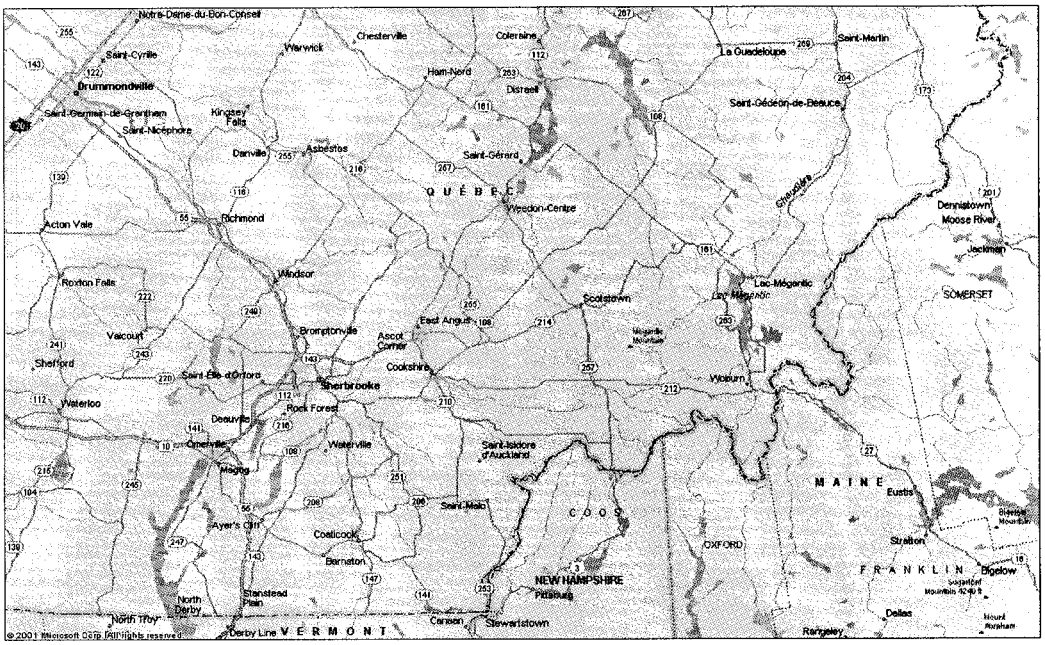


Figure 3.2 : Graphe hiérarchique des méthodes mathématiques développées

3.2 De la réalité au modèle mathématique, du réseau au graphe

3.2.1 Obtention d'un graphe à structure particulière

Les méthodes mathématiques développées sont toutes basées sur l'utilisation d'un graphe mathématique. La construction de ce graphe est réalisée à l'aide de la modélisation du réseau routier stockée dans le SIG. De ce fait, l'architecture du graphe est directement liée à l'architecture de la modélisation et les arcs mathématiques hériteront des propriétés des routes inscrites dans le SIG.



source : Microsoft MapPoint

Figure 3.3 : Représentation du réseau routier

Les figures 3.3 et 3.4 illustrent le passage du réseau SIG au graphe mathématique. Il faut noter que la structure d'un tel graphe est différente de celle des graphes mathématiques généralement rencontrés. En effet, dans les graphes conventionnels, rares sont les nœuds possédant un degré entrant et un degré sortant égaux à 1. Ce type de nœud est souvent retiré et les deux arcs sont jumelés afin de n'en produire qu'un seul afin de réduire la taille du problème. Cependant, dans l'approche désagrégée privilégiée où les propriétés de chaque arc ont leur importance, il est nécessaire de conserver ces singularités au détriment d'une taille parfois importante du modèle.

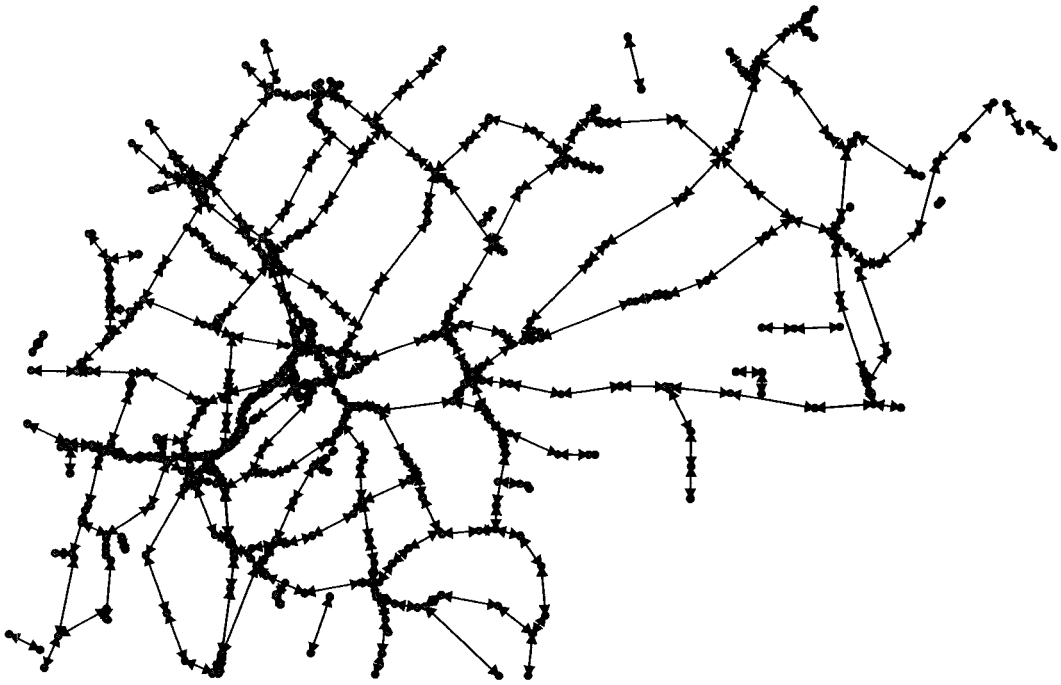


Figure 3.4 : Représentation du graphe mathématique résultant (SIG)

3.2.2 Cohérence fonctionnelle et mathématique

La modélisation du réseau routier est généralement basée sur des considérations fonctionnelles (découpage des routes, section, tronçons) qui sont incompatibles avec une approche mathématique basée sur la théorie des graphes.

La première difficulté réside dans la définition des arcs et de leur orientation qui n'est généralement pas documentée dans le système d'information. Par exemple, les autoroutes qui sont des voies à sens unique, ont une représentation par voie qui donne ainsi naissance à un seul arc par objet. Les routes secondaires ne sont quant à elles représentées que par un seul objet mais doivent donner naissance à deux arcs de sens opposés à moins qu'elles ne soient définies comme route à sens unique.

La deuxième difficulté découle du découpage fonctionnel utilisé qui mène à la construction de graphe incohérent et impossible à utiliser dans un algorithme mathématique. L'exemple le plus frappant de ce manque de cohérence réside dans le découpage des routes aux intersections qui n'est pas toujours réalisé (figure 3.5).

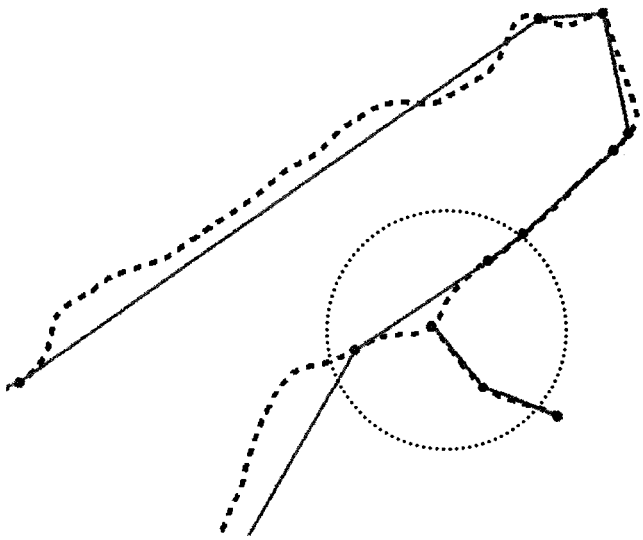


Figure 3.5 : Exemple d'incompatibilité du graphe

3.2.3 Extraction du graphe

L'obtention du graphe mathématique est réalisée par extraction des coordonnées des différentes polylignes du SIG. Cette méthode, réalisée en VBA permet d'extraire les différentes caractéristiques des routes, de les stocker dans une base de données et de créer les nœuds et les arcs en correspondance.
Ainsi, pour chacune de ces polylignes, un nœud est ajouté au début et à la fin de chaque objet et l'arc induit par ces deux nœuds héritera des caractéristiques de l'objet SIG. Le code informatique développé pour l'extraction et la génération du graphe est présenté en annexe B.

3.2.4 Modélisation du graphe

L'extraction des informations du réseau SIG donne naissance à une modélisation du graphe mathématique. Cette modélisation a été réalisée à l'aide de Microsoft Excel. Le choix d'une telle plateforme est justifié par :

- la facilité d'obtenir rapidement une interface graphique visuelle et conviviale ;
- la maîtrise du logiciel par la majorité des acteurs en ingénierie ;
- la rapidité du développement à l'aide d'un langage interprété (VBA).

Bien entendu, le choix d'une telle plateforme souffre de quelques lacunes notamment au niveau de la rapidité d'exécution mais reste un excellent outil pour le développement de prototypes.

La modélisation du graphe et la résolution mathématique sont basés sur deux classes d'objets :

- l'objet Lien représentant les arcs du réseau ;
- l'objet Nœud représentant les nœuds du réseau.

Cette architecture est complétée par trois collections permettant de manier adéquatement les différents groupes d'objets :

- la collection Liens représentant une collection d'objets Lien ;
- la collection Nœuds représentant une collection d'objets Nœud ;
- la collection Réseau représentant une collection d'objets Nœud et Lien.

Chacun de ces objets et collections d'objets comporte un ensemble de propriétés et méthodes permettant de décrire les caractéristiques du graphe utiles à la résolution du problème. Les figures 3.6 et 3.7 présentent des exemples de propriétés et méthodes associées à l'objet Nœud.

```
Public Forme As Shape
Public nom As String
Public Cellule As Range
Public Liens As New Liens

Public Marque As Integer
Public DistCum As Long
Public Predecesseur As lien
Public numero As Integer
```

Figure 3.6 : Propriétés de l'objet Noeud

```
Function LiensLibresSortant() As Liens
 Dim lis As New Liens, li As lien
 For k = 1 To Me.Liens.Count
   Set li = Me.Liens.Item(k)
   'Vérifie si le lien sort et l'ajoute à la méthode
    If Not (li.Marque1) Then
      If li.Sens = 0 Then
        lis.Add li
      End If
      If li.Sens = 1 And li.Noeud1 Is Me Then
        lis.Add li
      End If
      If li.Sens = 2 And li.Noeud2 Is Me Then
        lis.Add li
      End If
    End If
 Next
 Set LiensLibresSortant = lis
End Function


Function DegreOut() As Integer
   Dim x As Integer
   x = 0
   For k = 1 To Me.Liens.Count
      Select Case Me.Liens.Item(k).Sens
        Case 0
          x = x + 1
        Case 1
          If Me.Liens.Item(k).Noeud1 Is Me Then x = x + 1
        Case 2
          If Me.Liens.Item(k).Noeud2 Is Me Then x = x + 1
      End Select
   Next
   DegreOut = x
End Function
```

Figure 3.7 : Exemples de méthodes de l'objet Nœud

L'utilisation de Microsoft Excel permet d'obtenir rapidement et de manière efficace une interface graphique permettant de visualiser le graphe mais également les résultats des différents algorithmes développés pour la résolution du problème. La figure 3.8 présente le graphe mathématique résultant du réseau SIG présenté à la figure 3.3.

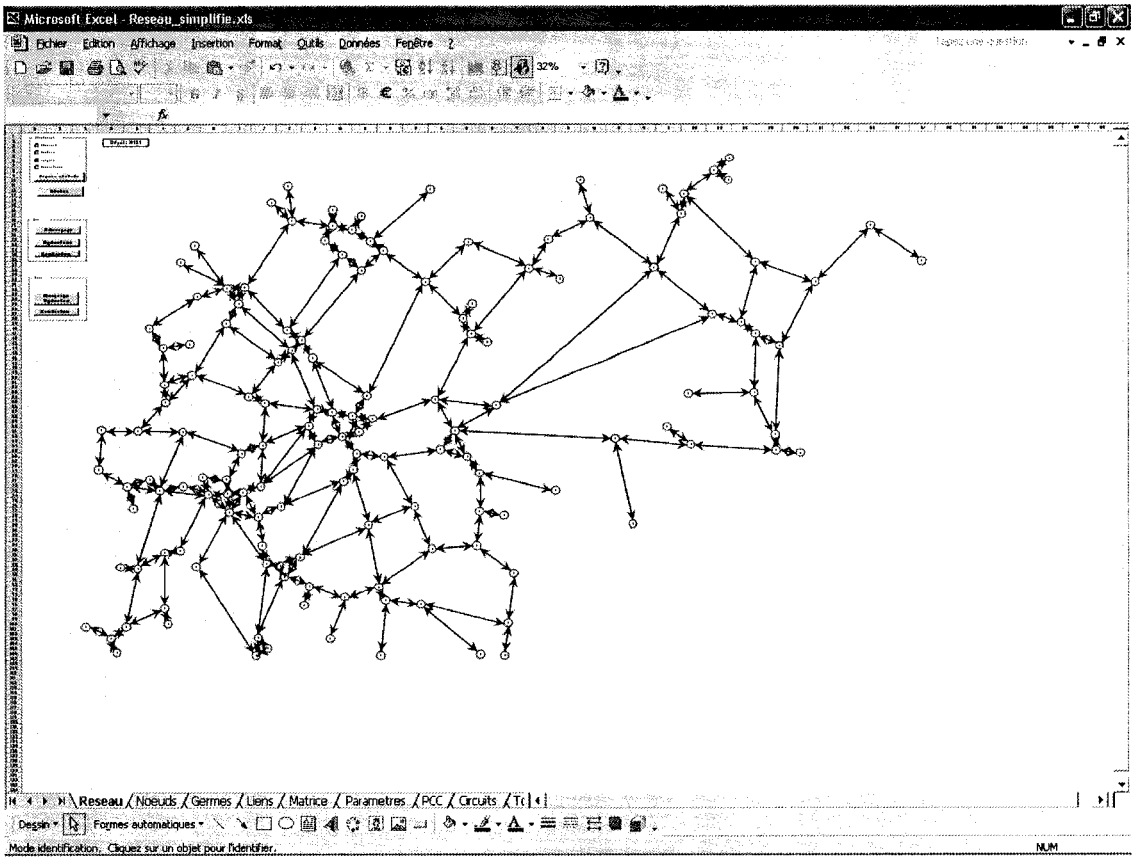


Figure 3.8 : Graphe mathématique induit par le réseau GIS

Les différentes composantes de l'application Excel développée sont présentées en annexe B.

3.3 Valeur ajoutée procurée par le système informationnel

La finalité de résolution de cette problématique ne réside pas seulement dans l'obtention d'un circuit ou d'un horaire pour le patrouilleur mais également dans la capacité à stocker, visualiser et manipuler adéquatement les différentes informations décrivant le problème.

3.3.1 L'interface

L'approche de résolution privilégiée dans ce mémoire vise au développement d'un aide à la décision permettant au répartiteur de confectionner les différents circuits et horaires remis au patrouilleur pour les opérations de monitoring. L'utilisation d'un système informationnel permet à l'usager :

- d'entrer et modifier de manière conviviale différentes données ;
- de visualiser à l'aide d'une interface graphique le résultats de différentes méthodes et algorithmes utilisés.

La figure 3.8 illustre le développement d'une méthode interactive pour le codage d'un circuit. Ce codage est effectué par une sélection successive des nœuds du circuit, l'information étant par la suite stockée une la base de donnée Access.

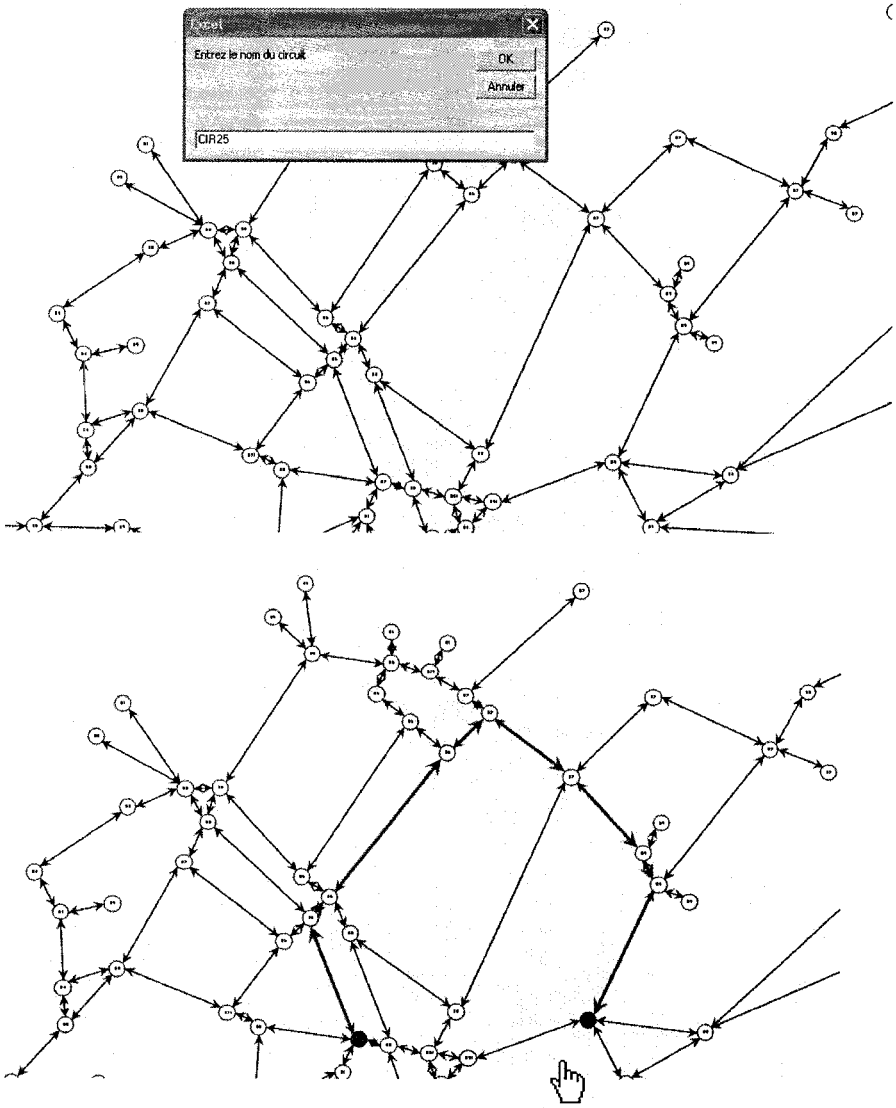


Figure 3.9 : Interface de construction interactive d'un circuit

La figure 3.10 présente l'interface de visualisation et de modification des propriétés des liens du réseau.

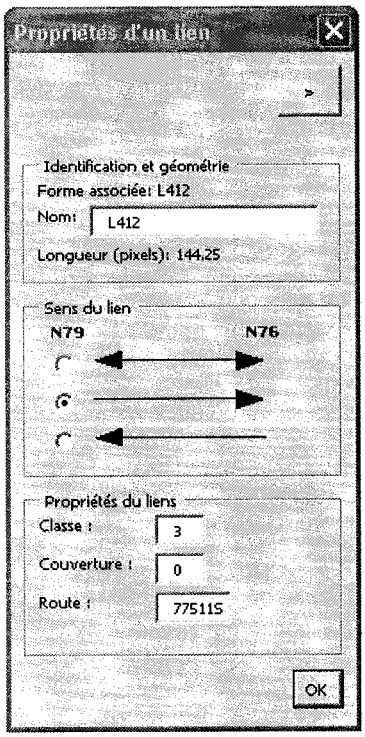


Figure 3.10 : Interface d'interrogation des liens

La mise en place d'un formalisme de données cohérent en adéquation avec les contraintes opérationnelles inhérentes au problème permet à l'usager d'effectuer facilement des requêtes spatiales et/ou temporelles et de visualiser directement le résultat sur le graphe. Par exemple, la méthode présentée à la figure 3.11 permet de visualiser sur le graphe les différentes classes d'arcs. Le résultat pour les arcs de classe 1 est présenté à la figure 3.12.

```
Sub Dessiner_classe()

Dim li As lien
Dim rep

'Lire le réseau s'il n'est pas en mémoire
If res.Noeuds.Count = 0 Then LireReseau Else DessinerSansReplacer

rep = InputBox("Classe d'arcs à dessiner ?", "Dessin d'une classe")

Application.StatusBar = "Affichage de la classe " & rep & " en cours..."
Application.ScreenUpdating = False

For k = 1 To res.Liens.Count
Set li = res.Liens.Item(k)

If li.classe = rep Then
'Dessiner les arcs de la classe sélectionnée en ROUGE
With li.Forme.Line
   .ForeColor.RGB = QBColor(12)
   .Weight = xlThick
End With
'Dessiner les autres arcs en NOIR
ElseIf li.classe <> c Then
   DessinerUnLien li, 0
End If
Next

Application.ScreenUpdating = True
Application.StatusBar = ""

End Sub
```

Figure 3.11 : Méthode d'affichage des arcs appartenant à une classe

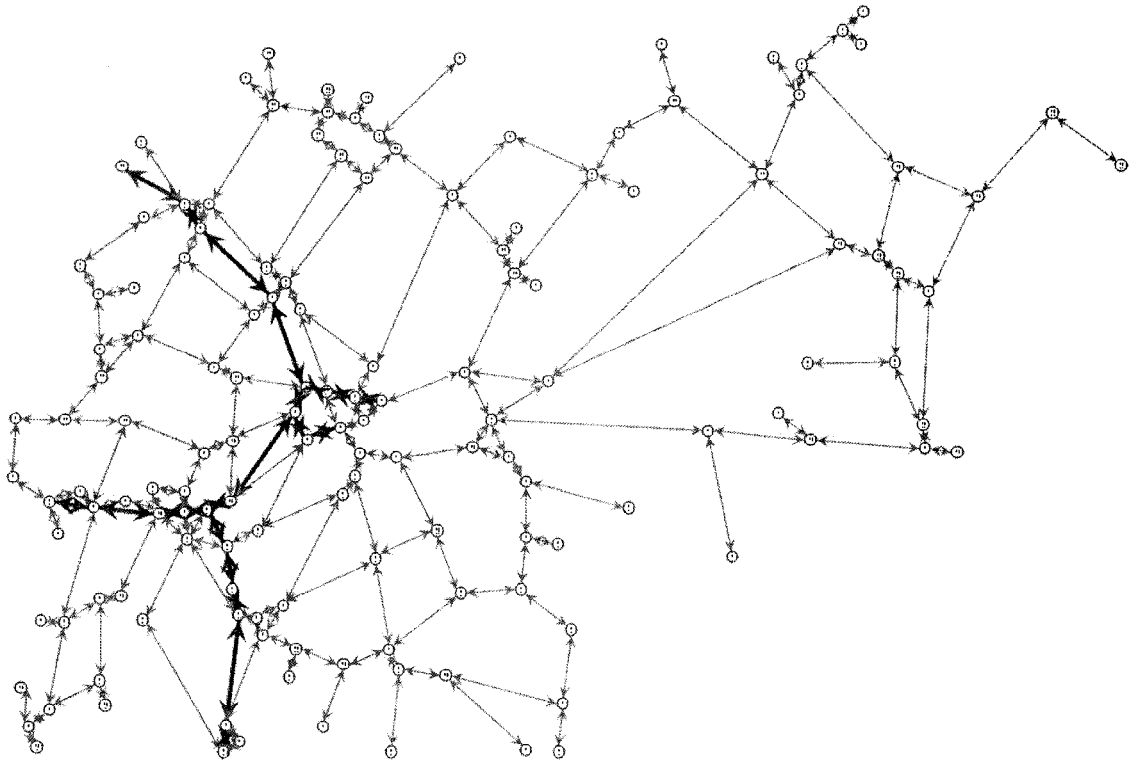


Figure 3.12 : Affichage des arcs de classe 1

3.3.2 Optimisation mathématique et structure de données

La programmation mathématique et plus particulièrement la programmation linéaire est omniprésente dans l'approche de résolution privilégiée. On la retrouve notamment dans l'équilibrage du réseau (problème de transport) dans le Problème du Postier Chinois et Rural, dans le problème d'affectation pour la confection d'un horaire, ou dans le regroupement des arcs en grappe pour la construction de circuits. La résolution d'un tel programme linéaire est effectuée à l'aide d'un solveur qui propose un langage de programmation évolué. Parmi ces nouveaux langages de programmation, le langage AMPL offre d'une part une approche orientée-objet permettant de dissocier le modèle mathématique et les données et d'autre part une librairie informatique permettant une

interaction avec les systèmes informationnels facilitant la résolution et l'interprétation des résultats.

Par exemple, le problème du transport (section 1.3.2.2) peut être modélisé comme suit :

```
set ORIG;
set DEST;

param offre{ORIG} >=0 ;
param demande{DEST} >=0 ;
param cout {ORIG,DEST} >= 0;

        check: sum {i in ORIG} offre[i] = sum {j in DEST} demande[j] ;

var Trans {ORIG,DEST} >= 0 ;

minimize Cout_Total :
        sum {i in ORIG, j in DEST} cout[i,j] * Trans[i,j];

subject to C_offre {i in ORIG}:
        sum {j in DEST} Trans[i,j] = offre[i];

subject to C_demande {j in DEST}:
        sum {i in ORIG} Trans[i,j] = demande[j];
```

Figure 3.13 : Modélisation du problème de transport (fichier *.mod d'AMPL)

Les données décrivant les différents ensembles (SET) peuvent être stockées dans divers systèmes informationnels notamment Microsoft Excel et Access, ou dans des fichiers de type texte.

L'accès aux données se fait par l'entremise de fichiers scripts, basés sur une architecture classique d'accès aux données (langage SQL). La figure 3.14 schématise l'architecture de données utilisée pour la résolution des différents problèmes.

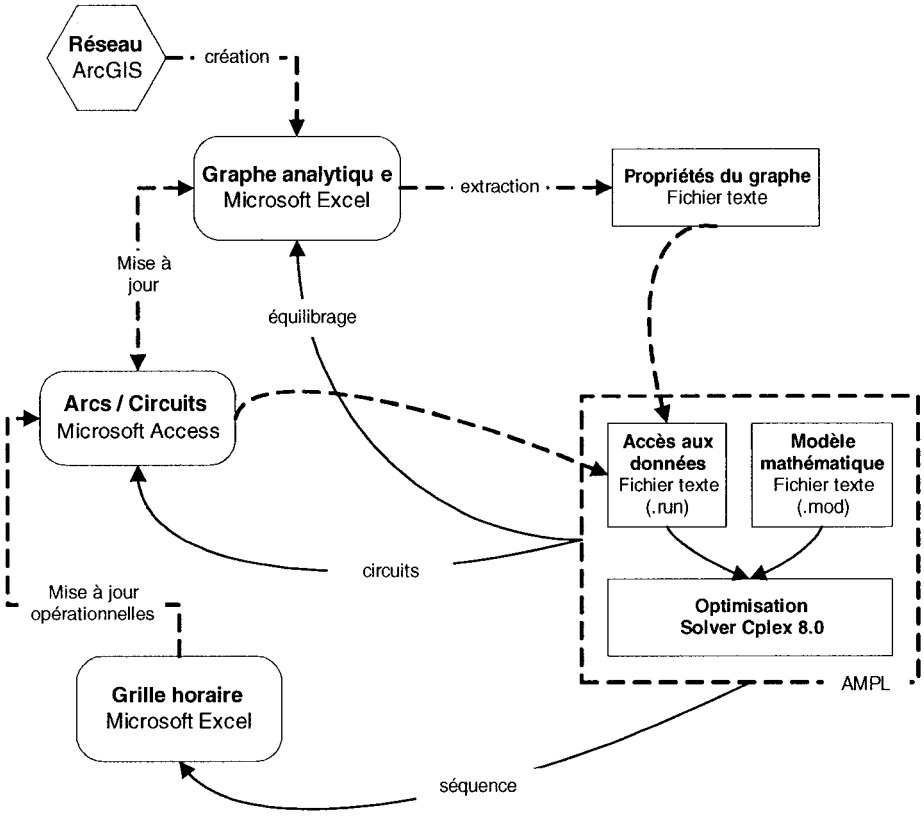


Figure 3.14 : Architecture d'accès aux données

Ces nouveaux développements facilitent grandement la résolution des problèmes mais impliquent un travail préliminaire sur le formalisme des données afin d'obtenir une bonne cohérence entre la grande quantité de données et le solveur.

3.4 Approche statique : confection d'un horaire basé sur des circuits prédéterminés

Les résultats des méthodes décrites dans les sections 3.4, 3.5 et 3.6 seront présentés au chapitre 4.

3.4.1 Pré-requis

L'approche statique de confection d'un horaire de travail est basée sur la préexistence de circuits de patrouille. Ces circuits peuvent être construits manuellement ou automatiquement et sont généralement basés sur l'expérience des patrouilleurs et des répartiteurs.

Comme mentionné dans la section précédente (section 3.3.2), les nouvelles méthodes de programmation nécessitent l'adoption d'une structure de donnée cohérente permettant une répétition des résolutions et une meilleure interprétation des résultats. La structure de données adoptée est présentée à la figue 3.15. L'accès aux données est effectué par l'intermédiaire de requêtes permettant de formaliser l'appartenance d'un lien à un circuit en adéquation avec le modèle mathématique développé.

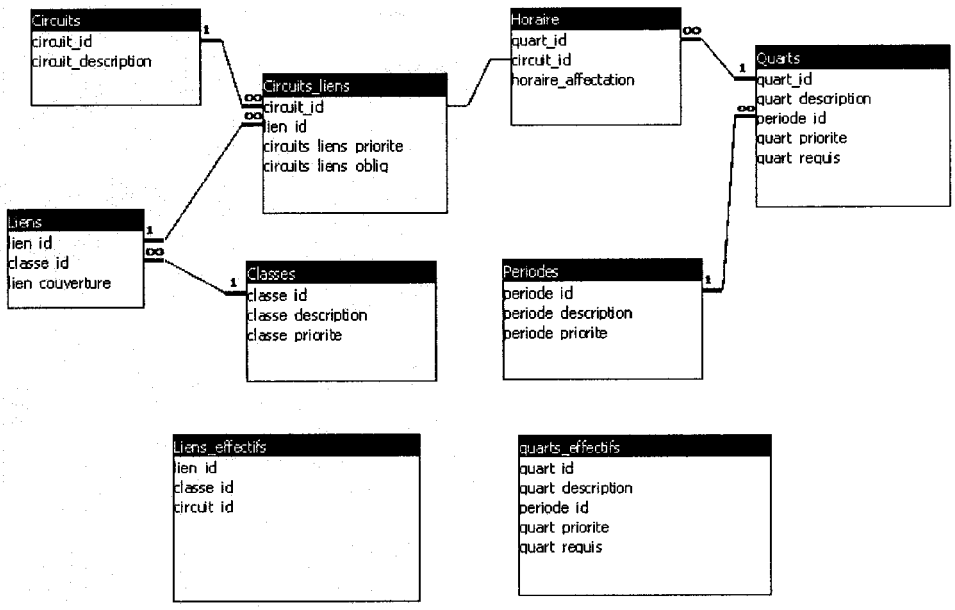


Figure 3.15 : Structure de données pour la confection de l'horaire

3.4.2 Résolution : confection d'un horaire

La principale difficulté de cette première méthode réside dans le choix de l'objectif qui dépend essentiellement de la vision du décideur. Le but de la confection d'un horaire de travail est de trouver une séquence de parcours des différents circuits prédéterminés afin de respecter les exigences de passage sur les différentes classes d'arcs. Ainsi, l'objectif a priori du modèle mathématique développé est de trouver une solution réalisable, donc sans objectif particulier (minimisation ou maximisation). Cependant, sachant que les différents circuits ne seront pas entièrement parcourus et connaissant l'importance relative des différentes classes d'arcs, on peut envisager les objectifs opérationnels suivant afin de nous assurer du respect des exigences :

- *Minimisation des coûts d'affectation.* Cette approche nécessite l'attribution d'un coût c_{kj} d'affectation du circuit k au quart de travail j. L'objectif mathématique du

modèle devient ainsi : $\min \sum_{k \in K} \sum_{j \in Q} c_{kj} y_{kj}$. Ce coût ne représente pas un coût réel mais une pénalité d'affecter un quart à un circuit. Les coûts sont initialisés à 1 et sont mis à jour après chaque résolution afin d'obtenir un brassage des solutions tout en respectant les contraintes (la mise à jour se fait par incrément de 1 pour chacune des affectation).

- *Maximisation de la couverture d'une classe prioritaire.* La hiérarchisation du réseau met l'accent sur une importance relative des différents arcs et se traduit par des contraintes opérationnelles resserrées sur les arcs de classe 1 (autoroutes). Ces arcs représentent ainsi des arcs prioritaires et l'affectation des circuits privilégiera dans ce cas une couverture de cette classe d'arcs en cas de place libre dans la solution. L'objectif mathématique devient alors :
  $\max \sum_{k \in K} \sum_{j \in Q} \sum_{i \in C_1} \partial_{ik} y_{kj}$ où ∂_{ik} représente l'appartenance d'un arc i au circuit k et y_{kj} l'affectation du circuit k au quart j.

- *Maximisation pondérée de la couverture des classes.* Cet objectif découle du précédent en affectant une pondération différentes à chacune des classes d'arcs afin d'obtenir une certaine globalité dans l'objectif. L'objectif mathématique s'écrit : $\max \sum_{k \in K} \sum_{j \in Q} \sum_{i \in A} \alpha_i \partial_{ik} y_{kj}$ où α_i représente la pondération .

- *Maximisation de la couverture d'arcs prioritaires.* L'approche désagrégée adoptée permet de prioriser n'importe lequel des arcs du réseau suivant un critère choisi. Ce critère peut notamment représenter le débit moyen journalier ou une forte fréquence d'incident. Ce critère se traduit ainsi par une pondération de chacun des arcs du réseau w_i. L'objectif mathématique de cette vision se traduit comme suit : $\max \sum_{k \in K} \sum_{j \in Q} \sum_{i \in A} \partial_{ik} y_{kj} \omega_i$.

- *Minimisation de la distance totale parcourue.* Il s'agit dans ce cas de minimiser la distance totale parcourue au cours de l'horizon de planification tout en respectant les différentes contraintes de passage. Cet objectif ne semble pas, à prime abord, être adapté au problème, mais il correspond à une réalité opérationnelle, celle du déroutage continuel du véhicule. En sachant que le véhicule va être dérouter au cours des opérations, il devient alors nécessaire de planifier des parcours de longueurs minimales. L'objectif mathématique s'écrit :

  $\min \sum_{k \in K} \sum_{j \in Q} \sum_{i \in A} \partial_{ik} y_{kj} l_i$ où l_i représente la longueur de l'arc i.

La figure 3.16 présente un exemple de résultat obtenu en maximisant la couverture des arcs de classe 1. Chaque case horaire comporte un numéro du circuit, la lettre I signifie qu'il s'agit d'un circuit parcouru dans le sens inverse.

	FS1		**S1**					**FS2**		**S2**				
1	6	9		7	12I	12	18I	6	9I		7I	12	2I	18
2	9I	1	15I	10	2	16I	14	8	11	4	12I	2	6I	9I
3	11I	1	15	16	18I	6I	1	16	1	16I	4I	10I	14I	1

Figure 3.16 : Exemple de grille horaire obtenue

3.5 Une approche basée sur la replanification : variation des ensembles, déclaration physique et temporelle

L'approche basée sur la replanification des activités a été développée afin de pouvoir intégrer les données opérationnelles de couverture des arcs dans la confection de l'horaire de travail (séquence de parcours des circuits). Elle s'appuie sur le modèle général d'affectation présenté à la figure 2.9. Il s'agit principalement dans ce cas de faire varier les différents ensembles (ensemble des arcs et ensemble des quarts) afin d'une part de tenir compte des activités opérées et d'autre part de réduire progressivement de la taille de l'horizon. Cette méthode n'utilise que des circuits prédéterminés et la valeur de la solution obtenue dépend ainsi grandement de ces circuits.

3.5.1 Modélisation mathématique

La fin de l'horizon de planification utilisé au cours des différentes replanification doit demeurer le même et ne peut être flottant sous risque de reporter continuellement la couverture de certains arcs. Ceci nécessite donc le retranchement des arcs couverts de l'ensemble des arcs A et des quarts de travail effectués de l'ensemble des quarts Q.

Cependant, l'évolution temporelle des différents ensembles d'arcs ne nous permet plus d'utiliser ce modèle mathématique dans sa forme actuelle. En effet, l'ensemble des arcs de classe C1 doit être réinitialisé après chacune des périodes (Fin de Semaine 1, Semaine 1, Fin de Semaine 2, Semaine 2), l'ensemble des arcs de classe 2 doit être initialisé après les 7 premiers jours. L'ensemble des arcs de classe 3 quant à lui peut être modifié au cours de tout l'horizon. Il devient donc nécessaire d'indexer les différents ensembles d'arcs en fonction des 4 périodes de l'horizon de planification.

Le modèle mathématique induit par cette modification est présenté à la figure 3.17.

Soit $Q = FS_1 \cup S_1 \cup FS_2 \cup S_2$ l'ensemble des quarts de travail
Soit K l'ensemble des circuits prédéterminés
Soit A l'ensemble des arcs
Soit C_1, C_2, C_3 les trois classes d'arcs
Soit $C_1(FS_1), C_1(S_1), C_1(FS_2), C_1(S_2) \subseteq C_1$ les ensembles d'arcs de classe1 pour les différentes périodes
Soit $C_2(FS_1 \cup S_1), C_2(FS_2 \cup S_2) \subseteq C_2$ les ensembles d'arcs de classe 2 pour les deux semaines

$$\partial_{ik} = \begin{cases} 1 \text{ si l'arc } i \text{ appartient au circuit } k \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

La variable de décision :

$$y_{kj} = \begin{cases} 1 \text{ si le circuit k est affecté au quart de travail j} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

$$\max \sum_{k \in K} \sum_{j \in Q} \sum_{i \in C_1} \partial_{ik} y_{kj} \qquad (1)$$

s.c.

$$\sum_{k \in K} y_{kj} \leq 1 \qquad \forall j \in Q \qquad (2)$$

$$\sum_{j \in \alpha} \sum_{k \in K} \partial_{ik} y_{kj} \geq 1 \qquad \text{pour } \alpha = FS_1, S_1, FS_2, S_2 \text{ et } i \in C_1(\alpha)$$

$$\sum_{j \in \alpha} \sum_{k \in K} \partial_{ik} y_{kj} \geq 1 \qquad \text{pour } \alpha = FS_1 \cup S_1, FS_2 \cup S_2 \text{ et } i \in C_2(\alpha) \qquad (3)$$

$$\sum_{j \in \alpha} \sum_{k \in K} \partial_{ik} y_{kj} \geq 1 \qquad \forall i \in C_3 \text{ et pour } \alpha = FS_1 \cup S_1 \cup FS_2 \cup S_2$$

$$y_{kj} = \{0;1\} \qquad (4)$$

Figure 3.17 : Modèle mathématique de replanification

3.5.2 Traitement de l'information

Cette méthode de résolution a pour avantage de tenir compte des activités effectivement opérées dans la replanification mais nécessite également un plus grand effort au niveau du traitement de l'information du fait de la nature temporelle des changements. Considérons l'exemple de la figure 3.18 et une replanification à partir du début de la semaine 1 (les circuits en italiques sont obtenus après replanification, la couverture des arcs des circuits planifiés de FS1 étant réalisée à l'exception de quelques arcs par circuit).

	FS1	**S1**					**FS2**		**S2**				
1			*15*	*14I*	*6I*	*16*	*10*	*9*		*15*	*14I*	*6I*	*16*
2		*10I*	*16I*	*12I*	*7I*	*14*	*9I*	*16I*	*10I*	*16I*	*12I*	*7I*	*12*
3		*15I*	*18*	*2*	*2I*	*1*	*11*	*1*	*15I*	*18*	*2*	*2I*	*1*

Figure 3.18 : Exemple de replanification

Les exigences en matière de définition des ensembles sont pour cet exemple :

- FS1 := ϕ ;
- C1(S1) := C1(FS2) := C1(S2) := C1
- C2(FS1∪S1) := C2 \ {Arcs couverts durant FS1} et C2(FS2∪S2) := C2
- C3 : = C3 \ {Arcs couverts durant FS1}

Il faut également ajouter la re-génération des paramètres ∂_{ik} (appartenance de l'arc i au circuit k) face à la nouvelle population des ensembles.

3.5.3 Résolution : choix de l'objectif

La résolution d'un tel modèle peut a priori être réalisée après n'importe lequel des quarts de travail. Cependant, en fonction des opérations effectivement opérées, une

replanification à la fin d'une période éloignée, notamment à la fin de la première semaine entraîne l'incapacité de trouver une solution satisfaisant les différentes contraintes.

Les différentes expérimentations réalisées permettent de faire ressortir les causes de cette incapacité à résoudre :

- le nombre prédéterminé de circuit ;
- le caractère « statique » des circuits ;
- le nombre important d'arcs de classe 3 (188 arcs sur un total de 374) répartis en périphérie du réseau (figure 3.19) et leur présence dans de nombreux circuits.

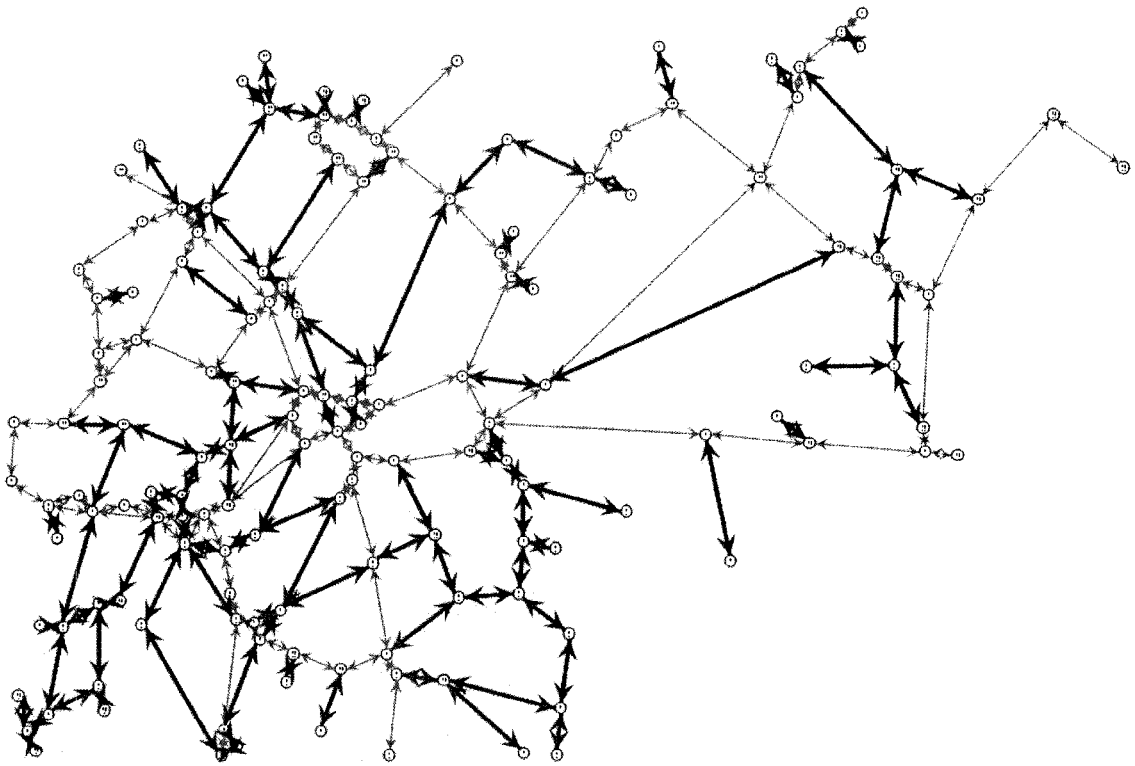


Figure 3.19 : Répartition des arcs de classe 3

Le caractère moins important des arcs de classe 3 a pour effet de reporter leur couverture face à la couverture des arcs plus importants. Cette particularité

opérationnelle a pour effet de confiner la couverture de nombre de ces arcs en fin de période ou en fin d'horizon. Ceci mènera, avec la définition actuelle des circuits, à une impossibilité de satisfaire la contrainte de couverture des arcs de classe 3 et ainsi à l'impossibilité de confection de l'horaire.

Afin de palier ce problème, il est possible de supprimer la contrainte de couverture des arcs de classe 3 et encore mieux, de l'inclure dans l'objectif. Le programme linéaire en nombres entiers induit par ce changement de vision est présenté à la figure 3.20.

Cette nouvelle définition, qui est une relaxation du problème réel, permet l'existence d'une solution dans un plus grand nombre de cas réels, même si les vraies contraintes en matière de couverture ne sont pas toutes satisfaites.

Soit $Q = FS_1 \cup S_1 \cup FS_2 \cup S_2$ l'ensemble des quarts de travail
Soit K l'ensemble des circuits prédéterminés
Soit A l'ensemble des arcs
Soit C_1, C_2, C_3 les trois classes d'arcs
Soit $C_1(FS_1), C_1(S_1), C_1(FS_2), C_1(S_2) \subseteq C_1$ les ensembles d'arcs de classe 1 pour les différentes périodes
Soit $C_2(FS_1 \cup S_1), C_2(FS_2 \cup S_2) \subseteq C_2$ les ensembles d'arcs de classe 2 pour les deux semaines

$$\partial_{ik} = \begin{cases} 1 \text{ si l'arc } i \text{ appartient au circuit } k \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

La variable de décision :

$$y_{kj} = \begin{cases} 1 \text{ si le circuit k est affecté au quart de travail j} \\ 0 \text{ sinon} \end{cases}$$

$$\max \sum_{k \in K} \sum_{j \in Q} \sum_{i \in C_3} \partial_{ik} y_{kj} \qquad (1)$$

s.c.

$$\sum_{k \in K} y_{kj} \leq 1 \quad \forall j \in Q \qquad (2)$$

$$\sum_{j \in \alpha} \sum_{k \in K} \partial_{ik} y_{kj} \geq 1 \quad \text{pour } \alpha = FS_1, S_1, FS_2, S_2 \text{ et } i \in C_1(\alpha)$$

$$\sum_{j \in \alpha} \sum_{k \in K} \partial_{ik} y_{kj} \geq 1 \quad \text{pour } \alpha = FS_1 \cup S_1, FS_2 \cup S_2 \text{ et } i \in C_2(\alpha) \qquad (3)$$

$$y_{kj} = \{0;1\} \qquad (4)$$

Figure 3.20 : Modèle mathématique d'affectation modifié

3.6 Une approche basée sur l'intégration : augmentation des circuits prédéterminés

3.6.1 Définition

La notion de circuit diffère d'un auteur à l'autre et doit être clarifiée en fonction de l'application dans laquelle elle est utilisée. Un circuit est défini, dans cette étude, comme une collection orientée d'arcs, ayant comme premier et dernier nœud le dépôt. Contrairement à des Problèmes de Postier Rural où les arcs non obligatoire sont généralement parcourus plus rapidement (en terme de vitesse) que les arcs obligatoires (notion de durée de service), tous les arcs appartenant à un circuit sont dans ce problème dits obligatoires. Ainsi, si un arc ne devant pas être couvert est inséré dans un circuit, il sera tout de même parcouru et les incidents éventuels s'y rattachant seront pris en compte.

Cette méthode consiste ainsi à intégrer les arcs non couverts à un ensemble de circuits afin de pouvoir parcourir ces arcs dans le reste de l'horizon. Le choix des circuits potentiels ainsi que l'intégration des arcs peuvent être tous deux effectués de diverses manières. La figure 3.21 illustre les étapes de cette méthode qui seront discutés dans les sections suivantes.

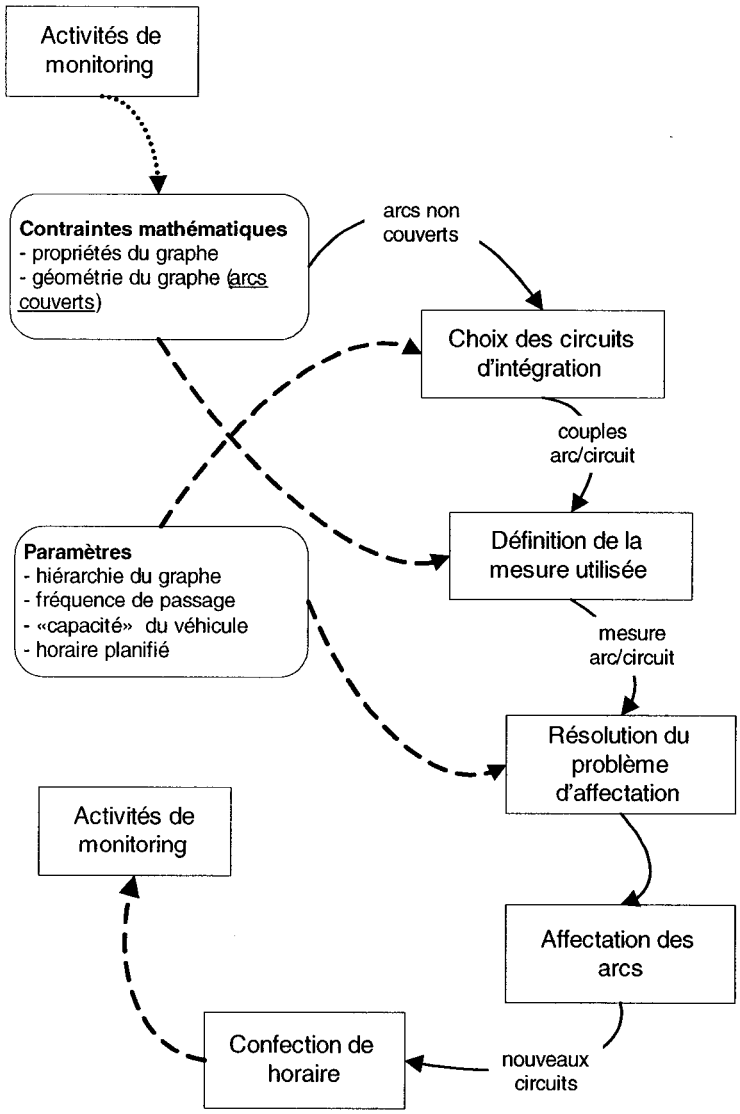


Figure 3.21 : Étapes de la méthode d'augmentation des circuits

3.6.2 Choix du circuit d'affectation

Le choix du circuit de réaffectation des arcs non couverts dépend une fois de plus de la vision du décideur et doit être effectué en fonction de l'objectif final recherché. Ainsi, sans contrainte particulière, un arc non couvert peut a priori être réaffecté à n'importe lequel des circuits.

Cependant, afin de diminuer le traitement de l'information ainsi que la taille des modèles mathématiques, on ne considérera ici que les circuits déjà planifiés comme susceptibles d'être augmentés. Cette vision est gouvernée par le fait que les circuits effectivement planifiés répondent déjà aux différentes contraintes. Ce choix dépend ainsi étroitement du moment où la replanification est effectuée et se traduit par une variation de l'ensemble des circuits admissibles :

- si l'arc est de classe 1 : l'ensemble des circuits admissibles est le groupe de circuits planifiés dans la période où est effectuée la replanification ;
- si l'arc est de classe 2 : l'ensemble des circuits admissibles est le groupe de circuits planifiés de la période, augmenté du groupe de circuit planifiés dans la période suivante si elle correspond à la même semaine ;
- si l'arc est de classe 3 : l'ensemble des circuits admissibles est le groupe de circuits planifiés du reste de l'horizon.

3.6.3 Ajout d'un arc à un circuit : définition de la mesure

La définition adoptée pour la définition d'un circuit (3.6.1) simplifie grandement le développement d'une méthode d'ajout d'un arc à un circuit. Dans le cas d'existence d'arcs non obligatoires dans un circuit, cette tâche est plus périlleuse car elle donne naissance à des chemins inutiles qui peuvent être retranchés du circuit (MITTAZ, 1999).

L'insertion d'un arc à un circuit préalablement choisi dépend de l'objectif que l'on recherche par cette insertion. Les méthodes décrites dans la littérature visent généralement à minimiser la distance additionnelle parcourue occasionnée par l'ajout de l'arc. La figure 3.22 présente une méthode d'ajout d'un arc basée sur une telle minimisation (d'après MITTAZ, 1999).

Méthode Ajouter_Arc

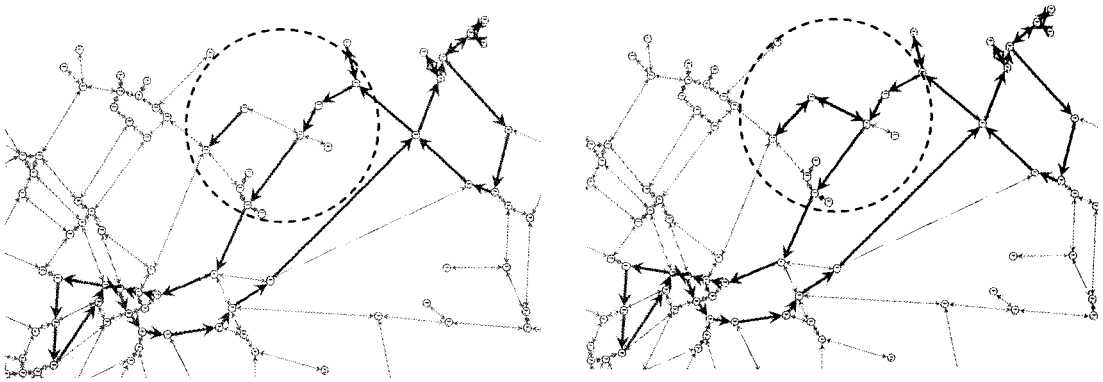
C un circuit, (i, j) l'arc à ajouter

1. Si i n'est pas présent dans C alors trouver le sommet $k \in C$ minimisant la distance $d_{ki} + d_{jk}$ et ajouter les chemins (k,i) et (j,k) à C.

2. Si i est présent dans C alors ajouter le plus court chemin (j,i)

Figure 3.22 : Méthode d'ajout d'un arc

La figure 3.23 illustre l'application de cette méthode.



a) Circuit et arc à ajouter

b) Circuit résultant

Figure 3.23 : Exemple d'ajout d'un arc à un circuit

Bien entendu, cette méthode assez simpliste ne permet pas de modifier l'ensemble de la tournée afin d'obtenir un circuit plus adéquat. La mesure utilisée sera ainsi la distance totale supplémentaire occasionnée par l'ajout potentiel d'un arc à un circuit.

En adoptant une vision globale et en intégrant une simultanéité dans le choix du circuit et la place d'intégration, on peut entrevoir la résolution de ce problème sous forme d'un problème d'affectation. La figure 3.24 présente le modèle mathématique développé.

Soit : A l'ensemble des arcs,
K l'ensemble des circuits,
d_{ik} la distance ajoutée par l'insertion de l'arc $i \in A$ au circuit $k \in K$,
l_k la longueur du circuit $k \in K$,
C la capacité du véhicule.

La variable de décision :

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 \text{ si l'arc circuit i est affecté au circuit k} \\ 0 \text{ sinon.} \end{cases}$$

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{i \in A} d_{ik} y_{ik} \qquad (1)$$

$s.c.$

$$\sum_{k \in K} y_{ik} = 1 \qquad \forall i \in A \qquad (2)$$

$$l_k + \sum_{i \in A} d_{ik} y_{ik} \leq C \qquad \forall k \in K \qquad (3)$$

$$y_{ik} = \{0;1\} \qquad (4)$$

Figure 3.24 : Modèle mathématique d'affectation des arcs au circuits

Le modèle de transport présenté à la figure 3.24 a pour objectif de minimiser la distance totale ajoutée par l'affectation de tous les arcs non couverts. La distance d_{ik} correspond à la distance calculée dans la procédure Ajouter_Arc décrite précédemment à laquelle est ajoutée la longueur de l'arc i. Le premier groupe de contrainte (2) assure que chaque arc soit affecté à un circuit. Le deuxième groupe de contrainte (3) s'assure du respect de la capacité du véhicule pour chacun des circuits. Le dernier groupe de contrainte (4) représente l'intégrité des variables.

Cependant, la mesure utilisée ne permet pas de facilement quantifier la capacité du véhicule. En effet, l'ajout de deux arcs à un même circuit, dans une même région, n'occasionnera pas l'ajout des deux distances mais du maximum de ces deux mesures.

Ainsi, le modèle mathématique a été relaxé en supprimant cette contrainte et en n'en tenant plutôt compte dans le choix du circuit admissible pour une réaffectation. De ce fait, l'ensemble des circuits potentiels pour une réaffectation sont ceux déjà planifiés, mais ne dépassant pas la capacité (ou à peu près) du véhicule. Cette contrainte est donc remplacée par un paramètre limitant l'affectation d'arcs à un circuit (3). La figure 3.25 présente le modèle mathématique relaxé.

Cette modification permet de s'assurer d'une part que les nouveaux circuits créés n'aient pas une longueur trop importante, et d'autre part, d'accentuer la diversité des circuits produits. Dans tous les cas, cette modification ne nuit aucunement à la résolution du problème car la capacité du véhicule n'intervient pas directement dans l'optimisation mais dans la composante opérationnelle du processus.

Soit : A l'ensemble des arcs,
K l'ensemble des circuits
d_{ik} la distance ajoutée par l'insertion de l'arc $i \in A$ au circuit $k \in K$,
α le nombre maximum d'arcs pouvant être affectés à un circuit.

La variable de décision :

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 \text{ si l'arc i est affecté au circuit k} \\ 0 \text{ sinon.} \end{cases}$$

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{i \in A} d_{ik} y_{ik} \qquad (1)$$

$$s.c.$$

$$\sum_{k \in K} y_{ik} = 1 \quad \forall i \in A \qquad (2)$$

$$\sum_{i \in A} y_{ik} \leq \alpha \quad \forall k \in K \qquad (3)$$

$$y_{ik} = \{0;1\} \qquad (4)$$

Figure 3.25 : Modèle mathématique modifié d'affectation des arcs aux circuits

Encore une fois, l'utilisation d'une structure de données cohérente et d'un langage de programmation évolué nous permettent de générer des modèles de plus petite taille et de minimiser l'effort en matière de traitement des données. En effet, il n'est pas nécessaire avec de tels langages de se soucier de tous les couples (arc, circuit) et d'affecter une valeur infinie à la distance lorsque l'arc ne peut être affecter à un circuit précis. Le fichier modèle présenté à la figure 3.26 présente une manière de réduire la taille du problème.

```
set ARCS ; # ensembles des arcs à affecter
set CIRCUITS ; # ensemble des circuits admissibles pour chaque arc
set LIENS within {ARCS,CIRCUITS} ;

param distance {LIENS} >= 0 ; # distance ajoutée par l'ajout de l'arc au circuit
param limite {CIRCUITS} default 6 ; # capacité du véhicule
param longueur {CIRCUITS} >=0 ; # longueur du circuit

var Affectation {LIENS}, binary ; # affectation de l'arc au circuit;

minimize Distance_totale :
        sum {(a,c) in LIENS} Affectation[a,c]*distance[a,c];

subject to Affect_arc {a in ARCS}:
        sum {c in CIRCUITS : (a,c) in LIENS} Affectation[a,c] = 1;

subject to Limite_affect {c in CIRCUITS}:
        sum {a in ARCS : (a,c) in LIENS } Affectation[a,c] <= limite[c];
```

Figure 3.26 : Fichier modèle (AMPL) du problème d'affectation des arcs aux circuits

La notion de LIENS introduite dans cette méthode de résolution permet de ne définir que les couples (ARCS, CIRCUITS) existant réellement. Cette approche permet de réduire le traitement de données ainsi que la taille du problème mais nécessite un peu plus d'effort en matière de programmation.

Les données sont ainsi séparées du modèle et stockées dans différents outils informationnels. Elles peuvent également être stockées dans des fichiers de type texte qui peuvent facilement être générés par code informatique.

La figure 3.27 présente un exemple de fichier de données (de type texte) utilisable avec ce modèle.

```
param : CIRCUITS : longueur :=
CIR1 254 CIR2 260 CIR3 310 CIR4 220 CIR5 330;

set ARCS := L301 L302 L303 L304 ;

param : LIENS : distance :=
L301    CIR1    25
L301    CIR3    30
L302    CIR1    22
L302    CIR4    32
L303    CIR2    45
L303    CIR5    12
L304    CIR1    55
L304    CIR2    33
L304    CIR3    55
L304    CIR4    28
L304    CIR5    20 ;
```

Figure 3.27 : Fichier de données (DAT) pour le modèle d'affectation des arcs

3.7 Une approche basée sur la construction : confection théorique et opérationnelle

Cette ultime approche offre le plus fort degré de dynamisme car elle est basée sur une construction continuelle de circuits en accord avec les activités réellement opérées. Cette approche est donc théoriquement la mieux adaptée au problème mais elle n'en reste pas moins la plus difficile à mettre en œuvre car elle fait appel à des concepts mathématiques qui ne sont pas toujours en accord avec les réalités opérationnelles. Les différentes étapes composant cette méthode sont présentées à la figure 3.28.

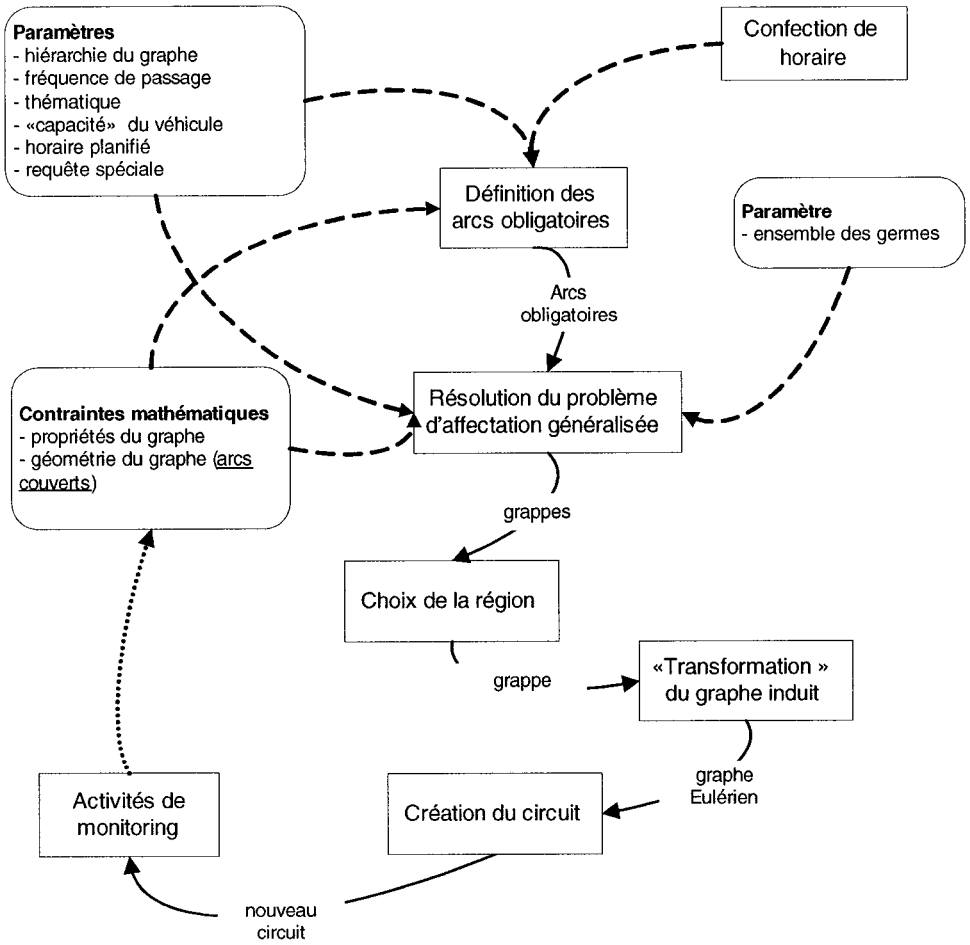


Figure 3.28 : Méthodologie de résolution de la méthode de construction

Cette méthode de résolution est basée sur la technique « Groupes & Tournée » (*Cluster-First, Route-Second*) décrite dans la section 1.3.4. Cette technique semble à première vue relativement simple mais chacune des étapes présentées à la figure 3.28 présente une grande difficulté, tant du point de vue mathématique, qu'informationnel ou opérationnel, lorsque le graphe mathématique possède plusieurs centaines de liens. Cette section vise ainsi à décrire les différentes problématiques de mise en œuvre de cette méthode ainsi que ses limites face à une utilisation opérationnelle.

3.7.1 Définition des arcs obligatoires et regroupement des arcs

La méthodologie de résolution présentée dans cette section se base sur un regroupement préliminaire des arcs sous forme de grappes (*clusters*) autour de différents germes (*seeds*) préalablement définis. Cette manière de procéder permet de contrer le problème de la capacité du véhicule en s'assurant que le graphe induit par la chacune des grappe la respecte.

Cependant, le première difficulté rencontrée dans cette étape n'est pas tant le regroupement que la définition des arcs à regrouper. En effet, la notion d'arc obligatoire varie dans le temps et doit être définie de manière précise :

- si la planification, ou dans ce cas la construction, est effectuée au début d'une fin de semaine, seuls les arcs de classe 1 sont obligatoires ;
- si la construction est effectuée au début d'une semaine, tous les arcs de classe 1 et de classe 2 non couverts sont obligatoires ;
- au fur et à mesure de l'avancement au sein d'une période, les arcs couverts deviennent non obligatoires.

Cette définition ne semble pas inclure les arcs de classe 3 mais ceux-ci seront ajoutés s'il reste de la capacité.

Ceci nous amène à considérer le processus de résolution de manière itérative (pour une région particulière) afin d'intégrer progressivement les arcs des différentes classes. Ce cheminement est présenté à la figure 3.29.

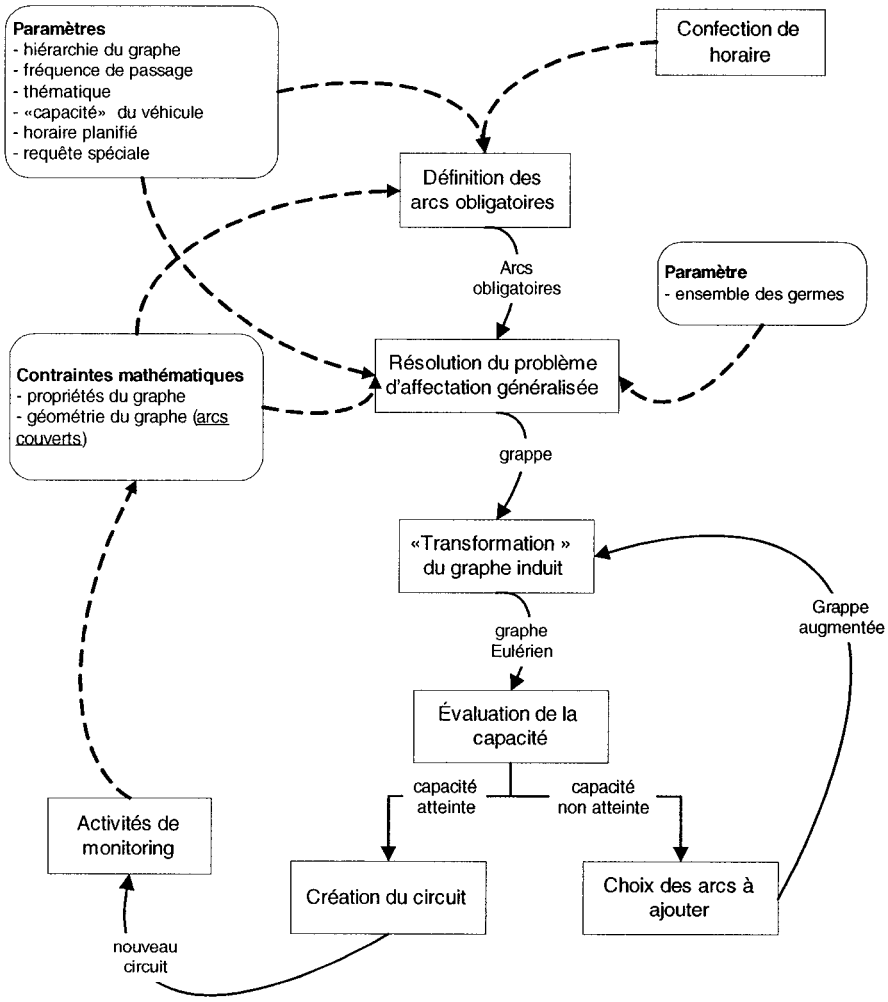


Figure 3.29 : Cheminement itératif de construction d'un circuit

La création d'une grappe est effectuée à l'aide du programme linéaire d'affectation généralisé utilisé dans les problèmes de tournées de véhicule (FISHER ET JAIKUMAR, 1981). La pierre angulaire d'un tel modèle réside dans la définition de la mesure

d'affectation des arcs aux germes qui est souvent très compliquée. On procède généralement à une approximation linéaire, illustrée à la figure 3.30, de la forme :
$d_{ik} = \min\{c_{oi} + c_{ik} + c_{ko}; c_{ok} + c_{ki} + c_{io}\} - (c_{ok} + c_{ko})$ où k est un germe, o le dépôt et i un arc.
c_{ij} représente le plus court chemin de i à j.

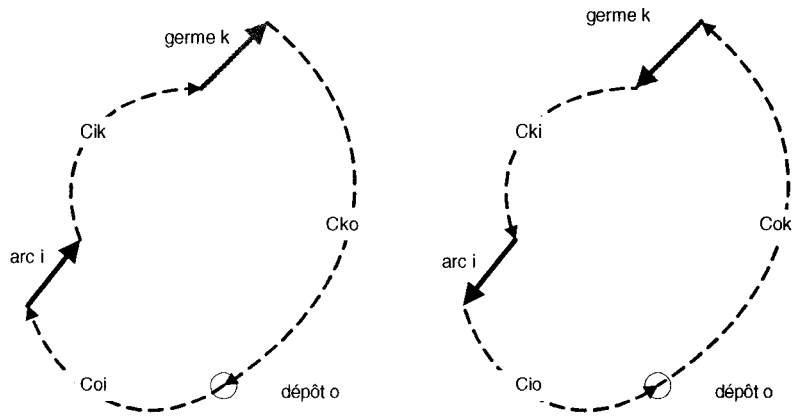


Figure 3.30 : Approximation linéaire de la mesure d'affectation généralisée

Le programme linéaire d'affectation généralisée est présenté à la figure 3.31.

Le programme linéaire s'écrit comme suit :

Soit : A l'ensemble des arcs,

K l'ensemble des germes,

d_{ik} la distance ajoutée par l'insertion de l'arc $i \in A$ au germe $k \in K$,

l_i la longueur de l'arc i,

C la capacité du véhicule.

La variable de décision :

$$y_{ik} = \begin{cases} 1 \text{ si l'arc i est affecté au germe k} \\ 0 \text{ sinon.} \end{cases}$$

$$\min \sum_{k \in K} \sum_{i \in A} d_{ik} y_{ik} \qquad (1)$$

s.c.

$$\sum_{k \in K} y_{ik} = 1 \quad \forall i \in A \qquad (2)$$

$$\sum_{i \in A} y_{ik} l_i \leq C \quad \forall k \in K \qquad (3)$$

$$y_{ik} = \{0;1\} \qquad (4)$$

Figure 3.31 : Programme linéaire d'affectation généralisée

3.7.2 Transformation du graphe induit

Le graphe induit par ce regroupement d'arcs obligatoires ne possède a priori aucune des deux conditions nécessaire à l'obtention d'un circuit Eulérien :

- un graphe connexe ;
- un graphe équilibré.

Il existe diverses méthodes de transformation de graphe afin d'obtenir ces deux propriétés (EISELT, 1995). Nous privilégions ici une mise en œuvre plus simple basée sur l'heuristique « *connect-and-balance* » développée par Ball & Magazine (BALL,

1988). Sa mise en œuvre est premièrement basée sur une augmentation progressive du graphe induit jusqu'à l'obtention d'un graphe connexe puis au balancement à l'aide d'un problème du transport. Il se définit comme suit :

Resred est le réseau réduit, N l'ensemble de ses noeuds

Resred := Ensemble des arcs obligatoires + un arc entrant et un sortant du dépôt
CalculPlusCourtChemin (Resred)

Faire tant que $\forall(i, j) \in (NxN)$ distance$(i, j) \neq \infty$
  Identifier un couple $(i, j) \mid$ distance$(i, j) = \infty$
  Déterminer les arcs S'_{ij} du plus court chemin S_{ij} de i à j dans <u>le réseau initial</u> qui n'appartiennent pas à Resred
  Resred := Resrd $\cup$ S'_{ij}
  CalculPlusCourtChemin(ResRed)
Boucle

Figure 3.32 : Algorithme de connexion du graphe

Le calcul des plus courts chemins est effectué à l'aide de l'algorithme de Floyd-Warshall qui maintient la plus courte distance entre chacune des paires de nœuds du réseau ainsi que le plus court chemin sous forme d'identificateur du prédécesseur. La difficulté rencontrée dans la mise en œuvre de cet algorithme est la recherche de déconnexion dans le réseau réduit et l'ajout du plus court chemin dans le réseau initial.

La deuxième phase de la méthode est plus « classique ». Il s'agit de rendre le graphe obtenu Eulérien. Cette phase est réalisée à l'aide du programme linéaire de transport entre les nœuds négativement et positivement déséquilibrés (cf section 1.3.2.2). Encore une fois, le calcul et l'ajout du plus court chemin sont réalisés à partir du graphe initial.

3.7.3 Évaluation de la capacité – Augmentation du circuit

L'obtention d'un graphe Eulérien est suffisante pour l'évaluation de la demande capacité occasionnée par le circuit qui sera construit à partir de ce graphe, puisqu'il aura la longueur de ce graphe. En cas de disponibilité de capacité, il faut recommencer le processus en ajoutant des arcs obligatoires à l'ensemble initial d'arcs.
Le choix des arcs à ajouter est donc réalisé suivant la classe de l'arc mais doit également être entrevu sous l'optique de la proximité avec le « circuit » préalablement construit. Ce choix peut également être gouverné par l'urgence de couverture d'un arc en terme de fréquence des incidents ou d'événements spéciaux.

3.7.4 Circuit Eulérien et circuit opérationnel

La construction d'un circuit Eulérien est basée sur l'obtention préalable d'un graphe connexe et Eulérien. Une fois cette caractéristique obtenue, la construction du circuit est généralement faite de manière pseudo aléatoire. Les algorithmes mathématiques se basent généralement sur :

- la construction d'une anti-arborescence ;
- la numérotation des arcs sortant de telle sorte, que pour chacun des nœuds du graphe, les arcs de l'anti-arborescence possèdent des numéros les plus élevés.

3.7.4.1 Construction de l'anti-arborescence

La première étape consiste donc à construire de façon automatisée cette anti-arborescence. Cette arborescence est enracinée au nœud correspondant au départ (et à l'arrivée de la tournée) et peut être construite en utilisant un algorithme de recherche inversé.

Algorithme de recherche inversé

NoeudTemp := *NoeudSource*
NoeudTemp.Marque = *Vrai*
EnsembleNoeud.Ajouter (*NoeudTemp*)

Faire

Pour chaque *Arc* = *NoeudTemp.ArcEntrant* Faire
  si *Arc.AutreNoeud(NoeudTemp).Marque* = *Faux* alors
  Arc.Marque = *Vrai*
  Arc.AutreNoeud(*NoeudTemp*).*Marque* = *Vrai*
  EnsembleNoeud.Ajouter (*Arc.AutreNoeud*(*NoeudTemp*)
  Fin Si
Boucle
EnsembleNoeud.Supprimer (*NoeudTemp*)
NoeudTemp := *EnsembleNoeud.Item*(1)

Jusqu'à ce que *EnsembleNoeud.Compte* = 0

Figure 3.33 : Algorithme de confection de l'anti-arborescence

L'ensemble des arcs marqués constitue une anti-arborescence. La figure 3.34 illustre un exemple d'utilisation de cet algorithme de recherche en considérant le nœud N38 comme le nœud source.

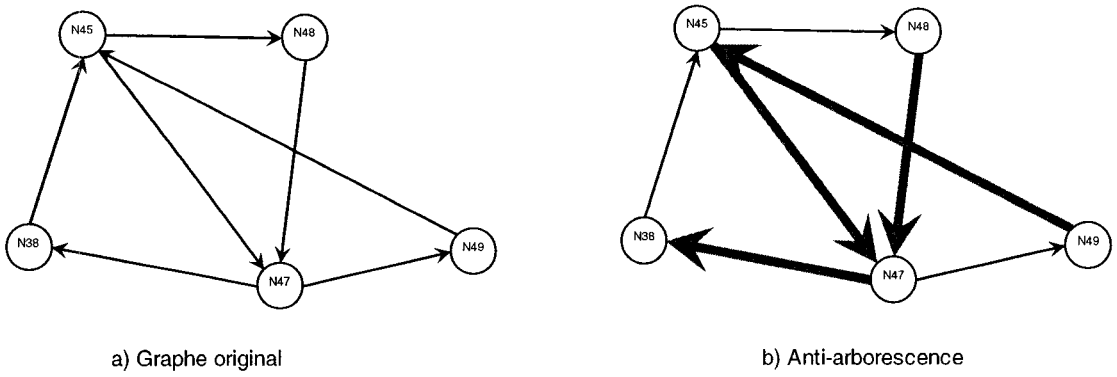
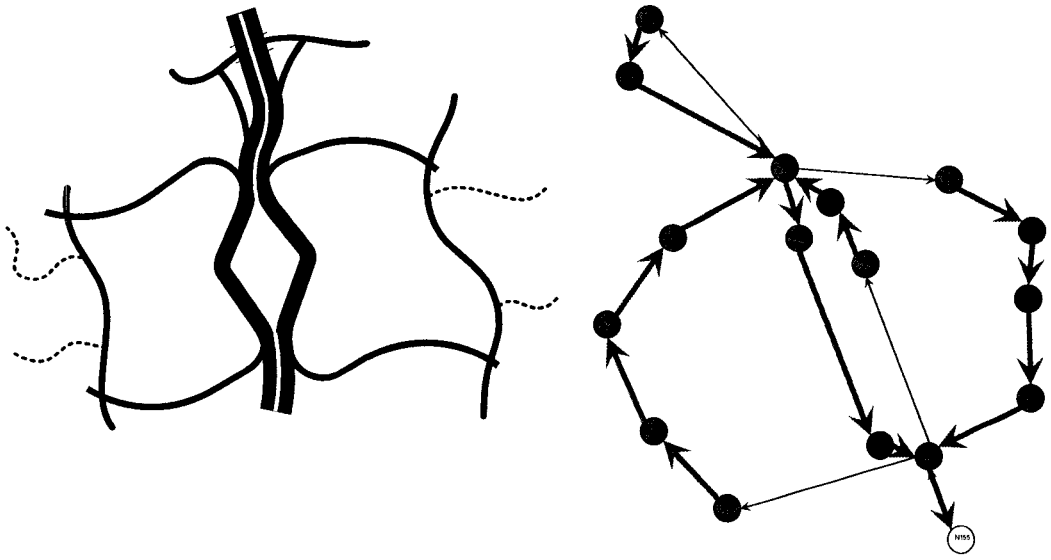


Figure 3.34 : Exemple d'anti-arborescence enracinée au nœud N38

La construction d'une anti-arborescence est réalisée dans cette étude à l'aide de l'algorithme de Dijkstra Inversé (cf section 1.3.1.1). En effet, cet algorithme renvoie l'arbre de plus court chemin enraciné à un nœud source, qui représente une anti-arborescence. L'utilisation d'une telle anti-arborescence est justifiée par l'utilisation d'un algorithme semblable pour le calcul des plus courts chemins. Elle a également pour avantage de pouvoir revenir au nœud source de la façon la plus courte. Ainsi, dans le cas d'une tournée de véhicule, cela signifierait qu'en tout temps, le véhicule peut revenir au dépôt de la façon la plus rapide en empruntant les arcs de cette anti-arborescence.

3.7.4.2 Construction du circuit - Parcours d'un graphe Eulérien

Le parcours d'une manière pseudo aléatoire du graphe Eulérien permet certes de traverser une fois chacun des arcs du réseau (ou de leur copie) mais est souvent inadapté face aux contraintes opérationnelles ou au mode opératoire utilisé par les patrouilleurs.
Il faut ainsi introduire des règles de décision à chacun des nœuds rencontrés pour le choix de l'arc suivant à emprunter en plus de la simple appartenance à l'anti-arborescence. L'exemple de la figure 3.35 montre une des caractéristiques à prendre en compte : la route empruntée. En effet, si le patrouilleur a commencé le parcours d'une autoroute, il continuera le parcours sur cette même autoroute s'il en a la possibilité.



a) Réseau à parcourir

b) Graphe induit et anti-arborescence

Figure 3.35 : Exemple de spécificité opérationnelle

Le point de départ du circuit se trouve au bas de l'autoroute (nœud N155) et le patrouilleur peut effectuer un demi-tour sur l'autoroute aux endroits où cela est permis. Le début de parcours du graphe s'effectue donc sur une autoroute. Arrivé à la première sortie, le patrouilleur a le choix de continuer sur l'autoroute jusqu'au nœud le plus au nord ou de prendre la sortie et de parcourir des arcs de moindre importance. Compte tenu de l'importance des autoroutes et de la possibilité d'être dérouté, il serait plus judicieux de continuer de parcourir toutes les autoroutes puis de prendre la sortie SUD-OUEST afin de parcourir les arcs de moindre importance en fin de tournée.

Ceci permet également de se questionner sur la construction de l'anti-arborescence qui conditionne également le parcours du graphe. Sa construction n'est pas unique et devrait idéalement tenir compte des spécificités opérationnelles.

CHAPITRE 4 : EXPÉRIMENTATIONS ET RÉSULTATS

L'implantation des différentes méthodes de planification des activités de monitoring présente certes de nombreux défis mais mènent à une nette amélioration tant dans le traitement des données que dans la performance des activités. Ce dernier chapitre présente les différentes expérimentations réalisées à l'aide des méthodes décrites dans ce document. Il vise dans un premier temps à démontrer le bien fondé de leur développement et de leur mise en application, et dans un deuxième temps à décrire les avantages des différentes méthodes et à soulever les limites quant à une application dans un contexte opérationnel.

4.1 Protocole d'expérimentation

4.1.1 Description des données

Les différentes expérimentations ont été réalisées à l'aide d'un réseau totalement orienté représentant une partie de la région administrative de l'Estrie. Ce réseau, présenté à l'annexe C, possède les caractéristiques suivantes :

Tableau 4.1: Caractéristique du réseau utilisé

	Nombre	Longueur (km)	Moyenne (km)	Longueur min (km)	Longueur max (km)
Noeuds	140				
Liens	374	2944.9	7.9	2.3	40.8
Liens classe 1	40	244.3	6.1	2.7	13.8
Liens classe 2	146	1126.4	7.7	2.3	37.4
Liens classe 3	188	1574.2	8.4	2.4	40.8

Les trois premières méthodes développées sont basées sur un ensemble de circuits prédéterminés. Les expérimentations ont été réalisées à l'aide de circuits confectionnés

par le Ministère des Transport du Québec complétés par 12 circuits construits par nos soins. Ces ajouts proviennent essentiellement d'une étude préliminaire montrant l'incapacité des circuits disponibles à répondre aux différentes contraintes dans le cas d'une replanification. Il est également important de noter ici que le réseau utilisé n'est pas le réseau routier complet (par exemple les bretelles d'autoroutes ne sont pas représentées). Les différents circuits, présentés en annexe C, possèdent les caractéristiques suivantes :

Tableau 4.2 : Caractéristiques des circuits prédéterminés

Nombre de circuits	44 (22 + 22 inverse)		
	Moyenne	Minimum	Maximum
Nombre de liens par circuit	39	28	51
Longueur des circuits (km)	267.8	174.5	380.5
Couverture des liens (nombre de circuits)	4.5	1	38
	Nombre	Proportion min	Proportion max
Circuits couvrant des arcs de classe 1	44	9 %	100 %
Circuits couvrant des arcs de classe 2	38	17 %	72 %
Circuits couvrant des arcs de classe 3	38	12 %	69 %

Une première série d'expérimentations montre également la difficulté d'obtenir une bonne solution dans l'horizon de planification actuellement utilisé. De ce fait, la majorité des expérimentations (sauf 4.2.2) ont été réalisées à l'aide de 42 quarts de travail pour un horizon de planification de 2 semaines (les deux quarts « blancs » ont été supprimés).

4.1.2 Optimisation – Résolution des programmes linéaires

Les différentes méthodes possèdent une composante mathématique sous forme de programmation linéaire. Il s'agit notamment de la confection d'un horaire (séquence de parcours des circuits), de l'affectation d'un arc à un circuit (méthode 3), de l'affectation généralisée des arcs aux différents germes (méthode 4) ou de l'équilibrage du réseau afin de le rendre Eulérien.

La résolution de ces modèles mathématiques a été réalisée à l'aide du solveur CPLEX 8.0. Les différents fichiers de modélisation, présentés à l'annexe D, ont été écrits en langage AMPL et utilisés avec la version commerciale du logiciel. L'accès aux données est réalisées par l'entremise de fichiers script permettant l'interaction entre le solveur et les différentes sources de données : Microsoft Access, Microsoft Excel ainsi que des fichiers de type texte.

4.1.3 Suivi des activités

Les expérimentations réalisées dans le cadre de ce mémoire ont été effectuées hors du contexte opérationnel réel. De ce fait, la mise à jour des activités effectivement réalisées est effectuée à l'aide d'une fraction des activités réalisables dans un quart de travail. L'analyse du mode opératoire en vigueur actuellement a permis de définir une vitesse commerciale de monitoring de 50 km/h durant un quart de travail de 7 heures. Ceci implique une distance parcourable de 350 km par quart de travail. La fraction des activités réalisables est donc exprimée à l'aide d'un pourcentage de cette distance. Elle est soit définie de manière fixe (par exemple 50%), soit de manière aléatoire au sein d'un intervalle ([50 % - 75%]). Le point de cet intervalle est défini de manière aléatoire à chaque mise à jour de parcours, c'est-à-dire après chaque quart de travail. Ainsi, une fraction du circuit, celle se trouvant à la fin ne sera pas couverte. Ce choix se justifie par

le fait qu'en cas d'incident, le patrouilleur reprend habituellement son circuit là où il en était avant le traitement de l'incident.

La replanification est réalisée quotidiennement, c'est-à-dire tous les 3 quarts de travail.

L'affectation des arcs non couverts aux circuits planifiés a été limitée à 6. Dans le cas d'impossibilité de résoudre, ce nombre a été progressivement augmenté afin de trouver une solution admissible (fin d'horizon).

4.1.4 Évaluation de la performance des méthodes

La performance des méthodes est évaluée à l'aide de trois des indicateurs présentés à la section 2.5.2.1.

Le premier vise à quantifier, pour chacune des périodes en coïncidence avec les classes d'arcs, la couverture réalisée en terme de longueur.

$$IALU_{q,c} = \sum_{T[q]} \frac{Trajet.Arc.Classe(c).LongueurUnitaire}{Réseau.Arc.Classe(c).Longueur}$$

Le deuxième indicateur s'assure de la faisabilité de parcours de l'ensemble du réseau pour les différentes classes.

$$IAL_{q,c} = \sum_{T[q]} \frac{Trajet.Arc.Classe(c).Longueur}{Réseau.Arc.Classe(c).Longueur}$$

Le dernier indicateur mesure la couverture du réseau pour chacune des classes au cours de l'ensemble de l'horizon. Il s'agit d'une agrégation du premier indicateur décrit ci-dessus pour une période T[q] = 2 semaines et pour toutes les classes d'arcs.

4.2 Résultats

Les différentes expérimentations réalisées à l'aide des méthodes développées ont pour objectif de montrer d'une part la capacité de répondre au mandat mais également de comparer les différentes méthodes entre elles. Cependant, ces comparaisons seront réalisées en scindant les méthodes en deux groupes. En effet, les trois premières méthodes sont des méthodes de planification et utilisent une structure de résolution semblable. La dernière méthode est une méthode de construction qui possède une mécanique particulière et sera de ce fait traitée à part.

4.2.1 Méthodes de planification

4.2.1.1 Performance de l'outil de planification

La première étude à mener dans l'implantation de cet outil est de démonter sa capacité à répondre aux exigences dans un cas idéal, c'est-à-dire pour une distance parcourue par quart égale à 100 % de la distance parcourable, 350 km dans notre cas. Le tableau 4.3 présente les résultats obtenus avec la première méthode de planification en utilisant un tel suivi des opérations.

Tableau 4.3 : Performance de la méthode de planification (100%)

	$IALU_{c,\ FS1}$	$IALU_{c,\ S1}$	$IALU_{c,\ FS2}$	$IALU_{c,\ S2}$	IAL_c	$IALU_{c,\ 2\ sem.}$
Objectif maximisation C1						
Classe1	1.00	1.00	1.00	1.00	16.64	1.00
Classe2	1.00		1.00		3.07	1.00
Classe3	1.00				1.81	1.00
Objectif maximisation pondérée*						
Classe1	1.00	1.00	1.00	1.00	16.54	1.00
Classe2	1.00		1.00		3.54	1.00
Classe3	1.00				2.03	1.00
Objectif maximisation pondérée améliorée*						
Classe1	1.00	1.00	1.00	1.00	16.66	1.00
Classe2	1.00		1.00		3.07	1.00
Classe3	1.00				1.82	1.00

* ces objectifs seront décrits dans les sections suivantes

Il est intéressant de tester, dans cette première étude, jusqu'à quelle réduction de l'horizon de planification l'outil est capable de fournir une solution répondant aux différentes exigences. Les tests montrent qu'on peut retirer au maximum 2 quarts chaque fin de semaine et 4 quarts chaque semaine et obtenir une solution. Cette solution a été obtenue sans objectif, c'est-à-dire qu'il s'agit uniquement de la recherche d'une solution. Le tableau 4.4 présente les résultats obtenus en soustrayant ces quarts à l'horizon initial.

Tableau 4.4 : Résultats pour un horizon restreint (100%)

	$IALU_{c,\ FS1}$	$IALU_{c,\ S1}$	$IALU_{c,\ FS2}$	$IALU_{c,\ S2}$	IAL_c	$IALU_{c,\ 2\ sem.}$
Objectif solution réalisable						
Classe1	1.00	1.00	1.00	1.00	7.37	1.00
Classe2	1.00		1.00		3.27	1.00
Classe3	1.00				1.83	1.00

Ces résultats préliminaires montre la capacité de la méthode, c'est-à-dire de l'outil d'optimisation et des circuits prédéterminés, de répondre aux exigences sur l'horizon de planification choisi. Il s'agit maintenant de démontrer sa performance dans un contexte « opérationnel ».

4.2.1.2 Objectif : maximiser la couverture d'une classe prioritaire

Comme mentionné précédemment, le point crucial des méthodes de planification, qu'ils s'agissent ou non de replanification, réside dans un bon choix de l'objectif. Ce choix conditionne d'une part la valeur de la solution mais également l'existence même d'une solution satisfaisant l'ensemble des contraintes.

La première vision du problème nous a amené à tenter de maximiser la couverture des arcs prioritaires, c'est-à-dire les arcs de classe 1. Dans le cas où une replanification est effectuée, l'objectif n'est plus un objectif global sur les deux semaines, mais un objectif évoluant à chacune des périodes de planification. Ainsi, il s'agit dans ce cas de maximiser la couverture des arcs de classe C1 en rapport avec la période concernée.

Ceci entraîne une mise à jour de l'objectif après chacune des périodes (Fin de Semaine1, Semaine 1, Fin de semaine 2, Semaine 2). Le choix de cette variation est guidé par le fait que les ensembles d'arcs varient au cours de l'horizon, donc l'objectif doit suivre ce mouvement.

Le tableau 4.5 présente les résultats obtenus en utilisant cet objectif et un suivi des activités compris aléatoirement dans l'intervalle [50% - 75%].

Tableau 4.5 : Résultats de la maximisation des arcs de classe 1 (50% - 75%)

	$IALU_{c,\ FS1}$	$IALU_{c,\ S1}$	$IALU_{c,\ FS2}$	$IALU_{c,\ S2}$	IAL_c	$IALU_{c,\ 2\ sem.}$
MÉTHODE 1						
Classe1	1.00	1.00	1.00	1.00	14.81	1.00
Classe2	0.91		0.91		2.55	1.00
Classe3	0.93				1.55	0.95
MÉTHODE 2						
Classe1	1.00	1.00	1.00	1.00	10.50	1.00
Classe2	0.95		0.94		3.42	0.97
Classe3	0.82				1.88	0.82
MÉTHODE 3						
Classe1	1.00	1.00	1.00	0.89	10.87	1.00
Classe2	0.97		1.00		3.74	1.00
Classe3	1.00				1.76	1.00

La méthode 2 utilise uniquement un ensemble de circuits prédéterminés statiques pour la replanification. L'utilisation d'un objectif de maximisation des arcs de classe 1 mène à une impossibilité d'obtention d'une solution satisfaisant l'ensemble des contraintes après le deuxième jour de la deuxième semaine. De ce fait, le reste de la planification est effectuée en relaxant le modèle du point de vue de la satisfaction de la contrainte de passage sur les arcs de classe 3.

Il faut noter également qu'avec un tel objectif de maximisation, le modèle aura tendance à répéter l'utilisation d'un même circuit adapté à l'objectif. Afin de pallier ce problème, nous avons ajouté une contrainte au modèle empêchant l'utilisation d'un même circuit dans la même journée.

L'obtention d'une solution admissible pour toutes les périodes (excepté pour le dernier jour) peut être obtenu avec la méthode 2 en utilisant un objectif de maximisation des arcs de classe 3. Cette approche est privilégiée par le nombre et la répartition uniforme de ces arcs (cf section 3.5.3). Le tableau 4.6 présente les résultats obtenus en utilisant un tel objectif.

Tableau 4.6 : Résultats de la maximisation des arcs de classe 3 (méthode 2) (50% - 75%)

	$IALU_{c,\ FS1}$	$IALU_{c,\ S1}$	$IALU_{c,\ FS2}$	$IALU_{c,\ S2}$	IAL_c	$IALU_{c,\ 2\ sem.}$
MÉTHODE 2						
Classe1	1.00	1.00	1.00	1.00	7.02	1.00
Classe2	0.93		0.91		3.88	0.99
Classe3	0.95				12.19	0.95

4.2.1.3 Objectif : maximisation pondérée

Ces premiers résultats démontrent une bonne adaptation des trois méthodes face à un suivi des opérations se situant entre 50 et 75%. Cependant, l'analyse des résultats montre des déplacements très nombreux sur les arcs de classe C1, certes avec une couverture adéquate, mais au détriment des autres classes d'arcs non couvertes à 100%. L'idée retenue est de développer un objectif pondéré en fonction des trois classes.

La pondération attribuée à chacune des classes est de 4, 2 et 1 pour les arcs de classe 1, 2 et 3 respectivement. Cette pondération provient du nombre de fois qu'un arc doit être couvert dans l'horizon de planification.

Cependant, afin de voir l'effet d'une telle modification, le suivi des opérations a été abaissé à 50% de la distance parcourable dans un quart de travail.

Le tableau 4.7 présente les résultats obtenus avec cet objectif.

Tableau 4.7 : Résultat de la maximisation pondérée (50%)

	$IALU_{c,\ FS1}$	$IALU_{c,\ S1}$	$IALU_{c,\ FS2}$	$IALU_{c,\ S2}$	IAL_c	$IALU_{c,\ 2\ sem.}$
MÉTHODE 1						
Classe1	1.00	1.00	1.00	1.00	11.13	1.00
Classe2	0.77		0.69		2.20	0.90
Classe3	0.85				1.42	0.85
MÉTHODE 2						
Classe1	1.00	0.94	0.92	1.00	7.71	1.00
Classe2	0.86		0.94		3.12	0.95
Classe3	0.64				1.34	0.64
MÉTHODE 3						
Classe1	1.00	0.77	0.72	0.90	6.85	1.00
Classe2	0.93		0.75		2.96	0.95
Classe3	0.85				1.58	0.85

La méthode 2 démontre une fois de plus son inefficacité à trouver une solution admissible après la deuxième fin de semaine. De ce fait une relaxation de la contrainte de couverture des arcs de classe 3 a été réalisée afin de poursuivre la planification.

La première méthode, qui consiste à ne planifier qu'une seule fois et à faire le suivi des opérations donne la meilleure solution pour les arcs de classe 1. Outre la problématique mentionnée ci-dessus pour la méthode 2, la méthode de replanification des activités avec intégration semble elle aussi inadaptée. L'analyse des horaires obtenus permet de trouver des pistes de solutions :

- l'aspect maximisation pousse l'affectation des circuits les plus longs, c'est-à-dire ceux susceptible de faire augmenter le plus l'objectif ;
- la pondération utilisée (4-2-1) privilégiera l'affectation de 5 arcs de classe 3 plutôt qu'un arc de classe 1.

Ces deux remarques sont en désaccord avec le contexte opérationnel. En effet, comme le patrouilleur a de fortes chances d'être dérouté, il faut absolument privilégier les circuits courts. De plus, la couverture d'un arc de classe 1 doit être privilégié face à la couverture des arcs de classe 3, et ce peu importe le nombre d'arcs restants à parcourir.

4.2.1.4 Objectif : maximisation pondérée améliorée

Face à ces considérations opérationnelles, il nous faut développer un objectif qui tente de prendre en compte toutes les spécificités. La première idée est d'inclure la longueur du circuit dans l'objectif, afin de privilégier les circuits de petite taille. Si cela semble être en opposition avec l'objectif, la solution est de diviser chaque terme par la longueur des circuits. Ainsi, en cas de satisfaction des contraintes par plusieurs circuits, le plus court sera privilégié car l'inverse de sa longueur augmentera l'objectif. Cet objectif s'écrit :

$\max \sum_{k \in K} \sum_{j \in Q} \sum_{i \in A} \partial_{ik} y_{kj} / l_k$ où l_k représente la longueur du circuit k.

Le deuxième dilemme est d'obtenir une pondération indépendante de la population des différents ensembles afin de toujours privilégier la classe d'arcs la plus importante. Une solution pourrait être d'ajouter une pondération énorme à la classe 1, un peu moins énorme à la classe 2 et 1 à la classe3. Cependant, nous cherchons ici à développer des modèles mathématiques indépendants des données. La solution retenue est d'utiliser une approximation à l'aide du cardinal des différents ensembles et se définit comme suit :

$\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \textit{les pondérations associées aux classe}$ 1, 2, 3

$\alpha_1 \; card(C1) = 2 \; \alpha_2 \; card(C2) = 4\alpha_3 \; card(C3)$

On pose ainsi $\alpha_1 = 1$ et on en déduit les autres poids :

$$\alpha_2 = \frac{card(C1)}{2card(C2)} \quad \alpha_3 = \frac{card(C1)}{4car(C3)} \quad si \quad card(C1) \neq 0$$

Il faut noter que les ensembles C1,C2, C3 sont les ensembles en adéquation avec la période de planification concernée. Si l'ensemble C1 est vide, dans le cas où tous les arcs de classe 1 ont été couverts, on pose $\alpha_2 = 1$ et on exprime $\alpha_3 = \frac{card(C_2)}{2card(C3)}$

L'objectif mathématique complet s'exprime ainsi :

$\max \sum_{k \in K} \sum_{j \in Q} \sum_{i \in A} \alpha_i \partial_{ik} y_{kj} / l_k$ où l_k représente la longueur du circuit k, α_i la pondération.

En utilisant un suivi des activités de 50 %, on obtient les résultats suivants :

Tableau 4.8 : Résultats de la maximisation de la somme pondérée améliorée (50%)

	$IALU_{c,\,FS1}$	$IALU_{c,\,S1}$	$IALU_{c,\,FS2}$	$IALU_{c,\,S2}$	IAL_c	$IALU_{c,\,2\,sem.}$
MÉTHODE 1						
Classe1	1.00	1.00	1.00	1.00	12.7	1.00
Classe2	0.77		0.76		2.10	0.95
Classe3	0.78				1.22	0.78
MÉTHODE 3						
Classe1	1.00	0.99	1.00	1.00	8.73	1.00
Classe2	0.93		0.88		2.94	0.95
Classe3	0.83				1.33	0.85

La méthode 2 ne donne pas de bons résultats avec la définition actuelle des circuits pour un suivi des activités si bas et ne peut donc être comparée aux deux autres méthodes. Avec ce pourcentage, la méthode de replanification avec intégration fournit la meilleure solution par satisfaction des axes prioritaires et par une meilleure répartition de la couverture globale.

Dans un cadre opérationnel où le pourcentage de couverture du parcours serait plus élevé, la méthode 3 avec un objectif pondéré amélioré donne également le meilleur résultat parmi toutes les méthodes et tous les objectifs confondus. Le tableau 4.9 présente les résultats obtenus en utilisant un tel objectif et un suivi des opérations aléatoirement compris entre 50 et 75%.

Tableau 4.9 : Résultats de la maximisation pondérée améliorée (50% - 75%)

	$IALU_{c,\ FS1}$	$IALU_{c,\ S1}$	$IALU_{c,\ FS2}$	$IALU_{c,\ S2}$	IAL_c	$IALU_{c,\ 2\ sem.}$
MÉTHODE 1						
Classe1	1.00	1.00	1.00	1.00	15.51	1.00
Classe2	0.94		0.93		2.67	1.00
Classe3	0.95				1.60	0.95
MÉTHODE 2						
Classe1	1.00	1.00	1.00	1.00	10.26	1.00
Classe2	0.92		0.98		3.55	0.99
Classe3	0.69				1.50	0.69
MÉTHODE 3						
Classe1	1.00	1.00	1.00	0.93	9.72	1.00
Classe2	0.99		1.00		3.35	1.00
Classe3	1.00				1.95	1.00

4.2.2 Horizon de planification réel

Comme mentionné au début de cette étude, l'horizon de planification utilisé pour ces tests est l'horizon complet de deux semaines. Ce choix a été conditionné par l'incapacité de la méthode 2 de répondre aux exigences et par une volonté de comparaison des trois méthodes.

Cependant, la méthode de replanification avec insertion des arcs omis reste valide si l'horizon de planification est réduit, c'est-à-dire en condamnant les premiers quarts de chaque semaine (quart « blancs »). Le tableau 4.10 présente les résultats obtenus en utilisant cet horizon de planification réduit, un objectif de somme pondéré amélioré et un suivi des opérations aléatoirement compris entre 50 et 75 %.

Tableau 4.10 : Résultats pour un horizon de planification réduit (50% - 75%)

	$IALU_{c,\ FS1}$	$IALU_{c,\ S1}$	$IALU_{c,\ FS2}$	$IALU_{c,\ S2}$	IAL_c	$IALU_{c,\ 2\ sem.}$
MÉTHODE 1						
Classe1	1.00	1.00	1.00	1.00	12.15	1.00
Classe2	0.90		0.89		2.56	0.98
Classe3	0.95				1.67	0.95
MÉTHODE 3						
Classe1	1.00	1.00	1.00	1.00	9.65	1.00
Classe2	1.00		0.99		3.36	1.00
Classe3	0.97				1.77	0.97

L'horaire de travail obtenu avec la méthode de replanification est présenté au tableau 4.11. Il présente la séquence de parcours des circuits. Les numéros de circuits suivis d'une lettre I sont des circuits parcourus dans le sens inverse. Les numéros de circuits suivis de lettres minuscules sont des circuits créés par réaffectation de liens omis. La lettre représente le jour de la réaffectation (a = 1er jour).

Tableau 4.11 : Horaire de travail obtenu par la méthode 3

	FS1		**S1**					**FS2**		**S2**				
1	1I	11I		14I	16I	18Ice	20I	7	4Idh		9Ifj	14jk	6II	17hlm
2	1	202I	201I	15Ic	11d	205e	17f	204	17h	8hi	1	201I	12Ik	17km
3	5 I	202	203I	6	206I	17I	10I	206	17	201	12f	203	17II	10

Ce tableau montre une utilisation accrue des nouveaux circuits au fur et à mesure de l'avancement de la planification. Il est également rare de rencontrer un circuit ayant subi plus de deux greffes (ex. : 17 hlm).

4.2.3 Critique des méthodes de planification

4.2.3.1 Une base fragile

Le point commun des trois méthodes de planification est d'être basées sur un ensemble de circuits prédéterminés. Les résultats d'utilisation de la méthode 2 nous démontrent leur incapacité à répondre au problème dans le cas d'une replanification quotidienne.

Cette incapacité provient tout d'abord de leur faible nombre. En effet, cette petite diversité ne permet pas d'utiliser de nombreuses alternatives à la couverture des arcs et oblige ainsi à repasser continuellement par les mêmes chemins.

Ceci mène à une deuxième problématique, celle de la longueur du circuit et donc de la prise en compte de la capacité du véhicule. En effet, les circuits de longueur élevée n'ont quasiment aucune chance d'être complétés et laisseront de nombreux arcs non couverts qui devront être réaffectés.

4.2.3.2 Une structure de circuit envisageable

Les spécificités opérationnelles font en sorte que la fin des circuits possède une probabilité de non couverture assez importante. Cependant, la fin d'un circuit ne correspond que très rarement, pour des questions de design, au début d'un autre circuit. Pourtant cette façon de procéder a été utilisée pour la construction des circuits additionnels couvrant des arcs de classe 2. De plus, ces nouveaux circuits semblent valides puisqu'ils sont généralement utilisés dans les horaires confectionnés. Cette structure entrelacée devrait permettre d'obtenir de meilleures solutions avec l'ensemble des trois méthodes. La figure 4.1 illustre ce principe.

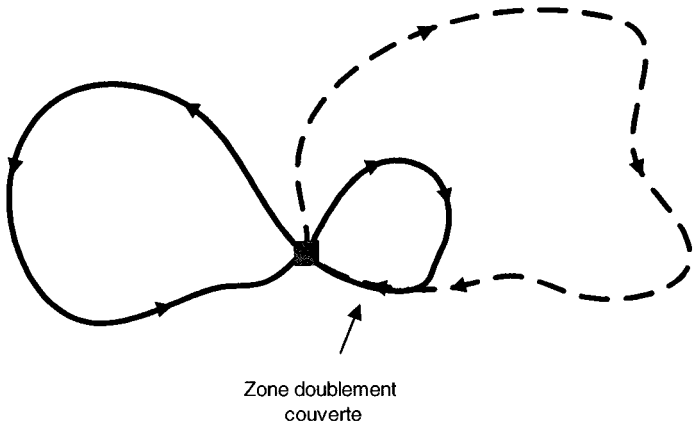


Figure 4.1 : Structure de circuit idéale

La figure 4.2 présente l'ensemble des liens omis par la méthode 3 lors d'un suivi des activités de 50 % avec un objectif de maximisation pondérée améliorée. Il est intéressant de noter que tous les arcs omis ne sont pas les plus éloignés du dépôt mais qu'une bonne partie d'entre eux se trouve dans une région proche du dépôt (le dépôt est symbolisé par un rectangle). De plus, peu d'arcs ne sont couverts dans aucun des deux sens.

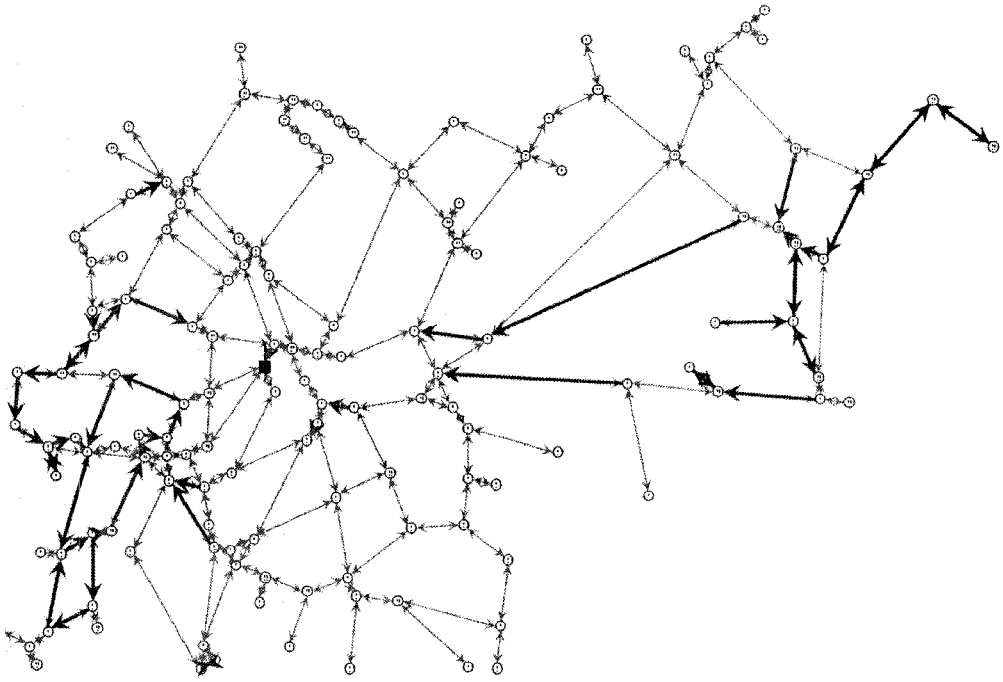


Figure 4.2 : Distribution des liens omis par la méthode 3 (50%)

4.2.3.3 Une réaffectation théorique

La troisième méthode développée vise à greffer les arcs non couverts à d'autres circuits afin de s'assurer d'un passage dans le reste de l'horizon. La méthode utilisée est une greffe au plus proche en minimisant la distance supplémentaire occasionnée par cet ajout. Comme le montre les différents résultats obtenus, cette manière de procéder offre de bons résultats.

Cependant, il ne faut pas oublier la composante humaine du système. C'est cette composante qui assurera ou non l'implantation d'une telle méthode. Ainsi, les circuits théoriques aussi efficaces soient-ils doivent être validés et effectués par les patrouilleurs. La figure 4.3 présente un circuit obtenu en y intégrant des arcs non couverts.

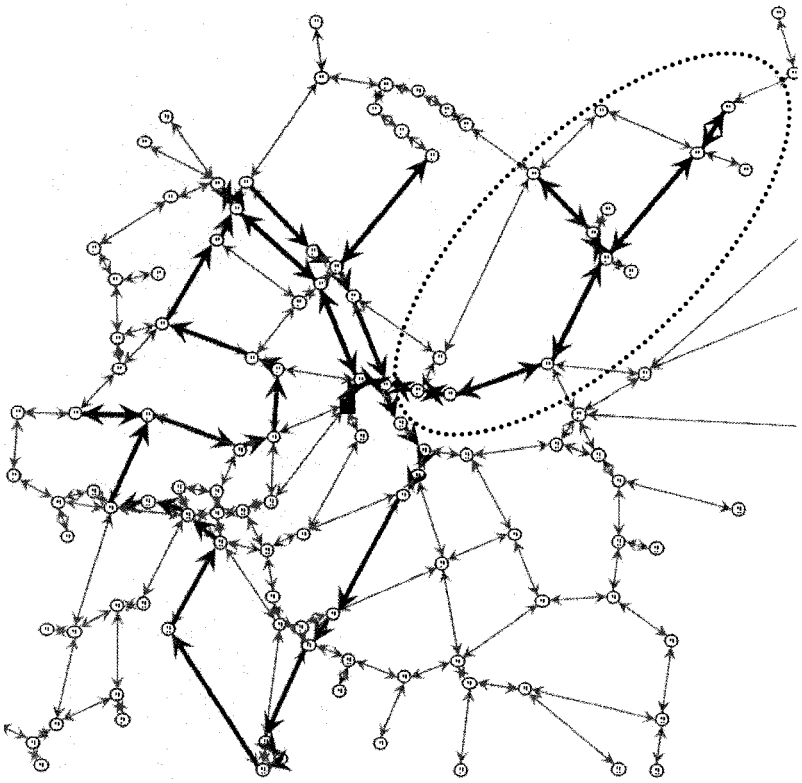


Figure 4.3 : Exemple de circuit augmenté

Le greffon est obtenu à partir de calcul des plus court chemin et possède ainsi une forme d'arbre contrairement à la tournée initiale en forme de goutte d'eau.
Cette notion de « belle tournée » sera débattue dans la section 4.2.5.3 et reste un frein important à l'acceptation par les patrouilleurs.

4.2.4 Avantages des méthodes de planification

4.2.4.1 Une prise en compte des activités opérées

Mise à part la première méthode qui se veut plus une automatisation du mode opératoire actuellement utilisé et donc une base de comparaison, la méthodologie de résolution adoptée dans ce mémoire permet de prendre en compte l'opéré dans la planification des

activités. Le formalisme de données développé combiné à l'optimisation mathématique permet de planifier des tournées qui tiennent compte de ce qui a été opéré et de fournir des parcours adaptés aux nombreuses contraintes opérationnelles.

4.2.4.2 Différents efforts pour différents degrés de dynamisme

Le développement de ces méthodes demande certes une analyse approfondie du processus et l'adoption d'une structure de données particulière mais les efforts nécessaires à l'obtention d'un outil fonctionnel restent raisonnables.

Ainsi, la méthode de planification simple (méthode 1) ne demande qu'une résolution d'un programme mathématique toutes les deux semaines sans aucune mise à jour autre que celle liée au changement de la structure du réseau. Elle permet, dans le cas d'un pourcentage de couverture des circuits assez élevé (supérieur à 50%), d'obtenir de bons résultats.

Les méthodes de replanification (méthode 2 et méthode 3) demandent un peu plus d'efforts mais sont également mieux adaptées aux caractéristiques opérationnelles et répondent ainsi de manière plus efficace à la problématique. Il est cependant nécessaire d'effectuer dans ce cas une mise à jour continuelle des activités réellement opérées. Bien entendu, la dernière méthode nécessite un effort supplémentaire pour la réaffectation des arcs non couverts aux différents circuits restants à parcourir, mais l'utilisation d'outils mathématiques de plus en plus performants permet de réaliser cette tâche assez aisément.

4.2.4.3 Une robustesse « informationnelle »

L'utilisation de programmes mathématiques dans la résolution de problèmes amène généralement une discussion sur la robustesse des modèles mathématiques développés,

c'est-à-dire sur leur capacité à fournir rapidement une solution optimale. L'optique de résolution adoptée dans ce mémoire nous invite plutôt à considérer une robustesse face à l'information fournie et non un robustesse mathématique proprement dite.

Ainsi, la méthode de replanification avec intégration des arcs non couverts (méthode 3) est très peu sensible à des erreurs commises lors du suivi des activités opérées (erreurs de coïncidence entre la position relevé et l'arc réellement parcouru). De ce fait, si un arc effectivement couvert est oublié, il sera intégré à un autre circuit sans trop perturber le reste des opérations. La méthode 2, utilisée dans sa définition actuelle, c'est-à-dire à l'aide d'un nombre limité de circuits, est moins robuste en ce sens qu'elle aura tendance à répéter un même circuit même dans le cas où un seul arc est oublié.

4.2.5 Méthode de construction

4.2.5.1 État d'avancement du projet

L'implantation entièrement automatisée de cette méthode demeure très complexe et dépasse le cadre de ce mémoire. De ce fait, aucun résultat d'expérimentation effectuée sur une période de deux semaines ne sera présenté dans cette section. Cependant, nous nous attacherons à décrire certains aspects de la mécanique de résolution et d'implantation tout en essayant de critiquer cette approche, aussi prometteuse qu'elle semble être à première vue.

4.2.5.2 Une approche itérative complexe

La complexité de l'approche développée réside d'une part dans la difficulté engendrée par les différents méthodes mathématiques mais également par la prise de décision nécessaire à l'obtention d'une bonne solution.

En effet, la validité et la valeur de la solution obtenue dépendent grandement du choix des différents germes utilisés pour le regroupement des arcs obligatoires. Ces germes ne peuvent donc être statiques et doivent eux aussi être adaptés au contexte opérationnel. Ainsi, comme dans les approches utilisées en tournées de véhicule sur les nœuds, la résolution doit être effectuée avec différents choix de germes.

Mais même la définition de la capacité du véhicule pose problème lors de l'affectation. En effet, on ne peut affecter les arcs à pleine capacité en ayant à l'esprit que la transformation du graphe qui suivra va indéniablement augmenter sa longueur afin d'obtenir les caractéristiques adéquate à la création d'un circuit Eulérien. Il faut donc se laisser une marge de manœuvre qui n'est a priori pas facilement quantifiable.

Si la transformation du graphe en graphe connexe et Eulérien est automatisable en utilisant des algorithmes plus simples mais plus faciles à mettre en œuvre, les multiples résolutions et surtout l'intégration d'arcs en vue de respecter la capacité demeure plus problématique. Là encore, il est nécessaire de définir de manière précise le critère à utiliser pour augmenter la grappe initiale et obtenir une tournée de plus grande longueur.

4.2.5.3 Incompatibilités opérationnelles

Les méthodes de construction développées sont, comme la plupart des méthodes décrites dans la littérature, basées sur les plus courts chemins. L'utilisation d'un tel critère dans la transformation du graphe a tendance à fournir des graphes résultants qui ont une forme « d'arête de poisson ». Certes cette structure tend à minimiser la distance parcourue mais engendre des circuits possédant de nombreux allers-retours et semble inapte à une utilisation dans un contexte réel. La figure 4.4 présente le graphe induit par une itération de la méthode proposée (les arcs obligatoires sont en représentés en foncé).

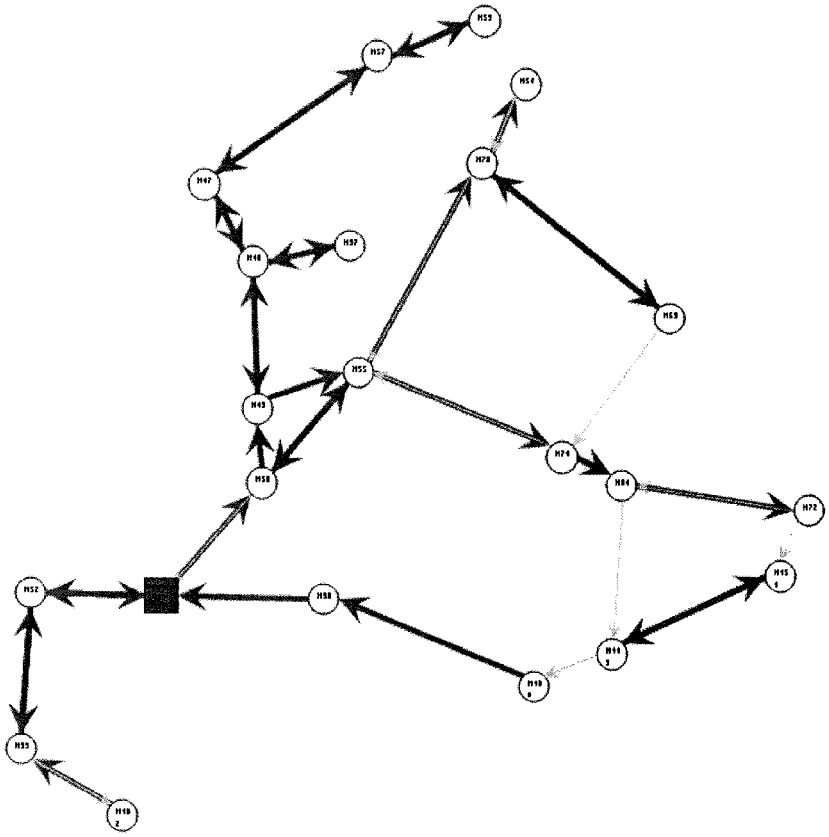


Figure 4.4 : Graphe résultant de la méthode de construction

Ceci introduit la notion de « belle tournée » souvent abordée dans les travaux de recherches. Les circuits opérationnels construits manuellement, basés sur l'expérience des patrouilleurs, ont presque toujours cette structure de « goutte d'eau » évitant les demi-tours intempestifs. Les algorithmes développés jusqu'ici ne permettent pas d'obtenir, de manière automatisée, cette caractéristique opérationnelle fondamentale.

CONCLUSION

Ce mémoire a présenté une méthodologie d'analyse et de résolution d'une problématique de planification des activités de surveillance du réseau routier. L'étude bibliographique des différentes composantes du problème, à savoir le système de positionnement, le système d'information géographique et les divers outils d'optimisation mathématique, a permis d'une part de comprendre dans le détail le fonctionnement de chacune d'entre elles et d'entrevoir d'autre part la possibilité d'une interaction pour une meilleure planification des activités.

Ces trois composantes ont connu au cours des dernières années des développements fort intéressants permettant d'entrevoir une utilisation opérationnelle combinée dans le domaine du transport. Les systèmes de communication et les systèmes de positionnement par satellites sont devenus, grâce aux percées technologique et à la volonté d'ouverture du gouvernement américain, plus stables et plus précis. Les développements informatiques, que ce soit dans le domaine du matériel ou des logiciels, permettent une utilisation plus répandue des systèmes informationnels en général et des systèmes d'information géographiques en particulier. Finalement, les nouveaux logiciels d'optimisation mathématique offrent dorénavant des langages de programmation évolués permettant une intégration plus efficace avec les systèmes informationnels.

D'un coté, on entrevoit une certaine volonté de la part de quelques chercheurs de vouloir traiter, utiliser et intégrer la grande quantité d'information fournie par les systèmes d'information géographiques en rejetant les approches classiques d'agrégation des données. D'un autre côté, de nombreux chercheurs s'intéressent à la modélisation mathématique des problèmes en transports, plus particulièrement de tournées de véhicule sur les arcs, en insistant bien plus sur l'aspect mathématique que sur l'aspect informationnel. Malheureusement, le développement de ces outils informationnels et

mathématiques ne sont généralement pas effectués face à des considérations opérationnelles et ne peuvent ainsi bien répondre aux besoins des usagers.

Une des contributions de ce mémoire a donc été de confronter ces deux mondes en développant une méthodologie d'analyse et de résolution permettant l'intégration des systèmes informationnels et des outils mathématiques dans l'optique de développement d'un outil opérationnel, qui tient compte des activités effectivement opérées dans la planification.

L'approche par Diagramme de Flux de Données permet dans un premier temps d'obtenir une vision globale du processus étudié afin de caractériser et de quantifier les flux informationnels entre les différents acteurs interagissant dans le processus. Mais, une fois les limites du processus cernées, il devient nécessaire de modéliser, d'établir des balises afin de formaliser cette grande quantité d'information provenant de différentes sources pour permettre un traitement et une utilisation efficace.
L'approche orientée-objet en transport se veut cet outil d'analyse et de résolution, basée sur la sémantique de la programmation orientée-objet, permettant d'effectuer adéquatement cette intégration. Elle permet ainsi d'une part de mettre en évidence et de clarifier la difficulté d'intégration des données opérationnelles de positionnement et les objets du SIG afin d'effectuer le suivi des activités réellement opérées. Il s'agit dans ce cas de pouvoir mettre en coïncidence l'objet Localisation traduisant la position du véhicule et un Arc du SIG, et le Trajet avec une Section de route. L'approche orientée-objet permet d'autre part de caractériser les besoins d'intégration entre les aspects planification et opérationnel. Un lien doit ainsi être établi entre les objets Tournées et Trajet, mais également entre l'Itinéraire et la Section de route.
L'établissement de ces balises et de ce formalisme permet d'entrevoir différentes méthodes mathématiques de résolution afin de tenir compte de la composante opérationnelle.

Les quatre méthodes de planification développées dans ce mémoire vise à l'obtention d'une séquence de circuits à parcourir afin de satisfaire les différentes exigences en matière de couverture du réseau. Les trois premières méthodes sont basées sur l'existence de circuits prédéterminés et la résolution d'un programme linéaire d'affectation. La première se veut une automatisation du mode opératoire actuellement utilisé, c'est-à-dire une planification simple sur l'ensemble de l'horizon sans tenir compte de l'opéré, et sert de base de comparaison pour les autres méthodes. La deuxième utilise l'information opérationnelle dans une replanification des activités en tenant compte de ce qui a été réellement opéré, c'est-à-dire de la couverture de chacun des arcs du réseau mais en n'utilisant qu'un ensemble de circuits prédéterminés. Face à l'incapacité de cet ensemble fini de circuits à répondre aux différentes exigences, une troisième méthode a été développée afin d'intégrer les arcs non couverts aux circuits existants et de permettre ainsi une replanification mieux adaptée par l'utilisation d'un plus grand nombre de circuits. Ce crescendo du degré de dynamisme mène à l'ébauche d'une quatrième méthode basée sur la reconstruction continuelle des circuits en fonction des activités opérées.

Très prometteuses d'un point de vue théorique, ces méthodes de planification offrent de nombreuses difficultés techniques lors de leur mise en application. En premier lieu, différents ajustements ont été nécessaires afin d'obtenir un graphe mathématique cohérent, base de résolution de ces méthodes. La deuxième difficulté résidait dans la détermination d'un objectif en adéquation avec les contraintes opérationnelles. Finalement, les difficultés ont surtout été de nature informationnelle et le formalisme adopté a permis de maintenir et de mettre continuellement à jour l'information nécessaire au suivi des opérations et aux nombreuses replanifications.

Les expérimentations menées permettent dans un premier temps de démontrer la validité des méthodes, c'est-à-dire leur capacité à répondre aux différentes exigences. Ces tests montrent, à l'aide de différents indicateurs de performance, le potentiel des méthodes de

replanification. Ceci est d'autant plus vrai lorsque le ratio entre les activités opérées et les activités réalisables est faible, c'est-à-dire lorsque le patrouilleur n'a pas la capacité de compléter l'ensemble de sa tournée. Ainsi, la méthode de replanification combinée à une réaffectation des arcs non couverts permet d'obtenir les meilleurs résultats, en étant mieux adaptée au contexte opérationnel, surtout lorsque les activités opérées demeurent très en deçà des activités planifiées.

Le choix de l'objectif est crucial mais également contradictoire. Ainsi, il doit d'une part maximiser le parcours des axes prioritaires (réseau hiérarchisé) et d'autre part tenter de privilégier des circuits de faible longueur, sachant que les contraintes opérationnelles ne permettront pas une couverture complète. De ce fait, l'objectif final développé tente de concilier ces deux facteurs, par une maximisation pondérée des différentes classes d'arcs. La pondération choisie tient ainsi compte de la hiérarchie du réseau et de la longueur des circuits.

Ainsi, les principales contributions de ce mémoire sont :

- le développement d'un formalisme de données permettant l'intégration des données de positionnement GPS et des objets du SIG dans la planification des activités de monitoring ;
- la prise en compte des données opérationnelles dans la planification des activités ;
- le développement de méthodes mathématiques de planification ;
- la mise en œuvre d'un outil informationnel d'aide à la décision pour la planification.

La quatrième méthode développée doit offrir un fort degré de dynamisme en permettant une reconstruction continuelle des circuits en fonction des tâches opérées. Mais, si on dispose des différents outils théoriques pour sa mise en œuvre, elle n'en reste pas moins très délicate à implanter. Les expérimentations menées ne fournissent ainsi pas de « belles » tournées, celle ayant une forme de goutte d'eau, et ne seront ainsi pas acceptées par les usagers. Cependant, ce constat nous amène à soulever de nouvelles

perspectives de recherches pour une construction opérationnelle des circuits, des tournées sur les arcs.

Définition de la mesure. La mesure employée pour caractériser un réseau est généralement une mesure de la distance des plus courts chemins, soit entre deux nœuds, soit entre un nœud et un arc. Malheureusement, dans le cas d'un réseau routier, cette mesure ne semble pas être adaptée et mène à la génération de nombreux allers-retours dans la construction des tournées. Il devient alors nécessaire de développer d'autres mesures plus adaptées au contexte opérationnel.

Transformation du graphe. Les méthodes classiques de tournées sur les arcs sont toutes basées sur l'obtention d'un graphe connexe et Eulérien. Il existe différentes manières d'obtenir ces caractéristiques fondamentales qui dépendent directement de la mesure employée. De ce fait, il est nécessaire de trouver d'autres indicateurs et même d'autres méthodes d'équilibrage permettant l'obtention d'un tel graphe.

Construction du circuit. Finalement, même la façon de parcourir le graphe, et ainsi de créer un circuit, doit être adaptée au contexte opérationnel. Les méthodes existantes dérivent le circuit de la construction d'une anti-arborescence. Mais comme cette construction n'est pas unique, il faut s'attacher à ce qu'elle soit elle-même adapté aux différentes contraintes opérationnelles. Le parcours d'un graphe est finalement soumis à de nombreuses prises de décision qui doivent être explicitées afin d'obtenir une solution qui sera validée et acceptée par les usagers.

Somme toute, ce mémoire démontre la valeur ajoutée apportée par l'intégration des données opérationnelles dans la planification, mais sous condition d'adopter une structure permettant une gestion efficace de cette importante quantité d'information provenant de sources multiples. Finalement, un accent particulier est mis sur l'intégration des données et des méthodes mathématiques en montrant l'importance des données dans l'optimisation à l'aide de méthodes simples, et l'incapacité d'algorithmes complexes à répondre, pour le moment, aux nombreuses exigences opérationnelles.

RÉFÉRENCES

AHUJA R.K., MAGNANTI T.L., ORLIN J.B. (1993). *Network Flows : Theory, Algorithms, and Applications*. Prentice Hall, 846 p.

BALL M.O., MAGAZINE M.J. (1988). *Sequencing of insertions in printed circuit board assembly.* Operations Research; 36 (2) : 192-201

BENAVENT E., CAMPOS V., CORBERÀN A., MOTA E. (1990). *The Capacited Arc Routing Problem : A Heuristic Algotithm.* Qüestiiò; 14 (1-3) :107-122.

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.

CHAPLEAU R. (1992). *La modélisation de la demande de transport urbain avec une approche totalement désagrégée*. World Conference on Transportation Research (Lyon).

CHAPLEAU R., Allard B., TRÉPANIER M., TOUTANT M., GAUTHIER B. (1996). *Gestion des parcours de déneigement à Laval : outil informationnel à saveur désagrégée*. 31e congrès de l'Association québécoise du transport et des routes, Québec.

CONNOLLY T., BEGG, C. (2000). *Database Solutions*. Pearson Education, London, 426 p.

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.

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

DEREKENARIS G., GAROFALAKIS J., MARKIS C., PRENTZAS J., SIOUTAS S., TSAKALIDIS *A.* (2000). *Integrating GIS, GPS and GSM technologies for the effective management of ambulances*. Computers, Environment and Urban Systems; 25 : 267-278

DIJKSTRA E. (1959) *A note on two problems in connexion with graphs*. Numeriche Mathematics; 1 : 269-271

DUEKER, K.J., BUTLER, J.A. (1959) *A geographic information system framework for transportation data sharing*. Transportation Research Part C 2000 ; 8 : 13-26.

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; p.278-326.

DROR M., LEUNG J.M.Y. (1998). *Combinatorial optimization in a cattle yard : Feed distribution, vehicle scheduling, lot sizing, and dynamic pen assignment*. Dans: Gang Yu (Ed). Industrial Application of Combinatorial Optimization, Chapter 7. Kluwer Academic Publishers; p.142-171.

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

EGLESE R.W. (1994) Routing Winter Gritting Vehicles. *Discrete Applied Mathematics*; 48 (3) : 231-244.

EISELT H.A., GENDREAU M., LAPORTE G. (1995) *Arc Routing Problems, Part I : The Chinese Postman Problem*. Operations Research; 43 (2) : 231-242.

EISELT H.A., GENDREAU M., LAPORTE G. (1995). *Arc Routing Problems, Part II : The Rural Postman Problem*. Operations Research; 43 (3) : 399-414.

ERKUT E., FENSKE R., KABANUK S., GARDINER Q., DAVIS J. (2001). *Improving the Emergency Delivery in St. Albert*. INFOR; 30 : 416-433.

FISHER M.L., JAIKUMAR R. (1991) *A Generalized Assignment Heuristic for Vehicle Routing. Networks.*; 11 : 109-124.

FORD L.R., FULKERSON D.R. (1962). *Flows in Network.* Princeton University Press.

FOURER R., GAY D.M., KERNIGHAN B.W. (2003). AMPL : *A Modeling Language For Mathematical Programming (2nd Edition).* Thomson Brooks/Cole; 517 p.

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

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.

GUAN M. (1962). *Graphic Programming Using Odd and Even Points.* Chinese Math; 1 : 273-277

HALL R.W. (2002). *Change of Direction.* OR/MS Today; 38-47.

HERTZ A., LAPORTE G., MITTAZ M. (2000) *A Tabu Search Heuristic for the Capacited Arc Routing Problem.* Operations Research; 48 (1) : 129-135.

JOHNSON D.B. (1977) *Efficient shortest path algorithms.* J. ACM; 24 : 1-13.

KAMINISKI P.G. (1995). *Global Positioning System Standard Positioning Service Signal Specification.* Departement of Defence, USA.

LAPORTE G. (1997). *Modeling and solving several classes of arc routing problems as travelling salesman problems.* Computer and Operations research; 24 : 1057-1061.

LARSON R. C., ODONI A.R. *Urban Operations Research.* Prentice-Hall; 573 p.

LOGSDON T. (1981). *Understanding NAVSTAR : GPS, GIS, IVHS.* Kluwer Academic Publishers 1995 ; 350 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.

NEWMAN J.R. (1953) (Ed). *Leonhard Euler and the Koenisberg Bridges.* Sci. Am.; 189 : 66-70.

NORONHA V. (1999). *Towards ITS Map Database Interoperability – Database Error and Rectification.* International Workshop on GIS-T and ITS, Chinese University of Hong Kong.

OCHIENG W.Y., SAUER K. (2002). *Urban road transport navigation : performance of the global positioning system after selective availability.* Transportation Research Part C; 10 : 171-187.

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

RIVARD S., TABLOT J. (2001). *Le développement des systèmes d'information : Une méthode intégrée à la transformation des processus (3e édition).* Presses de l'Université du Québec;718 p.

RUMBAUGH, J. (1990). *Object-Oriented Modeling and Design.* Prentice Hall; 500 p.

THIMBLEBY H. (2000). *The Directed Chinese Postman Problem.* Middlesex University School of Computing Science Technical Report; 17 p.

TRÉPANIER M. (1999). *Modélisation totalement désagrégée et orientée-objet appliquée aux transports urbains.* Thèse de doctorat. École Polytechnique de Montréal: 229 p.

TRÉPANIER M., CHAPLEAU R. (2001). *Linking Transit Operational Data to Road Network with a Transportation Object-Oriented GIS.* URISA Journal; 13 (2) : 23-30.

TRÉPANIER, M., CHAPLEAU, R. (2002). *Transit Itinerary Calculation on the Web based on a Transit User Information System.* Journal of Public Transportation, Miami. ; 5 (3).

ULUSOY G. (1985). *The Fleet size and Mix Problem for the Capacited Arc Routing.* European Journal of Operational Research; 22 (3) 329-337.

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

WHITE, C.E., BERNSTEIN, D., KORNHAUSER, A.L. (2000) *Some map matching algorithms for personal navigation assistants.* Transportation Research Part C; 8 : 91-108.

TABLE DES MATIÈRES DES ANNEXES

TABLE DES MATIÈRES DES ANNEXES *148*

LISTE DES TABLEAUX DES ANNEXES *150*

LISTE DES FIGURES DES ANNEXES *151*

ANNEXE A : ANALYSE INFORMATIONNELLE DES ACITIVITÉS DE MONITORING DE LA RÉGION DE L'ESTRIE *154*

A.1 Mise en situation **154**

A.2 Modus Operandi **154**

A.3 Outil d'analyse **155**

A.4 Planification des opérations **156**

A.4.1 Construction des circuits 157

A.4.2 Thématiques 160

A.4.3 Tâches connexes 160

A.5 Monitoring du réseau **162**

A.6 Traitement des incidents **165**

A.7 Analyse des activités **167**

A.8 Conclusion **169**

ANNEXE B : MODÉLISATION ET VISUALISATION D'ALGORITHMES DE TOURNÉES SUR LES ARCS À L'AIDE D'UNE APPLICATON EXCEL *170*

B.1 Extraction et création du graphe mathématique **170**

B.2 Modèle objet du graphe **175**

B.3 Propriétés et méthodes de propriétés des objets **175**

B.4 Méthodes associées aux objets **177**

B.4.1 Méthodes de l'objet Lien 177

B.4.2 Méthodes de l'objet Noeud 178

B.4.3 Méthodes de l'objet réseau 179

B.5 Interaction du système informationnel et d'un optimiseur mathématique **187**

B.6 Interface de visualisation **191**

B.7 Stockage des données **194**

ANNEXE C : CARACTÉRISTIQUES DU RÉSEAU ET DES CIRCUITS PRÉDÉTERMINÉS ***197***

C.1 Un réseau hiérarchisé complètement orienté **197**

C.2 Circuits prédéterminés **212**

ANNEXE D : UTILISATION D'UN LANGAGE DE MODÉLISATION MATHÉMATIQUE ORIENTÉ-OBJET ***226***

D.1 Une évolution bénéfique **226**

D.2 Un langage orienté-objet **227**

D.2.1 Une écriture « naturelle » 228

D.2.2 Un accès et une construction des données adéquats 229

D.3 Fichiers de modélisation **231**

D.3.1 Confection de l'horaire 231

D.3.2 Affectation des arcs omis 236

D.3.3 Affectation généralisée 238

D.3.4 Équilibrage du réseau 239

LISTE DES TABLEAUX DES ANNEXES

Tableau A.1: Classification des routes et fréquence de passage.....158
Tableau B.1 : Propriétés des objets élémentaires (d'après TRÉPANIER, 1999).....176
Tableau C.1 : Caractéristiques des noeuds 198
Tableau C.2 : Caractéristiques des liens (arcs).....202
Tableau C.3 : Caractéristiques des circuits.....224
Tableau C.4 : Détails des caractéristiques du circuit 11 225

LISTE DES FIGURES DES ANNEXES

Figure A.1 : Contexte du DFD des activités de monitoring 156
Figure A.2 : Éclatement du processus de planification 161
Figure A.3 : Segmentation du réseau RTTS 163
Figure A.4 : Éclatement du processus de monitoring 164
Figure A.5 : Éclatement du processus de traitement des incidents 166
Figure A.6 : Éclatement du processus d'analyse des activités 168
Figure B.1 : Déclaration des constantes 170
Figure B.2 : Méthode de traitement de la couche SIG 171
Figure B.3 : Méthode de traitement de la forme 172
Figure B.4 : Fonction d'ajout d'un noeud 173
Figure B.5 : Fonction d'ajout d'un lien (arc) 174
Figure B.6 : Modèle objet et classes d'objets associés au réseau 175
Figure B.7 : Code VBA de la méthode AutresLiens 178
Figure B.8 : Code VBA de la méthode LiensLibresEntrant 179
Figure B.9 : Code VBA de la méthode Réseau.Eulerien 180
Figure B.10 : Méthode de construction de l'anti-arborescence 182
Figure B.11 : Méthode d'augmentation du réseau en réseau connexe 185
Figure B.12 : Méthode d'affichage d'une classe d'arc 186
Figure B.13 : Exemple d'interaction entre Excel et AMPL 191
Figure B.14 : Interface de visualisation de l'outil 192
Figure B.15 : Construction dynamique d'un circuit 193
Figure B.16 : Visualisation d'un circuit 194
Figure B.17 : Feuille de données des liens 195
Figure B.18 : Modèle Relationnel de Données Access 196
Figure C.1 : Graphe mathématique 198
Figure C.2 : Répartition des arcs de classe 1 211

Figure C.3 : Répartition des arcs de classe 2 211
Figure C.4 : Répartition des arcs de classe 3 212
Figure C.5 : Circuit 1 213
Figure C.6 : Circuit 2 213
Figure C.7 : Circuit 4 214
Figure C.8 : Circuit 5 214
Figure C.9 : Circuit 6 215
Figure C.10 : Circuit 7 215
Figure C.11 : Circuit 8 216
Figure C.12 : Circuit 9 216
Figure C.13 : Circuit 10 217
Figure C.14 : Circuit 11 217
Figure C.15 : Circuit 12 218
Figure C.16 : Circuit 14 218
Figure C.17 : Circuit 15 219
Figure C.18 : Circuit 16 219
Figure C.19 : Circuit 17 220
Figure C.20 : Circuit 18 220
Figure C.21 : Circuit 201 221
Figure C.22 : Circuit 202 221
Figure C.23 : Circuit 203 222
Figure C.24 : Circuit 204 222
Figure C.25 : Circuit 205 223
Figure C.26 : Circuit 206 223
Figure D.1 : Interface et méthode de programmation du logiciel LINDO (http://www.lindo.com) 227
Figure D.2: Exemple de modélisation 229
Figure D.3 : Architecture d'accès aux données d'AMPL 230
Figure D.4 : Un exemple de fichier script 231

Figure D.5 : Fichier modèle de confection d'un horaire 233
Figure D.6 : Fichier script du problème de confection d'un horaire 236
Figure D.7 : Fichier modèle d'affectation 237
Figure D.8 : Fichier script pour le problème d'affectation.....237
Figure D.9 : Fichier modèle du problème d'affectation généralisée 238
Figure D.10 : Fichier script du modèle d'affectation généralisée 239
Figure D.11 : Fichier modèle du problème d'équilibrage 240
Figure D.12 : Fichier script du problème d'équilibrage 240

ANNEXE A : ANALYSE INFORMATIONNELLE DES ACITIVITÉS DE MONITORING DE LA RÉGION DE L'ESTRIE

A.1 Mise en situation

Cette section vise à analyser le mode opératoire utilisé actuellement par le Ministère des Transports du Québec pour la gestion des activités de monitoring du réseau routier de la région de l'Estrie. Cette étude fait suite à la visite du centre de service de Sherbrooke en date du 19 décembre 2002. Le but recherché par cette étude est de quantifier et d'analyser les flux d'information interagissant entre les différents acteurs intervenant dans la gestion et la planification des activités de monitoring. L'analyse est présentée sous forme de Diagramme de Flux de Données.

A.2 Modus Operandi

L'ensemble des activités liées au monitoring du réseau routier peut, sans trop de réduction, être segmenté en quatre classes d'activités :

- planification des opérations ;
- monitoring ;
- traitement des incidents ;
- analyse des activités.

Cette classification ne se veut pas une segmentation géographique étant donnée que certaines activités ont lieu en un même endroit. Elles sont cependant réalisées par des unités administratives différentes. En effet, l'aspect planification et analyse des activités est en charge de la Direction Technique, le monitoring est géré par le département du même nom alors que le traitement des incidents englobe les 5 centres de services (CS) de la région de l'Estrie.

A.3 Outil d'analyse

Les différentes activités liées au monitoring du réseau routier sont analysées par Diagrammes de Flux de Données (DFD) à l'aide du formalisme de Gane-Sarson. Cet outil permet de compartimenter le processus en éléments simples afin de faciliter le design informatique par l'établissement de balises. Le DFD se veut donc un outil graphique facilitant les discussions entre les analystes et les utilisateurs. Il est composé :

- de processus servant à représenter une fonction que le système doit effectuer et qui sont exprimés en terme d'actions accomplies par les ressources de l'organisation ;
- d'entités externes représentant des sous-systèmes reliés à l'environnement décrit ;
- de dépôts de données servant à conserver tout ce qui circule via les flux du diagramme ;
- les flux d'information qui représentent un mouvement ou une circulation d'information.

La figure A.1 présente une vue d'ensemble du processus.

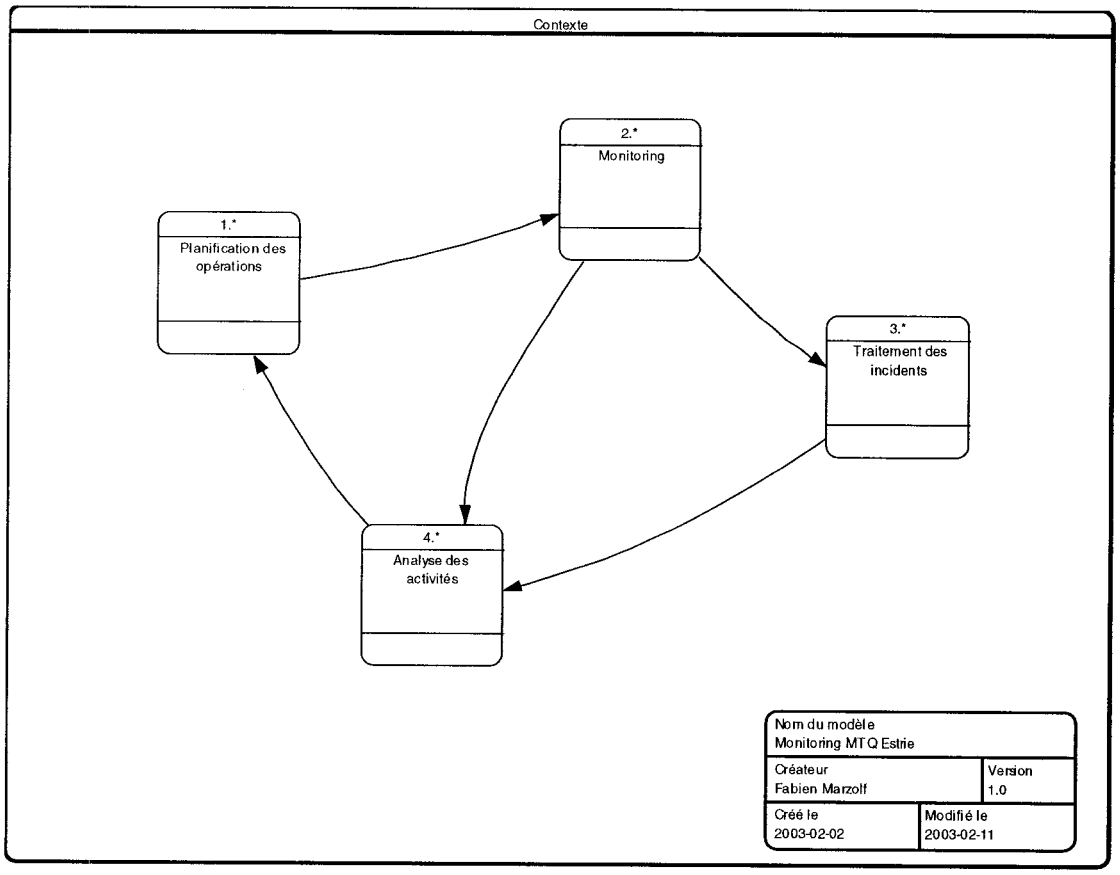


Figure A.1 : Contexte du DFD des activités de monitoring

A.4 Planification des opérations

La planification des opérations de monitoring consiste principalement à la confection d'un horaire de travail permettant aux trois patrouilleurs (un par quart de travail) de parcourir l'ensemble du réseau routier. La feuille de route remise au patrouilleur se compose :

- d'un numéro de circuit pour chaque journée (du jeudi au mercredi) ;
- d'une thématique résumant les exigences particulières à suivre en matière de surveillance.

Les informations concernant les différents circuits (carte et description textuelle) ainsi que les diverses informations sur le traitement des incidents sont confinés dans une procédure (document papier) présente en permanence dans le véhicule du patrouilleur.

A.4.1 Construction des circuits

La construction des 18 circuits a été basée sur l'expérience des planificateurs ainsi que sur une certaine thématique de parcours du réseau. Ainsi, un circuit privilégiera le déplacement sur les autoroutes et un autre s'intéressera plus particulièrement aux différentes sorties et embranchements. Chaque circuit tient bien entendu compte de la capacité du véhicule (durée de la journée) puisque chacune des tournées doit débuter et se terminer à l'édifice du Ministère des Transports, à Sherbrooke. L'autre contrainte prise en compte est relative aux exigences des fréquences de passage sur les différentes classes de route du réseau. Ces exigences ont été définies à l'interne il y a environ trois ans. Le tableau A.1 présente la classification du réseau utilisée par le Ministère.

Il est important de noter qu'un accent particulier est mis sur le parcours des autoroutes et qu'une entente verbale a été passée entre le planificateur et les patrouilleurs afin de prioriser ces axes.

Tableau A.1: Classification des routes et fréquence de passage

Classes	Description	Fréquence de passage
Autoroutes	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	1 fois la semaine, 1 fois la fin de semaine
Routes nationales	Grands axes interrégionaux et extraprovinciaux, 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.	1 fois la semaine, 1 fois la fin de semaine.
Routes régionales	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.	1 fois par 7 jours
Routes collectrices	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.	1 fois par 7 jours

Classes	Description	Fréquence de passage
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.	1 fois par 7 jours
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 supramunicipaux, 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.	

Source : Site Web du Ministère des Transport du Québec http://www.mtq.gouv.qc.ca

A.4.2 Thématiques

Les horaires de travail (numéro des circuits à parcourir) sont accompagnés d'une thématique particulière de surveillance. Il s'agit par exemple du contrôle des panneaux de signalisation, d'éléments sur surveillance (points noirs), de contrôle de la réalisation de travaux. Bien entendu, les thématiques doivent être en adéquation avec le quart de travail. Ainsi, une surveillance de l'éclairage ne peut être confiée au quart de jour. La thématique accompagne un numéro de circuit pour former la feuille de route remise au patrouilleur.

A.4.3 Tâches connexes

Si la construction des horaires de travail et la détermination des thématiques représentent le cœur des activités de planification, il faut néanmoins y greffer certaines tâches connexes réalisées ponctuellement.

En effet, lors de la construction de nouvelles sections de routes ou lors de la prise de contrat avec une municipalité, il devient nécessaire de mettre à jour la modélisation du réseau routier (données géomatiques) et répercuter cette information sur les différents circuits. Comme mentionné précédemment, l'ensemble des circuits et les actions a entreprendre lors du traitement d'un incident sont confinés au sein d'une procédure. Il y a donc nécessité de mettre à jour cette information lors de changement des méthodes de travail.

La figure A.2 présente l'éclatement du processus de planification des activités.

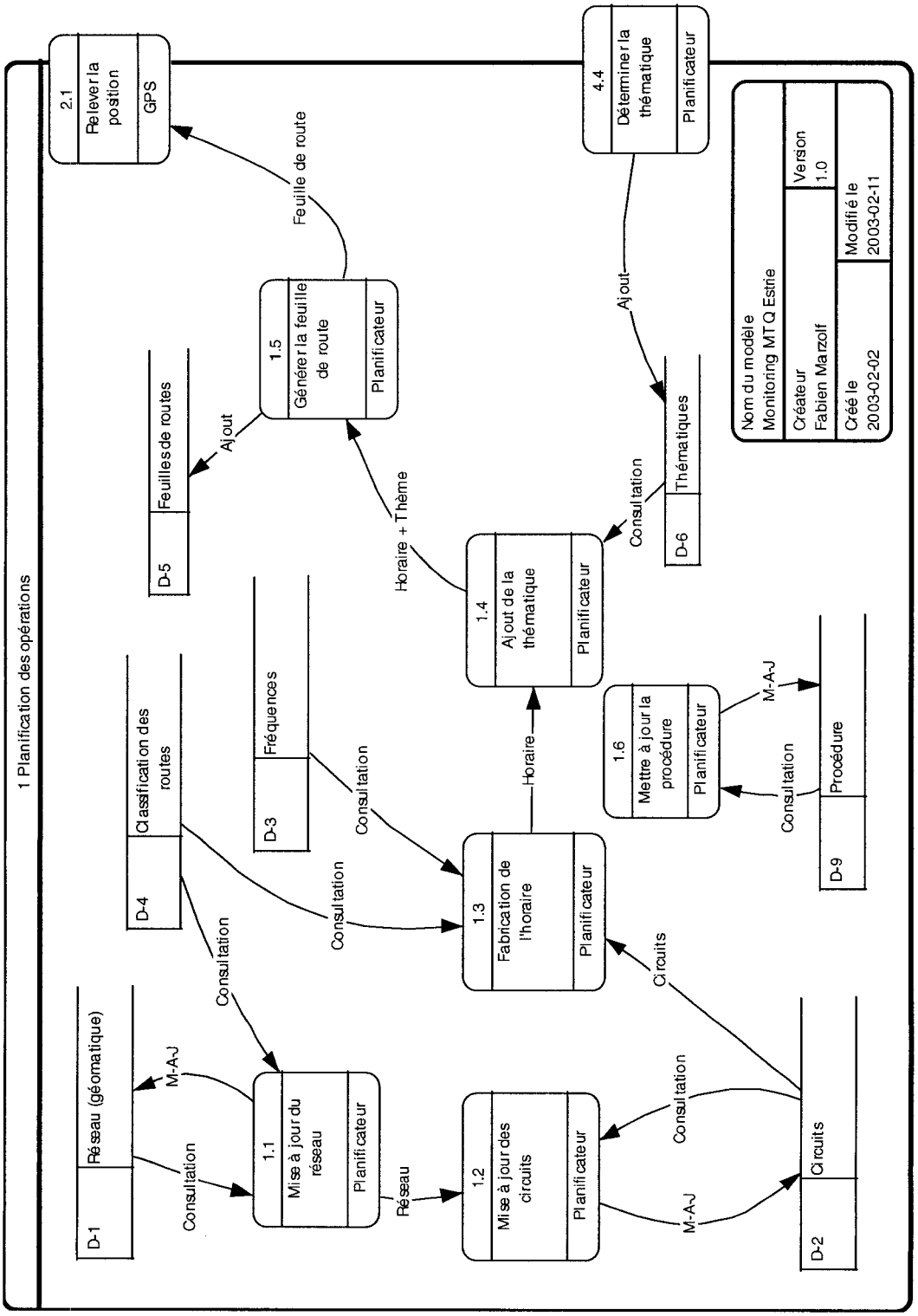


Figure A.2 : Éclatement du processus de planification

A.5 Monitoring du réseau

L'activité de monitoring proprement dite consiste à parcourir l'ensemble du réseau routier de la région concernée afin de s'assurer du bon état de ce dernier. Cette tâche est réalisée à l'aide d'un véhicule équipée d'un récepteur GPS est d'un ordinateur de bord.

Une première utilité de l'ordinateur embarqué dans le véhicule est de permettre l'association entre la position relevée par le GPS et une section du réseau routier. La figure A.3 présente le sectionnement du réseau utilisé par le Ministère. Les routes sont sectionnées en utilisant une description de type Route-Section-Sous_route complété par un chaînage en mètre. L'identificateur de la sous-route est décomposé en un code de la sous-route, une séquence, un sous-code et le côté de la chaussée. (ex : 00010-01-010-000C 0+1567). Le relevé de position, pris toutes les 30 secondes permettra lors de l'analyse des activités de comparer les activités réalisées par rapport à celles planifiées.

Cette association est également très utile lors du traitement d'un incident. Le patrouilleur est alors amené à remplir un formulaire électronique décrivant le type d'incident (détritus, animaux…), l'endroit sur la chaussé, les actions entreprises et les fournisseurs éventuellement contactés afin de traiter l'incident. Si un incident ne peut être traité par le patrouilleur, celui-ci sera identifier à l'aide d'un ruban. Les différentes informations stockées dans l'ordinateur embarqué seront transférées à un serveur en fin de journée afin de transmettre les actions à effectuer aux différents services concernés et de conserver un historique (cf. Traitement des incidents).

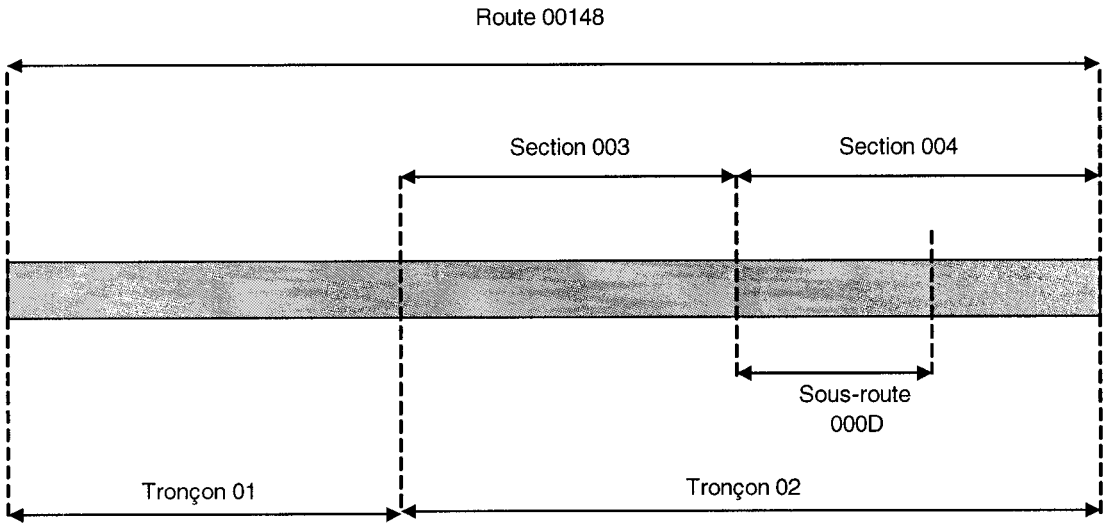


Figure A.3 : Segmentation du réseau RTTS

L'activité de monitoring comprend également un processus de réponse à des événements spéciaux (assistance à la SQ en cas d'accident par exemple) qui a pour effet de dérouter le patrouilleur de son circuit initial. Cependant, après avoir traiter un tel type d'incident, le parcours du circuit initialement planifié reprend.

La figure A.4 présente l'éclatement du processus de monitoring.

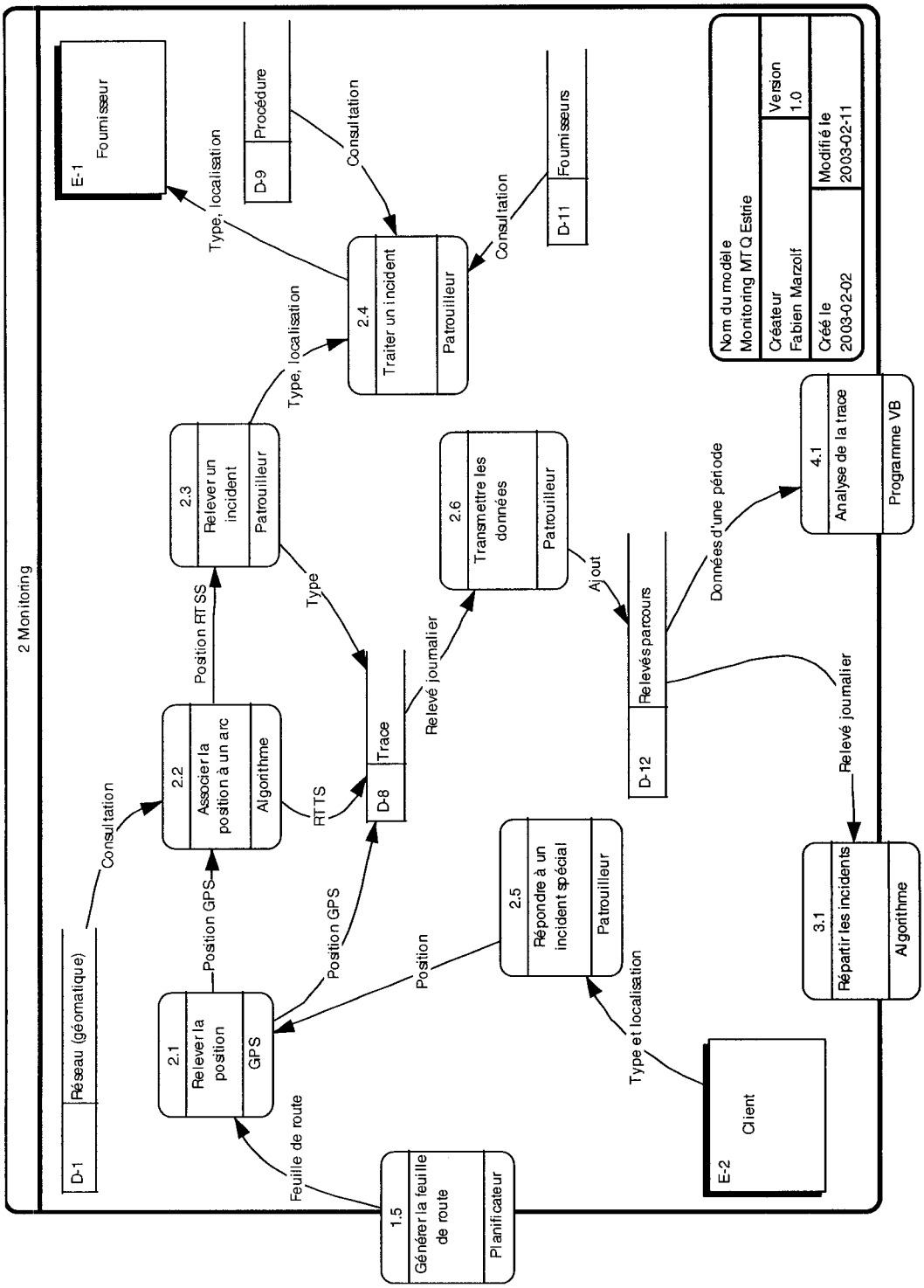


Figure A.4 : Éclatement du processus de monitoring

A.6 Traitement des incidents

Le processus de traitement des incidents ne comprend pas les actions effectuées par le patrouilleur lui-même lors de sa tournée. Il s'agit plutôt des incidents relevés et identifiés comme nécessitant une action externe. Lors du transfert par le patrouilleur, en fin de journée, des différents relevés vers le serveur, les incidents nécessitant une action sont automatiquement envoyés via courrier électronique au Centre de Service concerné. Il appartient ensuite aux différents services de prendre les mesures nécessaires afin traiter ces incidents (générer les horaires de travail, les feuilles de routes, affecter les équipes de travail). Il y a également un retour d'information vers la planification en ce sens que certaines thématiques englobent un suivi des travaux (contrôle des rubans placés lors de la détection par exemple).

La figure A.5 présente l'éclatement du processus de traitement des incidents.

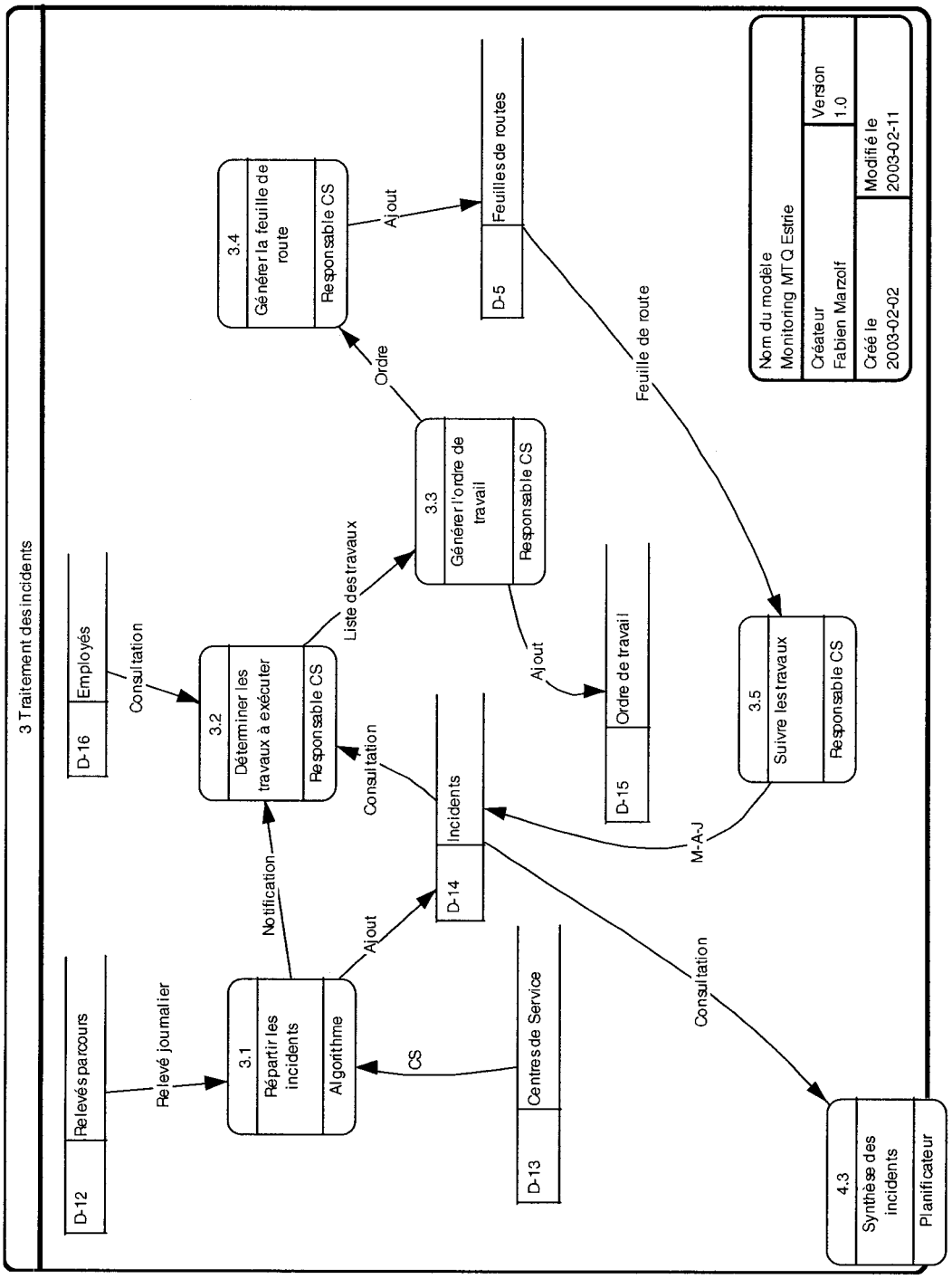


Figure A.5 : Éclatement du processus de traitement des incidents

A.7 Analyse des activités

L'analyse des activités de monitoring est un processus nouvellement mis en place afin de pouvoir évaluer les activités opérationnelles par rapport aux activités planifiées. Ce processus consiste premièrement à détecter au cours de la période d'étude les arcs non couverts. Cette analyse de la trace GPS est réalisée à l'aide d'une modélisation du réseau (SIG) et d'un logiciel programmé à l'interne en Visual Basic. Les principales difficultés observées sont en rapport avec la segmentation du réseau qui possède d'une part des sections de longueurs variables mais également une certaine ambiguïté de construction. Ainsi, certaines sections englobent une intersection avec d'autres sections transversales. Il devient alors difficile pour le logiciel de détecter le virage du véhicule. De plus, du à la fréquence de prise de données (une toutes les 30 secondes) et au minimum de positions procurant la propriété de couverture à une section (minimum de 3 points), certaines sections intermédiaires relativement courtes apparaissent comme n'étant pas couverte. Il faut alors appliquer une action manuelle pour corriger cette anomalie.

Le deuxième aspect de l'analyse des activités consiste à faire une synthèse des différents incidents relevés afin de déterminer la thématique des parcours. Cette tâche est réalisée par le planificateur à l'aide d'un historique des incidents relevés visualisable sur le site intranet du Ministère des Transports. Cette tâche n'est pas réellement automatisée et il appartient au planificateur de réaliser différentes requêtes temporelles afin de connaître l'historique et la fréquence d'apparition des incidents pour déterminer les thématiques de la prochaine semaine. Il faut noter que certaines de ces thématiques comme le contrôle des éclairages ou des panneaux de signalisation sont cycliques.

La figure A.6 présente l'éclatement du processus de traitement des incidents

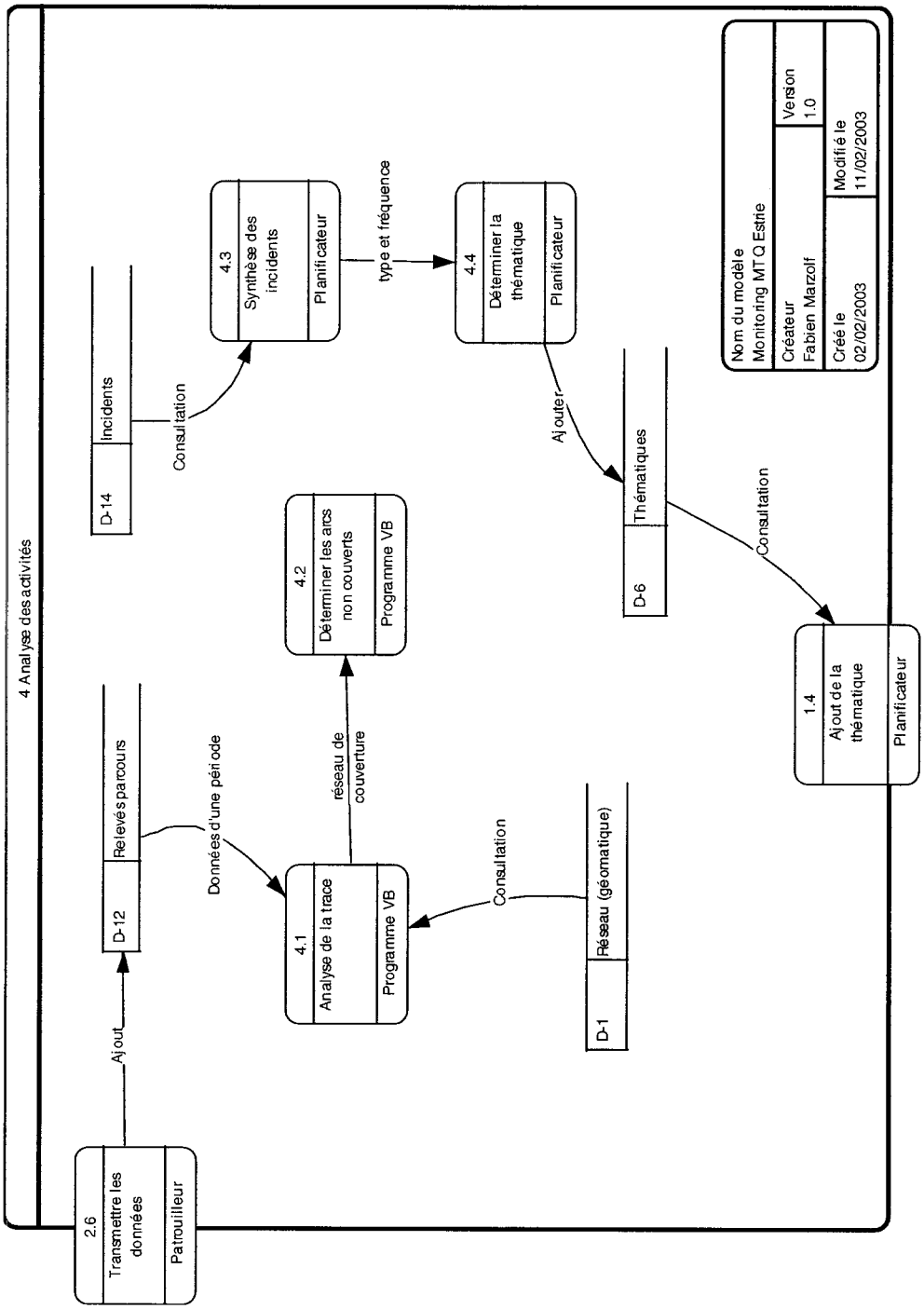


Figure A.6 : Éclatement du processus d'analyse des activités

A.8 Conclusion

L'analyse des activités liées au monitoring du réseau routier a permis de cerner et de maîtriser les différentes difficultés du problème, tant opérationnelles que technologiques, mais toujours suivant un aspect de traitement et de circulation de l'information.

L'analyse des flux informationnels nous permet ainsi de mettre en évidence la grande quantité d'information à traiter, provenant de composantes de natures diverses et inscrite dans une volonté novatrice de comparaison entre les activités planifiées et les activités réellement opérées.

ANNEXE B : MODÉLISATION ET VISUALISATION D'ALGORITHMES DE TOURNÉES SUR LES ARCS À L'AIDE D'UNE APPLICATON EXCEL

Cette section a pour objet de présenter les différentes méthodes et fonctions programmées à l'aide de Microsoft Excel, Microsoft Access et du langage Visual Basic pour Application afin de résoudre la problématique de planification des activités de monitoring.

B.1 Extraction et création du graphe mathématique

Tous les algorithmes et méthodes développés et programmés dans le cadre de ce mémoire reposent sur la théorie des graphes et s'appuient ainsi sur un graphe mathématique. Ce graphe mathématique découle de la modélisation du réseau routier du SIG. Les figures B.1 à B5 présentent les codes informatiques développés pour la création du graphe à partir du réseau SIG. Il s'agit principalement d'extraire les caractéristiques de chacun des objets et d'ajouter des nœuds au début et à la fin de chacune des polylignes.

```
Private Const m_sX1 As String = "X1"
Private Const m_sY1 As String = "Y1"
Private Const m_sX2 As String = "X2"
Private Const m_sY2 As String = "Y2"

Private Const m_sAttrib1 As String = "ID"
Private Const m_sAttrib2 As String = "Label"
```

Figure B.1 : Déclaration des constantes

```
Dim bdd As Database, recn As Recordset, recl As Recordset

Sub TraiterlaCouche0()

 Dim pFeatcls As IFeatureClass,  pFeatLayer As IFeatureLayer, pDoc As IMxDocument,  pMap As IMap,
 Dim pGeom As IGeometry

 'ACCESS
 Set bdd = workspaces(0).OpenDatabase("C:\Travaux_Reseau\Reseau\reseau.mdb")
 Set recn = bdd.OpenRecordset("noeuds")
 Set recl = bdd.OpenRecordset("liens")
 bdd.Execute "DELETE FROM NOEUDS"
 bdd.Execute "DELETE FROM LIENS"
 'FIN ACCESS

 Set pDoc = ThisDocument
 Set pMap = pDoc.Maps.Item(0)
 Set pFeatLayer = pMap.Layer(0)

 Set pFeatcls = pFeatLayer.FeatureClass
Dim lFld1 As Long, lFld2 As Long
 lFld1 = pFeatcls.FindField("RTS")
 lFld2 = pFeatcls.FindField("CL_CAMION")
 lFld3 = pFeatcls.FindField("CL_FONCT")
 lFld4 = pFeatcls.FindField("FID")

 Dim iOIDList() As Long
 Dim iOIDListCount As Long
 Dim pFeatureCursor As IFeatureCursor
 iOIDListCount = 5000
 ReDim iOIDList(iOIDListCount)
 For k = 1 To iOIDListCount
   iOIDList(k - 1) = k
 Next
Set pFeatureCursor = pFeatcls.GetFeatures(iOIDList, False)

 Dim pFeat As IFeature
 Set pFeat = pFeatureCursor.NextFeature
 k = 0
 While Not pFeat Is Nothing
 k = k + 1
   Debug.Print k, pFeat.Value(lFld)
   traitershape pFeat.Shape, 2, pFeat.Value(lFld1), pFeat.Value(lFld2), pFeat.Value(lFld3),
pFeat.Value(lFld4)
   Set pFeat = pFeatureCursor.NextFeature
 Wend

   bdd.Close
   MsgBox "Terminé!"
End Sub
```

Figure B.2 : Méthode de traitement de la couche SIG

```
Sub traitershape(pGeom As IGeometry, lFormatNum As Long, rts As String, clc As Long, clf As
Long, fid As Long)

  Dim pPC As IPointCollection, pGC As IGeometryCollection
  Dim pPt As IPoint, pMA As IMAware, pZA As IZAware, pIDA As IPointIDAware
  Dim strShape As String, strSub As String
  Dim lCount As Long, i As Long
  Dim n1 As Long, n2 As Long, longueur As Long

  Select Case pGeom.GeometryType

  Case 3, 4
   Set pGC = pGeom
   lCount = pGC.GeometryCount - 1
   For i = 0 To lCount
    Set pPC = pGC.Geometry(i)
     n1 = AjouterNoeud(pPC.Point(0))
     n2 = AjouterNoeud(pPC.Point(pPC.PointCount - 1))

     longueur = 0
     x1 = 0
     y1 = 0
     For Z = 0 To pPC.PointCount - 1
       x2 = x1
       y2 = y1
       x1 = pPC.Point(Z).X
       y1 = pPC.Point(Z).Y
       If Z > 0 And x1 > 0 Then
         longueur = longueur + Sqr((x2 - x1) ^ 2 + (y2 - y1) ^ 2)
       End If
     Next
     AjouterLien fid, n1, n2, longueur, rts, clc, clf, pPC.Point(0).X, pPC.Point(0).Y,
pPC.Point(pPC.PointCount - 1).X, pPC.Point(pPC.PointCount - 1).Y

   Next i
  Case Else
   strShape = "Shape type not supported"
  End Select

End Sub
```

Figure B.3 : Méthode de traitement de la forme

```
Function AjouterNoeud(pt As IPoint) As Long
  recn.Index = "xy"
  recn.Seek "=", Int(pt.X), Int(pt.Y)
  If recn.NoMatch Then
    recn.AddNew
    recn!noeud_xcoord = Int(pt.X)
    recn!noeud_ycoord = Int(pt.Y)
    Debug.Print "ajout du noeud " & recn!noeud_id
    AjouterNoeud = recn!noeud_id
    recn.Update
  Else
    AjouterNoeud = recn!noeud_id
  End If
End Function
```

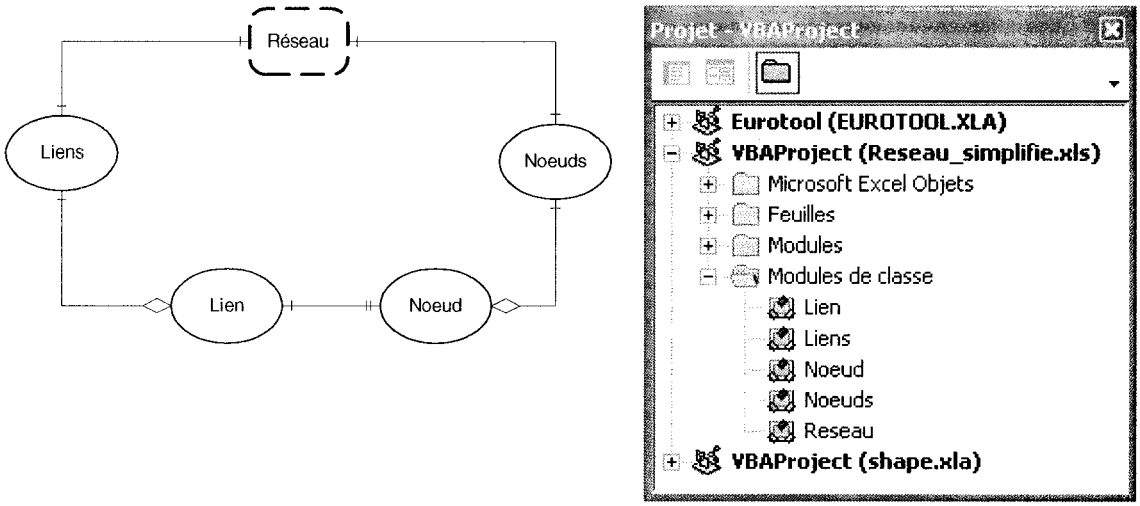
Figure B.4 : Fonction d'ajout d'un noeud

```
Sub AjouterLien(fid As Long, n1 As Long, n2 As Long, longueur As Long, rts As String, clc As
Long, clf As Long, x1 As Long, y1 As Long, x2 As Long, y2 As Long)

  recl.AddNew
  recl!lien_arcgis_id = fid
  recl!lien_noeud1 = n1
  recl!lien_noeud2 = n2
  recl!lien_x1 = x1
  recl!lien_y1 = y1
  recl!lien_x2 = x2
  recl!lien_y2 = y2

  recl!lien_longueur = longueur
  recl!lien_rts = rts
  recl!lien_cl_camion = clc
  recl!lien_cl_fonct = clf
  recl!lien_inv = False
  recl.Update

  If clc <> 1 Then

  recl.AddNew
  recl!lien_noeud1 = n2
  recl!lien_noeud2 = n1

  recl!lien_x1 = x2
  recl!lien_y1 = y2
  recl!lien_x2 = x1
  recl!lien_y2 = y1

  recl!lien_longueur = longueur
  recl!lien_rts = rts
  recl!lien_cl_camion = clc
  recl!lien_cl_fonct = clf
  recl!lien_inv = True
  recl.Update

  End If
End Sub
```

Figure B.5 : Fonction d'ajout d'un lien (arc)

B.2 Modèle objet du graphe

Le modèle objet de la figure B.6 présente la topologie du réseau modélisé dans Excel. A partir de cette topologie, 5 classes ont été crées en langage VBA



a) Modèle objet b) Classes d'objets

Figure B.6 : Modèle objet et classes d'objets associés au réseau

B.3 Propriétés et méthodes de propriétés des objets

Chacun des objets (Nœud, Lien et Réseau) possède différentes propriétés qui sont nécessaire pour le développement de l'application. Certaines ont été créées pour la gestion du réseau (création, affichage), d'autres pour une utilisation dans des algorithmes mathématiques.

Tableau B.1 : Propriétés des objets élémentaires (d'après TRÉPANIER, 1999).

Objet	Propriétés	Type	Description
Réseau	ID	Chaîne	Identifiant du réseau
	Nœuds	Collection	Contient tous les objets noeuds
	Liens	Collection	Contient tous les objets liens
Noeud	Nom	Chaîne	Identifiant du noeud
	Cellule	Cellule Excel	Première cellule de la rangée de la feuille « Nœuds » où sont stockés les propriétés d'un nœud
	Forme	Objet graphique Excel (« Oval »)	Référence à l'objet graphique utilisé pour représenter le nœud
	Liens	Collection	Collection des objets « lien » qui sont connectés à l'objet nœud
	Marque	Booléen	Marquage du nœud dans un algorithme d'étiquetage (Dijkstra)
	DistCum	Réel	Étiquette (Dijkstra)
	Predecesseur	lien	Lien utilisé pour se rendre au nœud
	Numero	Entier	Étiquette (Plus court chemin)
Lien	Nom	Chaîne	Identifiant du lien
	Cellule	Cellule Excel	Première cellule de la rangée de la feuille « Liens » où sont stockés les propriétés d'un lien
	Forme	Objet graphique Excel (« Connector »)	Référence à l'objet graphique utilisé pour représenter un lien
	Noeud1	Noeud	Objet nœud situé au début du lien
	Noeud2	Noeud	Objet nœud situé à la fin du lien
	Sens	Entier	Numéro indiquant le sens du lien
	Classe	Entier	Numéro de la classe de route
	Couverture	Entier	Couverture du lien
	Route	Chaîne	Identifiant de la route à laquelle appartient le lien
	Copie	Lien	Objet lien d'où découle l'objet (équilibrage du réseau)

B.4 Méthodes associées aux objets

Les méthodes associées aux objets peuvent être divisées en trois catégories :

- les méthodes de création et d'édition du réseau ;
- les méthodes d'interrogation des objets ;
- les méthodes de calcul d'arbre, de tours.

Nous ne présenterons ici que certaines des méthodes développées. Pour de plus amples informations sur les autres méthodes, se référer à TRÉPANIER (1999).

B.4.1 Méthodes de l'objet Lien

Une des premières méthodes développée, *Lien.AutresLiens*, et ajoutée à l'architecture existante, sert à sélectionner la collection de lien utilisant les mêmes noeuds que l'objet en question. Cette méthode est une méthode d'affichage utilisée dans l'interface d'interrogation des liens. La figure B.7 présente le code informatique VBA développé pour l'implantation de cette méthode.

```
Function AutresLiens() As Liens

'Définition des liens utilisant les même noeuds que le lien en question
Dim nod1 As Noeud
Dim nod2 As Noeud
Dim unli As lien
Dim lis As New Liens

Set nod1 = Me.Noeud1
Set nod2 = Me.Noeud2

lis.Add Me

For k = 1 To nod1.LiensLibresSortant.Count
Set unli = nod1.LiensLibresSortant.Item(k)
If Not unli Is Me Then
If unli.AutreNoeud(nod1) Is nod2 Then
lis.Add unli
End If
End If
Next

For k = 1 To nod2.LiensLibresSortant.Count
Set unli = nod2.LiensLibresSortant.Item(k)
If Not unli Is Me Then
If unli.AutreNoeud(nod2) Is nod1 Then
lis.Add unli
End If
End If
Next

Set AutresLiens = lis

End Function
```

Figure B.7 : Code VBA de la méthode AutresLiens

B.4.2 Méthodes de l'objet Noeud

La méthode *Nœud.LiensLibresEntrant* ajoutée renvoie une collection de liens non marqués entrant dans un nœud. Cette méthode est le pendant de *Nœud.LiensLibresSortant* utilisée dans l'algorithme de Dijkstra. Cette nouvelle méthode est utilisée dans l'algorithme de Dijkstra Inverse qui renvoie une anti-arborescence. La figure B.8 présente le code informatique associé à cette méthode.

```
Function LiensLibresEntrant() As Liens
  Dim lis As New Liens, li As lien

  For k = 1 To Me.Liens.Count
  Set li = Me.Liens.Item(k)
  'Vérifie si le lien entre et l'ajoute à la méthode
  If Not (li.Marque1) Then
    If li.Sens = 0 Then
      lis.Add li
    End If
    If li.Sens = 1 And li.Noeud2 Is Me Then
      lis.Add li
    End If
    If li.Sens = 2 And li.Noeud1 Is Me Then
      lis.Add li
    End If
  End If
  Next
  Set LiensLibresEntrant = lis

End Function
```

Figure B.8 : Code VBA de la méthode LiensLibresEntrant

B.4.3 Méthodes de l'objet réseau

B.4.3.1 Méthodes de propriété

Les problèmes de tournées sur les arcs nécessitent un réseau équilibré, un réseau Eulérien. Cette caractéristique implique, dans le cas orienté, que chaque nœud du réseau possède un nombre d'arcs entrants et sortants du nœud en même nombre. Dans le cas non orienté, le nombre d'arcs adjacents à un nœud doit être pair. La méthode *Réseau.Eulerien* présentée à la figure B.9 présente le code informatique développé qui permet d'interroger cette caractéristique.

```
Function Eulerien() As Boolean

  Eulerien = True

  For k = 1 To Me.Noeuds.Count
    If Me.Noeuds.Item(k).DegreIn <> Me.Noeuds.Item(k).DegreOut Then
    Eulerien = False
    Exit Function
    End If
  Next

End Function
```

Figure B.9 : Code VBA de la méthode Réseau.Eulerien

B.4.3.2 Méthodes génératrices

L'ensemble des méthodes génératrices développées vise à transformer ou à parcourir le graphe et ainsi de pouvoir facilement programmer différents algorithmes de tournées sur les arcs, basées sur des concepts de la théorie des graphes.

Par exemple, la méthode *Reseau.DijkstraInverse(NœudSource)* présentée à la figure B.10 a pour objet de calculer l'arbre des plus courts chemins enraciné au nœud source et ainsi de fournir une anti-arborescence. Cette anti-arborescence, collection d'arcs, est notamment utilisée dans la méthode *Reseau.PostierChinois* qui construit le circuit basé sur le réseau et sur cette anti-arborescence.

```
Function DijkstraInverse(nod As Noeud, Optional delai As Integer) As Liens
```

```
'Initialisation
Dim nodtmp As Noeud, nods As New Noeuds
Dim li As lien, lis As New Liens
Dim k As Integer

Application.StatusBar = "En cours pour " & nod.nom & " ..."
If delai = 0 Then Application.ScreenUpdating = False
If delai > 0 Then Application.ScreenUpdating = True

'Banque de noeuds marqués
Set nods = Nothing
'Réseau - arbre résultant
Set lis = Nothing
'Marquage du premier noeud
If delai > -1 Then
  ThisWorkbook.Sheets("Reseau").Select
  ThisWorkbook.Sheets("Reseau").Unprotect
End If
nod.DistCum = 0
nods.Add nod, nod.Forme.Name

'Utilise l'algorithme de Dijkstra pour calculer l'arbre
Do
   'Parcourt les liens entrant du noeud sélectionné
   For k = 1 To nod.LiensLibresEntrant.Count
      Set li = nod.LiensLibresEntrant.Item(k)
      Set nodtmp = li.AutreNoeud(nod)

      'Marque le noeud (temporairement) si la distance est inférieure
      If nod.DistCum + li.Longueur < nodtmp.DistCum Then
        nodtmp.DistCum = nod.DistCum + li.Longueur
        'Enregistre le prédécesseur (lien)
        Set nodtmp.Predecesseur = li
        'Ajoute le noeud à la banque de noeuds marqués
        If nods.Item(nodtmp.Forme.Name) Is Nothing Then
           nods.Add nodtmp, nodtmp.Forme.Name
        End If
        'Dessine le marquage temporaire
        If delai > 0 Then
           Application.Wait Now() + delai / 24 / 3600
           If delai > -1 Then DessinerUnNoeud nodtmp, 3
           Application.StatusBar = "Marquage: " & nodtmp.nom & " (" & nodtmp.DistCum & ")"
        End If
      End If
   Next
   'Enlève le noeud utilisé de la banque de noeuds marqués
   nods.Remove nod.Forme.Name
   Set nodtmp = nod
   If nods.Count > 0 Then
     'Choisit le noeud à la distance cumulée minimale
     Set nod = nods.NoeudDistMin
```

```
      'Ajoute le prédecesseur à l'arbre
      lis.Add nod.Predecesseur
      'Dessine le noeud (permanent) et le prédecesseur
      'Attente (facultative)
      If delai > 0 Then
        Application.Wait Now() + delai / 24 / 3600
        Application.StatusBar = "Choix: " & nod.nom & " (" & nod.DistCum & ")"
      End If
      If delai > -1 Then
        DessinerUnNoeud nod, 2
        DessinerUnLien nod.Predecesseur, 1
      End If
    End If
    'Termine si aucun noeud n'est marqué


  Loop Until nods.Count = 0

  'Protège la feuille
  If delai < -1 Then
    ThisWorkbook.Sheets("Reseau").Protect , True, False, False
  End If
  Application.StatusBar = ""
  Set DijkstraInverse = lis
End Function
```

Figure B.10 : Méthode de construction de l'anti-arborescence

Tous ces concepts de tournées sont basés sur l'obtention d'un graphe connexe et Eulérien. Ainsi, les méthodes *Reseau.Connect* et *Reseau.RendreEulerien* permettent ces transformations du réseau. Elles sont basées sur les plus courts chemins calculés par la méthode *Reseau.CalculPlusCourtChemin* qui renvoie la matrice des distances et des prédécesseurs selon l'algorithme de Floyd-Warshall.

La figure B.11 présente la code informatique développé afin d'augmenter le réseau induit par les arcs obligatoires en un réseau connexe.

```
Global predres() As Integer
Global distres() As Single
Global liob As New Liens 'Ensemble des arcs obligatoires

Function Connect() As Reseau
```

```
Dim li As lien
Dim resred As New Reseau
Dim nod1 As Noeud, nod2 As Noeud


'Dessiner les arcs obligatoires
For k = 1 To liob.Count
Set li = liob.Item(k)
   With li.Forme.Line
         .ForeColor.RGB = QBColor(3)
         .Weight = xlHairline
   End With
Next

MsgBox "Voici les arcs obligatoires"


'PlusCourtCheminFloyd sur le reseau initial (res)
ReDim predres(1 To res.Noeuds.Count, 1 To res.Noeuds.Count)
ReDim distres(1 To res.Noeuds.Count, 1 To res.Noeuds.Count)
For i = 1 To res.Noeuds.Count
For j = 1 To res.Noeuds.Count
predres(i, j) = pred(i, j)
distres(i, j) = dist(i, j)
Next
Next

' Définition du réseau réduit
For i = 1 To liob.Count
   Set li = liob.Item(i)
   li.Marque2 = True
   If place(resred.Noeuds, li.Noeud1) = 0 Then resred.Noeuds.Add li.Noeud1
   If place(resred.Noeuds, li.Noeud2) = 0 Then resred.Noeuds.Add li.Noeud2
   resred.Liens.Add li
Next

'Ajout des arcs aux endroits de deconnexion dist = 100000
Do

PlusCourtCheminFloyd resred

For i = 1 To resred.Noeuds.Count
   For j = 1 To resred.Noeuds.Count
   If dist(i, j) = 100000 Then GoTo detect
   If i >= resred.Noeuds.Count And j >= resred.Noeuds.Count Then GoTo fin
   Next
If i >= resred.Noeuds.Count And j >= resred.Noeuds.Count Then GoTo fin
Next

If i >= resred.Noeuds.Count And j >= resred.Noeuds.Count Then GoTo fin

detect:
```

```
' Ajout à resred des liens du plus court chemin de la deconnection (si necessaire)
Set nod1 = resred.Noeuds.Item(i)
Set nod2 = resred.Noeuds.Item(j)
nod1.numero = place(res.Noeuds, nod1)
nod2.numero = place(res.Noeuds, nod2)

 'Recherche du predecesseur et ajout du lien
   If predres(nod1.numero, nod2.numero) <> 0 Then
   l = nod2.numero

   Do While Not nod1.numero = predres(nod1.numero, l)
   l = predres(nod1.numero, l)
   'recherche du lien
   For z = 1 To res.Noeuds.Item(l).LiensLibresSortant.Count
   Set li = res.Noeuds.Item(l).LiensLibresSortant.Item(z)
   If li.AutreNoeud(res.Noeuds.Item(l)) Is nod2 Then Exit For
   Next

   If li.Marque2 = False Then
   li.Marque2 = True
   If place(resred.Noeuds, li.Noeud1) = 0 Then resred.Noeuds.Add li.Noeud1
   If place(resred.Noeuds, li.Noeud2) = 0 Then resred.Noeuds.Add li.Noeud2
   resred.Liens.Add li
      End If

   Set nod2 = res.Noeuds.Item(l)
   nod2.numero = l
   Loop

   'Dernier lien
   For z = 1 To res.Noeuds.Item(nod1.numero).LiensLibresSortant.Count
   Set li = res.Noeuds.Item(nod1.numero).LiensLibresSortant.Item(z)
   If li.AutreNoeud(res.Noeuds.Item(nod1.numero)) Is nod2 Then Exit For
   Next

   If li.Marque2 = False Then
   li.Marque2 = True
   If place(resred.Noeuds, li.Noeud1) = 0 Then resred.Noeuds.Add li.Noeud1
   If place(resred.Noeuds, li.Noeud2) = 0 Then resred.Noeuds.Add li.Noeud2
   resred.Liens.Add li
   End If

   End If
Loop

fin:
'Dessiner le reseau trouvé
For k = 1 To resred.Liens.Count
Set li = resred.Liens.Item(k)
With li.Forme.Line
        .ForeColor.RGB = QBColor(2)
        .Weight = xlHairline
```

```
End With
Next

MsgBox "le graphe est fortement connexe"


Set Connect = resred

End Function
```

Figure B.11 : Méthode d'augmentation du réseau en réseau connexe

Cette méthode représente la première étape de l'algorithme « Connect-Balance » développé par Ball & Magazine (BALL, 1988). L'objectif est de trouver un ensemble d'arcs à ajouter au réseau induit par les arcs obligatoires afin de le rendre connexe. Cette tâche peut bien entendu être effectuée de diverses façons. L'optique de résolution choisie est assez simple :

1. Identifier deux nœuds déconnectés à l'aide de la matrice des plus courts chemins dans le réseau initial (la distance associée est une distance infinie).
2. Ajouter le plus court chemin (ensemble d'arcs) entre ces deux nœuds à partir du réseau initial.
3. Reprendre l'étape 1 tant qu'il existe une déconnexion.

Un autre groupe de méthodes, *Reseau.AjoutLienCircuit* et *Reseau.ConfectionCircuit* permettent la création interactive des circuits par sélection successive des nœuds, ou encore *Circuit.CreerInverse* qui permet de créer un circuit parcouru dans le sens inverse. Il faut noter ici qu'un circuit est une collection orientée de liens.

B.4.3.3 Méthodes d'affichage

Finalement, afin de pouvoir tirer profit de la valeur ajoutée procurée par l'interface graphique de l'outil informationnel développé, certaines méthodes d'affichage ont été codées, tant pour les arcs du réseau que pour les circuits. Par exemple, la méthode

Reseau.AfficherClasse(classe) présentée à la figure B.12 permet la visualisation de l'ensemble des arcs appartenant à une classe.

```
Sub Dessiner_classe()

Dim li As lien
Dim rep

'Lire le réseau s'il n'est pas en mémoire
If res.Noeuds.Count = 0 Then LireReseau Else DessinerSansReplacer


rep = InputBox("Classe d'arcs à dessiner ?", "Dessin d'une classe")


Application.StatusBar = "Affichage de la classe " & rep & " en cours..."
Application.ScreenUpdating = False


For k = 1 To res.Liens.Count
Set li = res.Liens.Item(k)

If li.classe = rep Then
'Dessiner les arcs de la classe sélectionnée en ROUGE
With li.Forme.Line
   .ForeColor.RGB = QBColor(12)
   .Weight = 7
End With
'Dessiner les autres arcs en GRIS
ElseIf li.classe <> c Then
With li.Forme.Line
   .ForeColor.RGB = QBColor(8)
   .Weight = xlHairline
End With
End If

Next

Application.ScreenUpdating = True
Application.StatusBar = ""
End Sub
```

Figure B.12 : Méthode d'affichage d'une classe d'arc

Différentes méthodes d'affichage ont également été développées pour l'affichage des circuits, des liens omis par la planification.

B.5 Interaction du système informationnel et d'un optimiseur mathématique

Plusieurs des méthodes ou procédures développées dans le cadre de ce projet nécessitent l'utilisation de la programmation linéaire. Excel offre un tel outil d'optimisation (« solver ») qui n'est pas facilement configurable. La solution retenue est plutôt de générer des fichiers textes qui seront ensuite interprétés par l'optimiseur. Le choix d'un tel support est justifié par le fait que l'optimiseur utilisé (AMPL) ne peremt pas l'interaction avec Excel lorsque celui-ci est ouvert. La méthode Reseau.RendreEulerien présentée à la figure B.13 illustre l'interaction entre l'outil développé et AMPL.

```
Function Rendre_Eulerien(unres As Reseau) As Reseau
'il ne faut se soucier que des arcs qui sont dans unres donc
'pas moyen d'utiliser ici degrein ou unres.eulerien ....


Dim lis As Liens
Dim nods As Noeuds
Dim Dplus As New Noeuds
Dim Dmoins As New Noeuds
Dim li As lien
Dim nod1 As Noeud
Dim nod2 As Noeud
Dim fs, f, s

Dim returnvalue
Dim textline As String
Dim nomnod1 As String
Dim nomnod2 As String
Dim trans As Integer
Dim strans As String

Dim degin() As Integer
Dim degout() As Integer
Dim euler As Boolean


'Degrés IN & OUT sur le réseau réduit
ReDim degin(1 To unres.Noeuds.Count)
ReDim degout(1 To unres.Noeuds.Count)

Set lis = unres.Liens
Set nods = unres.Noeuds
```

```
euler = True
For k = 1 To nods.Count
   For j = 1 To nods.Item(k).LiensLibresSortant.Count
   If placeliens(lis, nods.Item(k).LiensLibresSortant.Item(j)) <> 0 Then
   degout(k) = degout(k) + 1
   End If
   Next

   For j = 1 To nods.Item(k).LiensLibresEntrant.Count
   If placeliens(lis, nods.Item(k).LiensLibresEntrant.Item(j)) <> 0 Then
   degin(k) = degin(k) + 1
   End If
   Next
If degin(k) <> degout(k) Then euler = False
Next

If euler = True Then GoTo fin

'Ecrire les données dans le fichier d'input pour les origines
Open ThisWorkbook.Path & "\Origine.tab" For Output As #1
Print #1, "ampl.tab 1 1"
Print #1, "ORIG"; Tab; "offre"

'Ecrire les données dans le fichier d'input pour les destinations
Open ThisWorkbook.Path & "\Destination.tab" For Output As #2
Print #2, "ampl.tab 1 1"
Print #2, "DEST"; Tab; "demande"


For k = 1 To nods.Count
If degout(k) - degin(k) > 0 Then
Dplus.Add nods.Item(k)
Print #2, nods.Item(k).nom; Tab; degout(k) - degin(k)
ElseIf degout(k) - degin(k) < 0 Then
Dmoins.Add nods.Item(k)
Print #1, nods.Item(k).nom; Tab; -degout(k) + degin(k)
End If
Next
Close #1
Close #2

'Ecrire les données dans le fichier d'input pour les couts
Open ThisWorkbook.Path & "\Distance.tab" For Output As #3
Print #3, "ampl.tab 2 1"
Print #3, "ORIG"; Tab; "DEST"; Tab; "cout"
For k = 1 To Dmoins.Count
   For j = 1 To Dplus.Count
Print #3, Dmoins.Item(k).nom; Tab; Dplus.Item(j).nom; Tab; distres(place(nods, Dmoins.Item(k)),
place(nods, Dplus.Item(j)))
   Next
Next
```

```
Close #3


Set fs = CreateObject("Scripting.FileSystemObject")
s = Dir(ThisWorkbook.Path & "\Resultats.tab")
If s <> "" Then
Set f = fs.GetFile(ThisWorkbook.Path & "\Resultats.tab")
f.Delete
End If

k = 1
essai:
'Résolution du model de transport à l'aide d'ampl (.exe et fichiers .tab dans le même repertoire)
ChDir (ThisWorkbook.Path)
returnvalue = Shell(ThisWorkbook.Path & "\ampl.exe transport.tab.run", 3)

' Temporisation pour fabrication du fichier des résultats
Application.StatusBar = "Ecriture des résultats"
Application.Wait Now() + 2 / 24 / 3600
Application.StatusBar = ""


'Lecture des résultats
s = Dir(ThisWorkbook.Path & "\Resultats.tab")
If s = "" Then
MsgBox "Impossible de lire le fichier des résultats." & Chr(10) & Chr(13) & " Essai # " & k
k = k + 1
If k < 3 Then GoTo essai
Msgbox "Impossible de résoudre le problème"
Exit Function
End If


Open ThisWorkbook.Path & "\Resultats.tab" For Input As #4


k = 1
Do While Not EOF(4)
   Line Input #4, textline
If k >= 3 Then 'car les deux premières lignes .....
   'Lecture des noms des noeuds et des unités transportées
   nomnod1 = Mid(CStr(textline), 1, InStr(CStr(textline), Chr(9)) - 1) 'nom noeud1
   strans = Right(CStr(textline), Len(CStr(textline)) - InStr(CStr(textline), Chr(9))) 'tempon
   nomnod2 = Mid(strans, 1, InStr(strans, Chr(9)) - 1) 'nomnoeud2
   strans = Right(strans, Len(strans) - InStr(strans, Chr(9))) 'string du transport
   trans = Val(strans) 'valeur du transport


If trans > 0 Then
   'Recherche des noeuds nod1 et nod2
   i = 1
   Do While Not res.Noeuds.Item(i).nom = nomnod1
```

```
    i = i + 1
    Loop
    If Not res.Noeuds.Item(i) Is Nothing Then
    Set nod1 = res.Noeuds.Item(i)
    nod1.numero = i
    End If
    i = 1
    Do While Not res.Noeuds.Item(i).nom = nomnod2
    i = i + 1
    Loop
    If Not res.Noeuds.Item(i) Is Nothing Then
    Set nod2 = res.Noeuds.Item(i)
    nod2.numero = i
    End If

    'Recherche du predecesseur et copie du lien
    If predres(nod1.numero, nod2.numero) <> 0 Then
    l = nod2.numero

    Do While Not nod1.numero = predres(nod1.numero, l)
    l = predres(nod1.numero, l)
    'recherche du lien
    For z = 1 To res.Noeuds.Item(l).LiensLibresSortant.Count
    Set li = res.Noeuds.Item(l).LiensLibresSortant.Item(z)
    If li.AutreNoeud(res.Noeuds.Item(l)) Is nod2 Then Exit For
    Next
    Debug.Print li.nom
    copier_un_lien li, trans

    Set nod2 = res.Noeuds.Item(l)
    nod2.numero = l
    Loop

    'Dernier lien
    For z = 1 To res.Noeuds.Item(nod1.numero).LiensLibresSortant.Count
    Set li = res.Noeuds.Item(nod1.numero).LiensLibresSortant.Item(z)
    If li.AutreNoeud(res.Noeuds.Item(nod1.numero)) Is nod2 Then Exit For
    Next

    copier_un_lien li, trans

    End If
  End If

  End If
  k = k + 1
  Loop
  Close #4

  'Ajout des liens dupliqués à unres
  For k = 1 To res.Liens.Count
  If Not res.Liens.Item(k).copie Is Nothing Then
```

```
If placeliens(unres.Liens, res.Liens.Item(k)) = 0 Then unres.Liens.Add res.Liens.Item(k)
If place(unres.Noeuds, res.Liens.Item(k).Noeud1) = 0 Then unres.Noeuds.Add res.Liens.Item(k).Noeud1
If place(unres.Noeuds, res.Liens.Item(k).Noeud2) = 0 Then unres.Noeuds.Add res.Liens.Item(k).Noeud2
End If
Next

fin:
'Dessiner le reseau trouvé
For k = 1 To unres.Liens.Count
Set li = unres.Liens.Item(k)
With li.Forme.Line
        .ForeColor.RGB = QBColor(2)
        .Weight = xlHairline
End With
Next
Set Rendre_Eulerien = unres
MsgBox "le graphe est Eulerien"

End Function
```

Figure B.13 : Exemple d'interaction entre Excel et AMPL

B.6 Interface de visualisation

L'utilisation du logiciel Microsoft Excel et de son langage de programmation interprété (VBA) permettent d'obtenir rapidement une interface de visualisation des résultats des différents algorithmes ainsi que des propriétés du réseau. La valeur ajoutée procurée par cette interface est de pouvoir permettre une meilleure visualisation lors de la prise de décision.

La figure B.14 présente l'interface développée ainsi que le réseau SIG initialement utilisé.

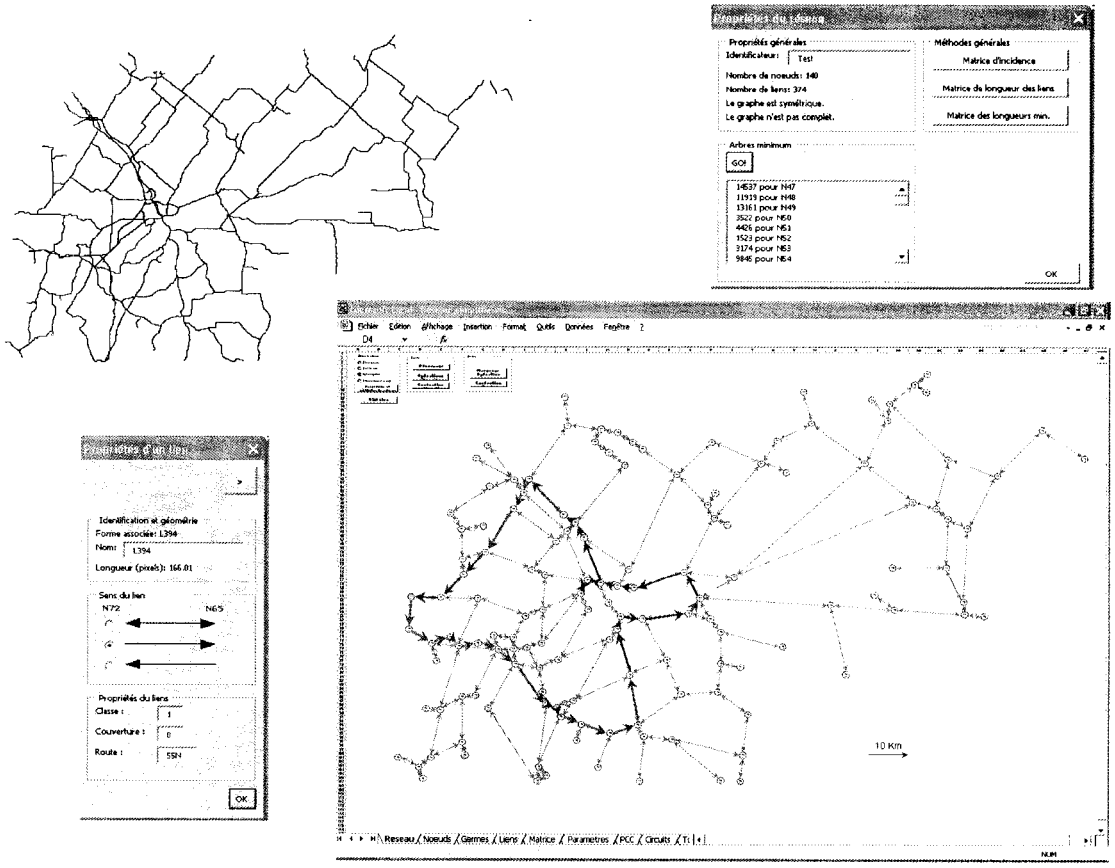


Figure B.14 : Interface de visualisation de l'outil

Initialement développé pour la visualisation de propriétés du réseau (TRÉPANIER, 1999), cet outil a été complété afin d'y intégrer les fonctionnalités reliées à la création et à la visualisation de circuits. Les figures B.15 et B.16 illustre deux interfaces de construction et d'interrogation d'un circuit.

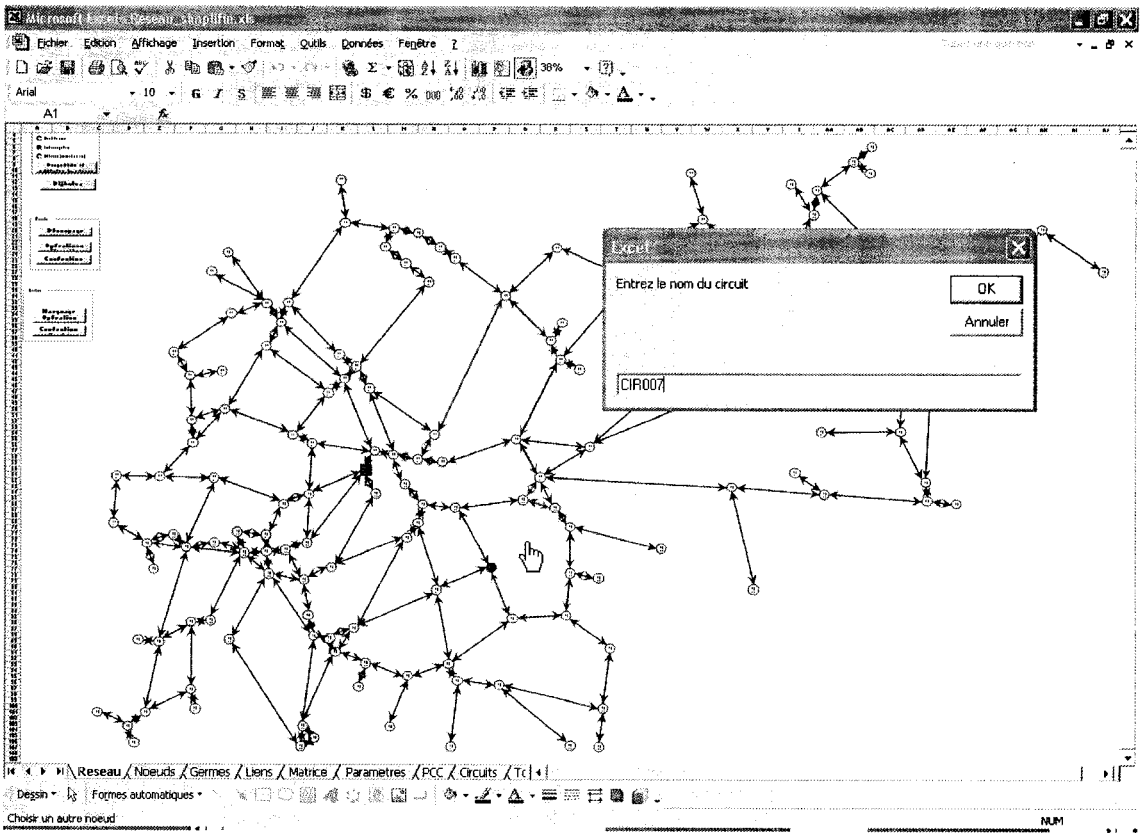


Figure B.15 : Construction dynamique d'un circuit

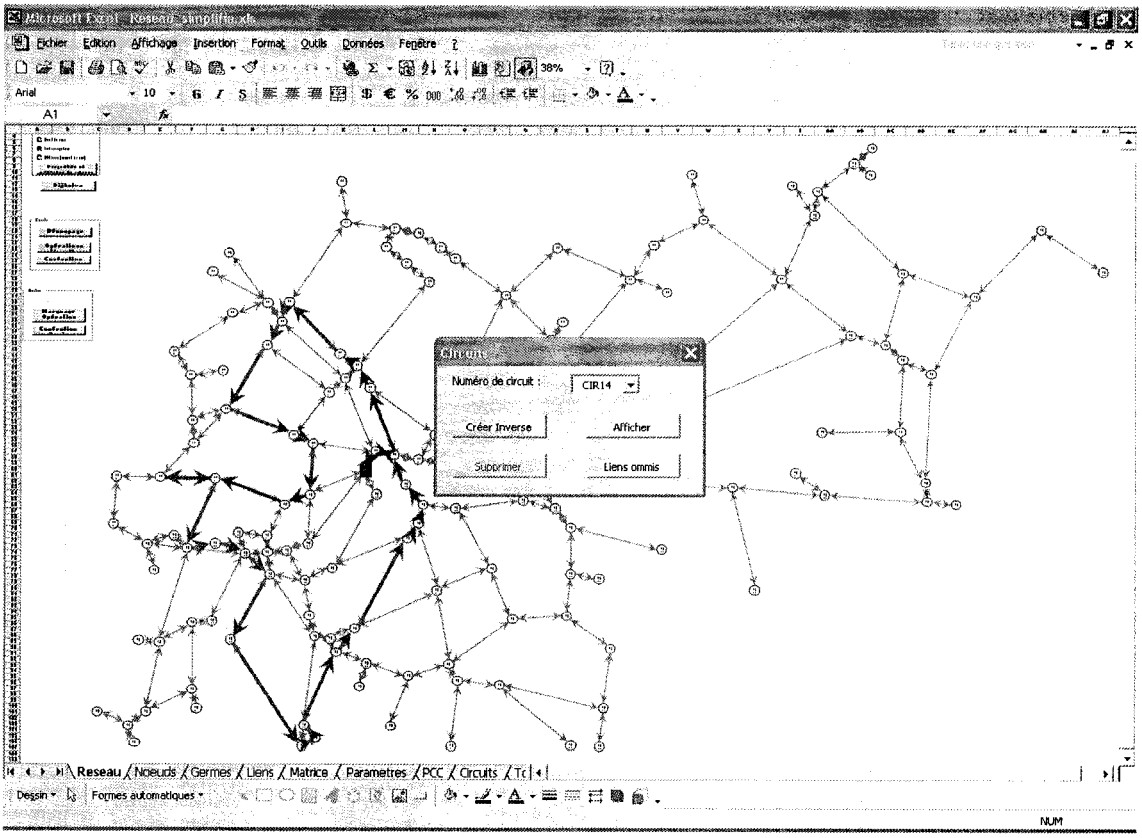


Figure B.16 : Visualisation d'un circuit

B.7 Stockage des données

Les données décrivant le réseau sont stockées dans différentes feuilles de calcul car le logiciel ne maintient pas les objets en mémoire lors de la sauvegarde du classeur. La figure B.17 présente la feuille de données des caractéristiques des liens.

Microsoft Excel - Reseau_simplifie.xls

Fichier Edition Affichage Insertion Format Outils Données Fenêtre ?

A83 L420

	Shape	Noeud1	Noeud2	Nom	Sens	Classe	Couverture	Route
2	L331	N52	N51	L331	1	2	0	243N
3	L332	N51	N52	L332	1	2	0	243S
4	L333	N51	N50	L333	1	2	0	243N
5	L334	N50	N51	L334	1	2	0	243S
6	L335	N50	N49	L335	1	2	0	69492N
7	L336	N49	N50	L336	1	2	0	69492S
8	L337	N49	N48	L337	1	2	0	222W
9	L338	N48	N49	L338	1	2	0	222E
10	L339	N48	N47	L339	1	2	0	222W
11	L340	N47	N48	L340	1	2	0	222E
12	L341	N50	N55	L341	1	2	0	243N
13	L342	N55	N50	L342	1	2	0	243S
14	L343	N54	N53	L343	1	1	0	55N
15	L344	N53	N54	L344	1	1	0	55S
16	L345	N53	N57	L345	1	2	0	116W
17	L346	N57	N53	L346	1	2	1	116E
18	L347	N53	N56	L347	1	1	0	55N
19	L348	N56	N53	L348	1	1	0	55S
20	L351	N58	N59	L351	1	3	0	116E
21	L352	N59	N58	L352	1	3	0	116W
22	L353	N59	N60	L353	1	3	0	116E
23	L354	N60	N59	L354	1	3	0	116W
24	L355	N59	N61	L355	1	3	0	255S
25	L356	N61	N59	L356	1	3	0	255N
26	L357	N61	N62	L357	1	2	0	249S
27	L358	N62	N61	L358	1	2	0	249N
28	L359	N62	N63	L359	1	2	0	249S
29	L360	N63	N62	L360	1	2	0	249N
30	L361	N63	N64	L361	1	2	0	249S
31	L362	N64	N63	L362	1	2	0	249N
32	L365	N67	N58	L365	1	3	0	143N
33	L366	N58	N67	L366	1	3	1	143S
34	L367	N67	N68	L367	1	3	1	143S
35	L368	N68	N67	L368	1	3	0	143N
36	L369	N64	N68	L369	1	2	0	249S
37	L370	N68	N64	L370	1	2	0	249N
38	L371	N68	N65	L371	1	2	0	249S
39	L372	N65	N68	L372	1	2	0	249N
40	L373	N54	N65	L373	1	1	0	55S
41	L374	N65	N54	L374	1	1	0	55N
42	L375	N55	N69	L375	1	2	0	249S

Reseau / Noeuds / Germes / Liens / Matrice / Parametres / PCC / Circuits / Tr

NUM

Figure B.17 : Feuille de données des liens

Cependant, du fait de la particularité de la relation entre les liens (arcs) et les circuits (relation de type plusieurs à plusieurs), ces derniers ont été stockés dans une base de données Microsoft Access. Cette plateforme permet également de faciliter la création des requêtes utiles pour la confection des données des programmes linéaires. La figure B.18 présente le modèle relationnel de données (MRD) complet utilisé dans cette application.

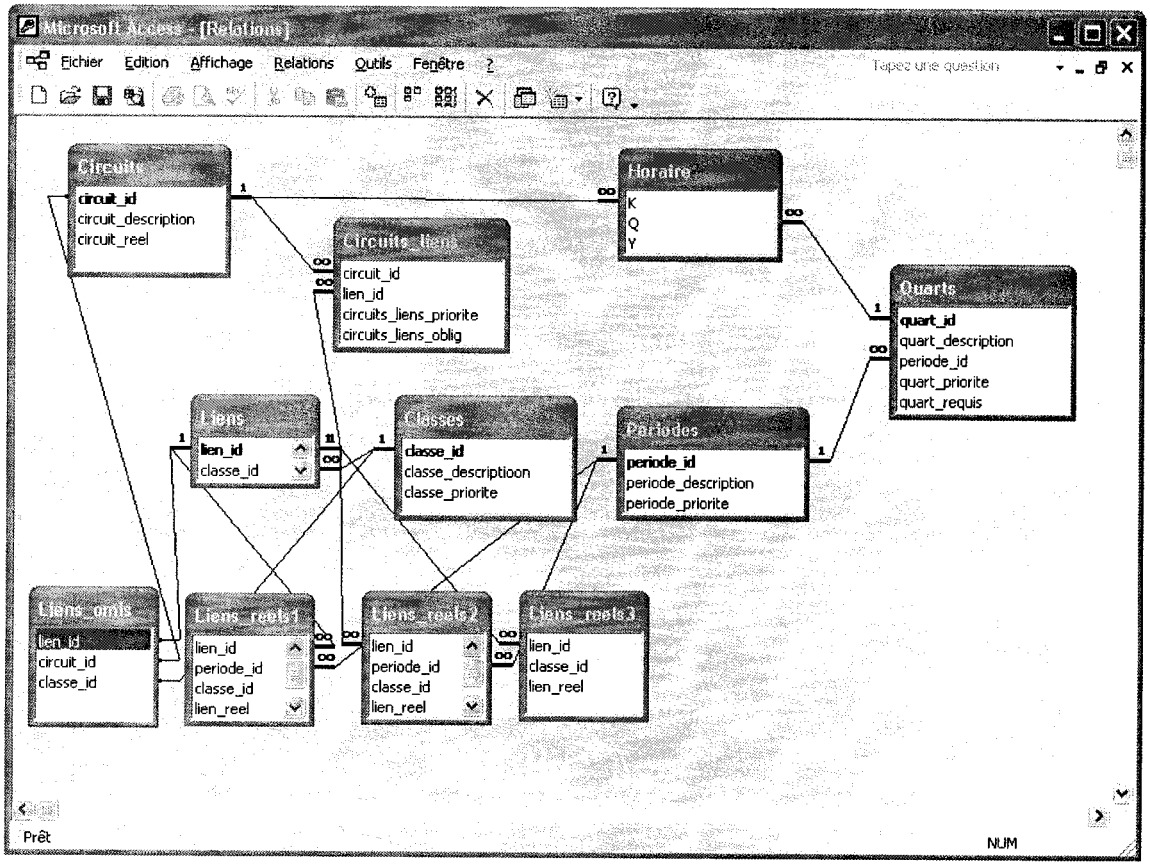


Figure B.18 : Modèle Relationnel de Données Access

Il faut noter que les tables Liens_omis, Liens_reels1, Liens_reels2, Liens_reels3 et Horaire sont des tables de traitement et ne respectent ainsi pas les règles habituelles de design. Ainsi, la table Horaire est la table de sortie servant à recueillir les résultats de la confection d'un horaire. Le nom des champs : K, Q et Y ont été simplifiés afin de coïncider avec les variables du modèle mathématique et ainsi diminuer la complexité des fichiers scripts d'accès aux données.

Bien entendu, lors d'une modification du réseau, une synchronisation de la base de données doit être effectuée.

ANNEXE C : CARACTÉRISTIQUES DU RÉSEAU ET DES CIRCUITS PRÉDÉTERMINÉS

Parmi les quatre méthodes de planification mises en oeuvre dans ce mémoire, la validité de trois d'entre-elles est fortement conditionnée par la nature des circuits prédéterminés. La quatrième méthode est une méthode de construction et dépend ainsi plus de la nature du réseau. L'objet de cette section est de présenter de manière textuelle et graphique les caractéristiques du réseau et des différents circuits employés.

C.1 Un réseau hiérarchisé complètement orienté

Le réseau utilisé pour l'expérimentation des méthodes mathématiques, présenté à la figure C.1, est un réseau complètement orienté du fait de la nécessité de passage sur les deux voies des différentes routes. Le réseau est de plus hiérarchisé afin de tenir compte des différentes exigences en matière de couverture des arcs.

Une caractéristique particulière de ce graphe est d'utiliser plusieurs arcs pour un même tronçon de routes (portion de route entre deux intersections). Cette caractéristique s'inscrit dans l'approche désagrégée privilégiée afin de maintenir le plus d'information possible caractérisant le réseau

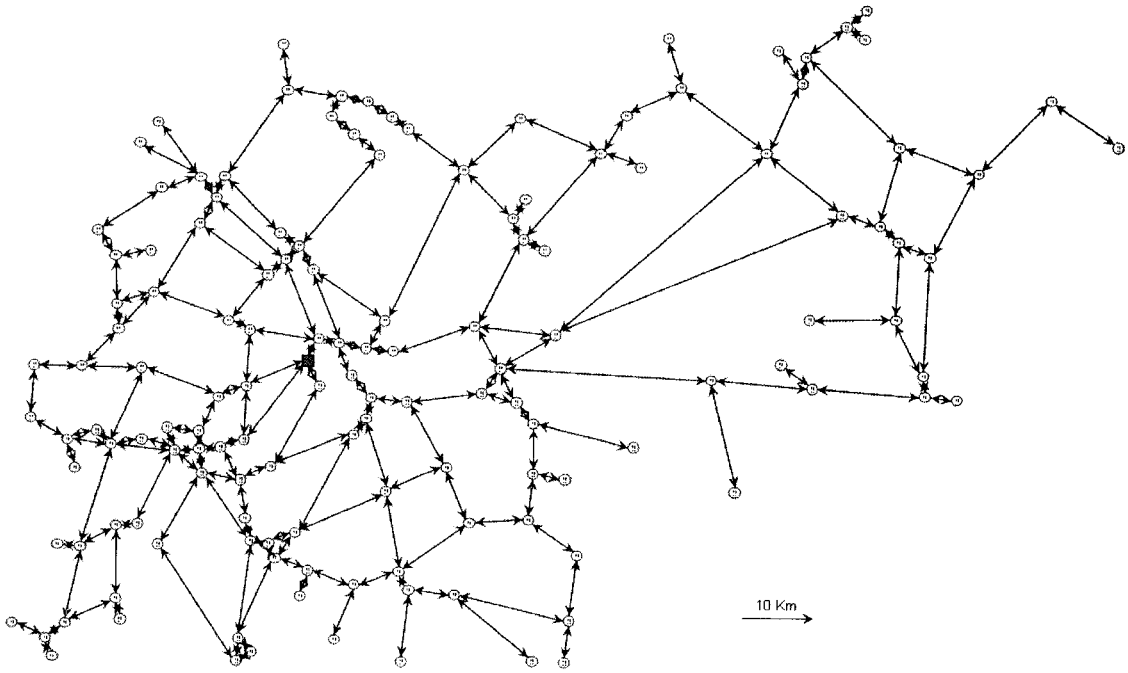


Figure C.1 : Graphe mathématique

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

Tableau C.1 : Caractéristiques des noeuds

ID Nœud	Position X	Position Y	Nom
N47	294	497.25	N47
N48	326.25	547.5	N48
N49	329.25	643.5	N49
N50	332.25	691.5	N50
N51	267	764.25	N51
N52	180	762.75	N52
N53	479.25	391.5	N53
N54	507	432.75	N54
N55	396	619.5	N55
N56	369	324.75	N56
N57	408	414	N57
N58	522	390	N58

ID Nœud	Position X	Position Y	Nom
N59	636	219.75	N59
N60	627	129	N60
N61	733.5	231	N61
N62	716.25	270.75	N62
N63	757.5	306	N63
N64	803.25	345.75	N64
N65	634.5	554.25	N65
N67	624	501.75	N67
N68	658.5	527.25	N68
N69	602.25	584.25	N69
N70	477.75	483.75	N70
N71	531	675	N71
N72	695.25	708.75	N72
N73	825.75	272.25	N73
N74	855	294.75	N74
N76	956.25	375.75	N76
N77	1203.75	340.5	N77
N78	1277.25	369	N78
N79	1058.25	273.75	N79
N80	815.25	673.5	N80
N81	781.5	726.75	N81
N82	732	717	N82
N83	684.75	573.75	N83
N84	570.75	693	N84
N85	1251	267	N85
N86	1350	211.5	N86
N87	1506	339	N87
N88	1326.75	114	N88
N89	1125	699	N89
N90	978	683.25	N90
N91	830.25	732.75	N91
N92	1065.75	511.5	N92
N93	1046.25	471	N93
N94	1068.75	432.75	N94
N95	1104	533.25	N95
N96	1026	765	N96
N97	390	537	N97
N98	373.5	766.5	N98
N99	174	864.75	N99
N100	513	823.5	N100
N101	318.75	917.25	N101
N102	240.75	908.25	N102
N103	255	963.75	N103
N104	239.25	1269.75	N104

ID Nœud	Position X	Position Y	Nom
N105	265.5	1118.25	N105
N106	203.25	1299.75	N106
N107	142.5	1269.75	N107
N108	338.25	1262.25	N108
N109	216.75	1335	N109
N110	224.25	1115.25	N110
N111	329.25	1220.25	N111
N112	434.25	928.5	N112
N113	564.75	802.5	N113
N114	329.25	1077	N114
N116	479.25	925.5	N116
N117	560.25	906.75	N117
N118	421.5	884.25	N118
N119	517.5	922.5	N119
N120	477.75	890.25	N120
N121	367.5	1072.5	N121
N122	548.25	1343.25	N122
N123	405	1113.75	N123
N125	552.75	1298.25	N125
N126	483.75	973.5	N126
N127	573.75	1105.5	N127
N128	563.25	1061.25	N128
N129	609	959.25	N129
N130	606.75	1110.75	N130
N131	618	1140.75	N131
N132	677.25	1164.75	N132
N133	654	1089.75	N133
N134	971.25	1067.25	N134
N135	760.5	895.5	N135
N136	664.5	1214.25	N136
N137	944.25	1210.5	N137
N138	861	1201.5	N138
N139	726.75	1299.75	N139
N140	848.25	1343.25	N140
N141	762	1191.75	N141
N142	843.75	1166.25	N142
N143	1086.75	1340.25	N143
N144	1077.75	1061.25	N144
N145	1166.25	1131	N145
N146	1085.25	970.5	N146
N147	1144.5	1343.25	N147
N148	1152	1260	N148
N149	1143	981.75	N149
N150	819.75	1007.25	N150

ID Nœud	Position X	Position Y	Nom
N151	675.75	751.5	N151
N152	698.25	801	N152
N153	554.25	986.25	N153
N154	929.25	959.25	N154
N155	756	779.25	N155
N156	783	863.25	N156
N158	791.25	823.5	N158
N159	1409.25	785.25	N159
N160	1535.25	753.75	N160
N161	991.5	813.75	N161
N162	1267.5	918	N162
N163	856.5	830.25	N163
N164	1085.25	873	N164
N165	1452.75	1005	N165
N166	1593	801	N166
N167	1644.75	460.5	N167
N168	1055.25	830.25	N168
N169	1749	326.25	N169
N170	1526.25	136.5	N170
N171	1714.5	480.75	N171
N172	1577.25	149.25	N172
N173	2145.75	323.25	N173
N174	1571.25	201.75	N174
N175	1892.25	377.25	N175
N176	2024.25	232.5	N176
N177	1650.75	89.25	N177
N178	1683.75	114	N178
N179	1686.75	57	N179
N180	1587	667.5	N180
N181	1797.75	815.25	N181
N183	1855.5	822	N183
N185	1805.25	543	N185
N186	1794.75	774	N186
N187	1744.5	666	N187
N189	1749	513	N189
N190	781.5	241.5	N190
N193	375	906.75	N193
N194	294	890.25	N194
N197	402	283.5	N197
N198	576.75	1325.25	N198

Tableau C.2 : Caractéristiques des liens (arcs)

Shape	Noeud1	Noeud2	Nom	Sens	Classe	Couverture	Route
L331	N52	N51	L331	1	2	0	243N
L332	N51	N52	L332	1	2	0	243S
L333	N51	N50	L333	1	2	0	243N
L334	N50	N51	L334	1	2	0	243S
L335	N50	N49	L335	1	2	0	69492N
L336	N49	N50	L336	1	2	0	69492S
L337	N49	N48	L337	1	2	0	222W
L338	N48	N49	L338	1	2	0	222E
L339	N48	N47	L339	1	2	0	222W
L340	N47	N48	L340	1	2	0	222E
L341	N50	N55	L341	1	2	0	243N
L342	N55	N50	L342	1	2	0	243S
L343	N54	N53	L343	1	1	0	55N
L344	N53	N54	L344	1	1	0	55S
L345	N53	N57	L345	1	2	0	116W
L346	N57	N53	L346	1	2	1	116E
L347	N53	N56	L347	1	1	0	55N
L348	N56	N53	L348	1	1	0	55S
L351	N58	N59	L351	1	3	0	116E
L352	N59	N58	L352	1	3	0	116W
L353	N59	N60	L353	1	3	0	116E
L354	N60	N59	L354	1	3	0	116W
L355	N59	N61	L355	1	3	0	255S
L356	N61	N59	L356	1	3	0	255N
L357	N61	N62	L357	1	2	0	249S
L358	N62	N61	L358	1	2	0	249N
L359	N62	N63	L359	1	2	0	249S
L360	N63	N62	L360	1	2	0	249N
L361	N63	N64	L361	1	2	0	249S
L362	N64	N63	L362	1	2	0	249N
L365	N67	N58	L365	1	3	0	143N
L366	N58	N67	L366	1	3	1	143S
L367	N67	N68	L367	1	3	1	143S
L368	N68	N67	L368	1	3	0	143N
L369	N64	N68	L369	1	2	0	249S
L370	N68	N64	L370	1	2	0	249N
L371	N68	N65	L371	1	2	0	249S
L372	N65	N68	L372	1	2	0	249N
L373	N54	N65	L373	1	1	0	55S
L374	N65	N54	L374	1	1	0	55N
L375	N65	N69	L375	1	2	0	249S
L376	N69	N65	L376	1	2	0	249N

Shape	Noeud1	Noeud2	Nom	Sens	Classe	Couverture	Route
L377	N70	N69	L377	1	3	0	63410E
L378	N69	N70	L378	1	3	0	73410W
L379	N55	N71	L379	1	2	0	222E
L380	N71	N55	L380	1	2	0	222W
L381	N69	N71	L381	1	2	0	249S
L382	N71	N69	L382	1	2	0	249N
L385	N73	N74	L385	1	2	0	216W
L386	N74	N73	L386	1	2	0	216E
L389	N68	N83	L389	1	3	1	143S
L390	N83	N68	L390	1	3	0	143N
L391	N83	N82	L391	1	3	1	143S
L392	N82	N83	L392	1	3	0	143N
L393	N65	N72	L393	1	1	0	55S
L394	N72	N65	L394	1	1	0	55N
L395	N71	N84	L395	1	3	0	222E
L396	N84	N71	L396	1	3	0	222W
L397	N84	N72	L397	1	3	0	222E
L398	N72	N84	L398	1	3	0	222W
L399	N72	N82	L399	1	1	0	10E
L400	N82	N72	L400	1	1	0	10W
L401	N82	N81	L401	1	1	0	10E
L402	N81	N82	L402	1	1	0	10W
L403	N83	N80	L403	1	3	0	75820W
L404	N80	N83	L404	1	3	0	75820E
L405	N74	N76	L405	1	2	0	216W
L406	N76	N74	L406	1	2	0	216E
L407	N76	N80	L407	1	3	0	216W
L408	N80	N76	L408	1	3	0	216E
L409	N80	N81	L409	1	3	0	216W
L410	N81	N80	L410	1	3	0	216E
L411	N76	N79	L411	1	3	0	77511N
L412	N79	N76	L412	1	3	0	77511S
L413	N79	N77	L413	1	3	0	257S
L414	N77	N79	L414	1	3	0	257N
L415	N77	N78	L415	1	3	0	83760W
L416	N78	N77	L416	1	3	0	83760E
L417	N77	N85	L417	1	2	0	112E
L418	N85	N77	L418	1	2	0	112W
L419	N85	N86	L419	1	2	0	161S
L420	N86	N85	L420	1	2	0	161N
L421	N86	N87	L421	1	2	0	161S
L422	N87	N86	L422	1	2	0	161N
L423	N88	N86	L423	1	3	0	83600W
L424	N86	N88	L424	1	3	0	83600E

Shape	Noeud1	Noeud2	Nom	Sens	Classe	Couverture	Route
L425	N81	N91	L425	1	1	0	10E
L426	N91	N81	L426	1	1	0	10W
L427	N91	N90	L427	1	2	0	112E
L428	N90	N91	L428	1	2	0	112W
L429	N77	N92	L429	1	2	0	112W
L430	N92	N77	L430	1	2	0	112E
L431	N92	N93	L431	1	2	0	255N
L432	N93	N92	L432	1	2	0	255S
L433	N93	N76	L433	1	2	0	255N
L434	N76	N93	L434	1	2	0	255S
L435	N93	N94	L435	1	3	0	80622W
L436	N94	N93	L436	1	3	0	80622E
L437	N92	N95	L437	1	3	0	255S
L438	N95	N92	L438	1	3	0	255N
L439	N87	N89	L439	1	2	0	108W
L440	N89	N87	L440	1	2	0	108E
L441	N92	N90	L441	1	2	0	112W
L442	N90	N92	L442	1	2	0	112E
L443	N90	N89	L443	1	3	0	214E
L444	N89	N90	L444	1	3	0	214W
L445	N89	N96	L445	1	2	0	108W
L446	N96	N89	L446	1	2	0	108E
L447	N90	N96	L447	1	2	0	253S
L448	N96	N90	L448	1	2	0	253N
L449	N97	N48	L449	1	3	0	73340W
L450	N48	N97	L450	1	3	0	73340E
L451	N107	N106	L451	1	3	0	67330E
L452	N106	N107	L452	1	3	0	67330W
L453	N106	N109	L453	1	3	0	243S
L454	N109	N106	L454	1	3	0	243N
L455	N106	N104	L455	1	3	0	243N
L456	N104	N106	L456	1	3	0	243S
L457	N104	N111	L457	1	3	0	67320E
L458	N111	N104	L458	1	3	0	67320W
L459	N111	N108	L459	1	3	0	68465S
L460	N108	N111	L460	1	3	0	68465N
L463	N110	N105	L463	1	3	0	243S
L464	N105	N110	L464	1	3	0	243N
L465	N105	N104	L465	1	3	0	243S
L466	N104	N105	L466	1	3	0	243N
L467	N102	N101	L467	1	1	0	10E
L468	N101	N102	L468	1	1	0	10W
L469	N99	N102	L469	1	2	0	112E
L470	N102	N99	L470	1	2	0	112W

Shape	Noeud1	Noeud2	Nom	Sens	Classe	Couverture	Route
L471	N102	N103	L471	1	3	0	68741S
L472	N103	N102	L472	1	3	0	68741N
L473	N111	N114	L473	1	3	0	68480E
L474	N114	N111	L474	1	3	0	68480W
L475	N114	N121	L475	1	3	0	68730E
L476	N121	N114	L476	1	3	0	68730E
L477	N121	N112	L477	1	3	0	68730E
L478	N112	N121	L478	1	3	0	68730E
L479	N112	N118	L479	1	3	0	141S
L480	N118	N112	L480	1	3	0	141N
L481	N118	N120	L481	1	3	0	141S
L482	N120	N118	L482	1	3	0	141N
L483	N51	N98	L483	1	3	0	220E
L484	N98	N51	L484	1	3	0	220W
L485	N98	N101	L485	1	3	0	69330W
L486	N101	N98	L486	1	3	0	69330E
L487	N98	N100	L487	1	3	0	220E
L488	N100	N98	L488	1	3	0	220W
L489	N100	N113	L489	1	3	0	220E
L490	N113	N100	L490	1	3	0	220W
L491	N84	N113	L491	1	3	0	249S
L492	N113	N84	L492	1	3	0	249N
L493	N113	N117	L493	1	3	0	249S
L494	N117	N113	L494	1	3	0	249N
L495	N112	N116	L495	1	1	0	10E
L496	N116	N112	L496	1	1	0	10W
L497	N116	N119	L497	1	1	0	10E
L498	N119	N116	L498	1	1	0	10W
L499	N119	N117	L499	1	1	0	10E
L500	N117	N119	L500	1	1	0	10W
L501	N116	N126	L501	1	3	0	141S
L502	N126	N116	L502	1	3	0	141N
L503	N112	N126	L503	1	2	0	112E
L504	N126	N112	L504	1	2	0	112W
L507	N126	N123	L507	1	3	0	247S
L508	N123	N126	L508	1	3	0	247N
L509	N123	N122	L509	1	3	0	247S
L510	N122	N123	L510	1	3	0	247N
L511	N122	N125	L511	1	1	0	55N
L512	N125	N122	L512	1	1	0	55S
L513	N125	N127	L513	1	1	0	55N
L514	N127	N125	L514	1	1	0	55S
L515	N127	N128	L515	1	1	0	55N
L516	N128	N127	L516	1	1	0	55S

Shape	Noeud1	Noeud2	Nom	Sens	Classe	Couverture	Route
L517	N126	N127	L517	1	3	0	141S
L518	N127	N126	L518	1	3	0	141N
L519	N117	N151	L519	1	1	0	10E
L520	N151	N117	L520	1	1	0	10W
L523	N126	N153	L523	1	3	0	108E
L524	N153	N126	L524	1	3	0	108W
L525	N119	N153	L525	1	1	0	55S
L526	N153	N119	L526	1	1	0	55N
L527	N153	N129	L527	1	3	0	108E
L528	N129	N153	L528	1	3	0	108W
L529	N128	N153	L529	1	1	0	55N
L530	N153	N128	L530	1	1	0	55S
L531	N130	N127	L531	1	2	0	141N
L532	N127	N130	L532	1	2	0	141S
L533	N131	N130	L533	1	2	0	141N
L534	N130	N131	L534	1	2	0	141S
L535	N125	N131	L535	1	3	0	143N
L536	N131	N125	L536	1	3	0	143S
L537	N130	N133	L537	1	3	0	208E
L538	N133	N130	L538	1	3	0	208W
L539	N131	N133	L539	1	3	0	143N
L540	N133	N131	L540	1	3	0	143S
L541	N133	N135	L541	1	3	0	143N
L542	N135	N133	L542	1	3	0	143S
L543	N129	N135	L543	1	3	0	108E
L544	N135	N129	L544	1	3	0	108W
L545	N129	N152	L545	1	3	0	216E
L546	N152	N129	L546	1	3	0	216W
L547	N131	N132	L547	1	2	0	141S
L548	N132	N131	L548	1	2	0	141N
L549	N136	N132	L549	1	3	0	67880W
L550	N132	N136	L550	1	3	0	67880W
L551	N132	N141	L551	1	2	0	141S
L552	N141	N132	L552	1	2	0	141N
L553	N139	N141	L553	1	3	0	74462W
L554	N141	N139	L554	1	3	0	74462E
L555	N141	N142	L555	1	2	0	141S
L556	N142	N141	L556	1	2	0	141N
L557	N142	N138	L557	1	2	0	141S
L558	N138	N142	L558	1	2	0	141N
L559	N138	N140	L559	1	2	0	147S
L560	N140	N138	L560	1	2	0	147N
L561	N138	N137	L561	1	3	0	141S
L562	N137	N138	L562	1	3	0	141N

Shape	Noeud1	Noeud2	Nom	Sens	Classe	Couverture	Route
L563	N137	N148	L563	1	3	0	74931S
L564	N148	N137	L564	1	3	0	74931N
L565	N137	N143	L565	1	3	0	141S
L566	N143	N137	L566	1	3	0	141N
L567	N147	N148	L567	1	3	0	253N
L568	N148	N147	L568	1	3	0	253S
L569	N148	N145	L569	1	3	0	253N
L570	N145	N148	L570	1	3	0	253S
L571	N145	N144	L571	1	3	0	253N
L572	N144	N145	L572	1	3	0	253S
L573	N144	N134	L573	1	3	0	206W
L574	N134	N144	L574	1	3	0	206E
L575	N134	N142	L575	1	3	0	206W
L576	N142	N134	L576	1	3	0	206E
L577	N133	N150	L577	1	3	0	208E
L578	N150	N133	L578	1	3	0	208W
L579	N142	N150	L579	1	2	0	147N
L580	N150	N142	L580	1	2	0	147S
L581	N82	N155	L581	1	3	1	143S
L582	N155	N82	L582	1	3	0	143N
L585	N152	N151	L585	1	1	0	410W
L586	N151	N152	L586	1	1	0	410E
L587	N155	N158	L587	1	2	0	143S
L588	N158	N155	L588	1	2	0	143N
L589	N158	N156	L589	1	2	0	108W
L590	N156	N158	L590	1	2	0	108E
L591	N156	N135	L591	1	2	0	108W
L592	N135	N156	L592	1	2	0	108E
L593	N156	N150	L593	1	2	0	147S
L594	N150	N156	L594	1	2	0	147N
L595	N150	N154	L595	1	3	0	208E
L596	N154	N150	L596	1	3	0	208W
L597	N154	N134	L597	1	3	0	251S
L598	N134	N154	L598	1	3	0	251N
L599	N146	N144	L599	1	3	0	253S
L600	N144	N146	L600	1	3	0	253N
L601	N146	N149	L601	1	3	0	76851S
L602	N149	N146	L602	1	3	0	76851N
L603	N72	N151	L603	1	1	0	10W
L604	N151	N72	L604	1	1	0	10E
L605	N151	N113	L605	1	3	0	220W
L606	N113	N151	L606	1	3	0	220E
L607	N146	N164	L607	1	3	0	253N
L608	N164	N146	L608	1	3	0	253S

Shape	Noeud1	Noeud2	Nom	Sens	Classe	Couverture	Route
L609	N164	N162	L609	1	3	0	210E
L610	N162	N164	L610	1	3	0	210W
L611	N164	N168	L611	1	3	0	253N
L612	N168	N164	L612	1	3	0	253S
L613	N168	N161	L613	1	3	0	210W
L614	N161	N168	L614	1	3	0	210E
L615	N161	N163	L615	1	2	0	108W
L616	N163	N161	L616	1	2	0	108E
L617	N163	N158	L617	1	2	0	108W
L618	N158	N163	L618	1	2	0	108E
L625	N161	N96	L625	1	2	0	108E
L626	N96	N161	L626	1	2	0	108W
L627	N168	N96	L627	1	3	0	253N
L628	N96	N168	L628	1	3	0	253S
L629	N96	N159	L629	1	2	0	212E
L630	N159	N96	L630	1	2	0	212W
L631	N159	N165	L631	1	3	0	257S
L632	N165	N159	L632	1	3	0	257N
L633	N166	N160	L633	1	3	0	84240W
L634	N160	N166	L634	1	3	0	84240E
L635	N159	N166	L635	1	2	0	212E
L636	N166	N159	L636	1	2	0	212W
L637	N89	N167	L637	1	3	0	214E
L638	N167	N89	L638	1	3	0	214W
L639	N87	N167	L639	1	2	0	161S
L640	N167	N87	L640	1	2	0	161N
L641	N87	N174	L641	1	2	0	108E
L642	N174	N87	L642	1	2	0	108W
L643	N174	N172	L643	1	2	0	108E
L644	N172	N174	L644	1	2	0	108W
L645	N172	N177	L645	1	2	0	108E
L646	N177	N172	L646	1	2	0	108W
L647	N177	N178	L647	1	3	0	84690E
L648	N178	N177	L648	1	3	0	84690W
L649	N177	N179	L649	1	2	0	108E
L650	N179	N177	L650	1	2	0	108W
L651	N174	N170	L651	1	3	0	263N
L652	N170	N174	L652	1	3	0	263S
L653	N172	N169	L653	1	3	0	263S
L654	N169	N172	L654	1	3	0	263N
L655	N169	N175	L655	1	3	0	84782E
L656	N175	N169	L656	1	3	0	84782W
L657	N175	N176	L657	1	2	0	240E
L658	N176	N175	L658	1	2	0	204W

Shape	Noeud1	Noeud2	Nom	Sens	Classe	Couverture	Route
L659	N176	N173	L659	1	2	0	240E
L660	N173	N176	L660	1	2	0	204W
L661	N175	N185	L661	1	2	0	204W
L662	N185	N175	L662	1	2	0	240E
L663	N167	N171	L663	1	2	0	161S
L664	N171	N167	L664	1	2	0	161N
L665	N171	N189	L665	1	2	0	161S
L666	N189	N171	L666	1	2	0	161N
L667	N189	N185	L667	1	2	0	161S
L668	N185	N189	L668	1	2	0	161N
L669	N189	N187	L669	1	3	0	263S
L670	N187	N189	L670	1	3	0	263N
L671	N187	N186	L671	1	3	0	263S
L672	N186	N187	L672	1	3	0	263N
L673	N186	N181	L673	1	2	0	161S
L674	N181	N186	L674	1	2	0	161N
L675	N181	N183	L675	1	2	0	161S
L676	N183	N181	L676	1	2	0	161N
L677	N185	N186	L677	1	2	0	161S
L678	N186	N185	L678	1	2	0	161N
L679	N187	N180	L679	1	3	0	83970W
L680	N180	N187	L680	1	3	0	83970E
L681	N166	N181	L681	1	2	0	212E
L682	N181	N166	L682	1	2	0	212W
L683	N169	N171	L683	1	3	0	263S
L684	N171	N169	L684	1	3	0	263N
L689	N61	N190	L689	1	2	0	255S
L690	N190	N61	L690	1	2	0	255N
L691	N190	N73	L691	1	2	0	255S
L692	N73	N190	L692	1	2	0	255N
L695	N102	N194	L695	1	2	0	112E
L696	N194	N102	L696	1	2	0	112W
L697	N194	N101	L697	1	2	0	112E
L698	N101	N194	L698	1	2	0	112W
L699	N101	N193	L699	1	2	0	112E
L700	N193	N101	L700	1	2	0	112W
L701	N193	N112	L701	1	2	0	112E
L702	N112	N193	L702	1	2	0	112W
L703	N197	N53	L703	1	3	0	143S
L704	N53	N197	L704	1	3	0	143N
L705	N58	N54	L705	1	3	0	243S
L706	N54	N58	L706	1	3	0	243N
L707	N101	N112	L707	1	1	0	10E
L708	N112	N101	L708	1	1	0	10W

Shape	Noeud1	Noeud2	Nom	Sens	Classe	Couverture	Route
L709	N122	N198	L709	1	3	0	143N
L710	N198	N122	L710	1	3	0	143S
L711	N198	N125	L711	1	3	0	143N
L712	N125	N198	L712	1	3	0	143S
L713	N54	N70	L713	1	2	0	243S
L714	N70	N54	L714	1	2	0	243N
L715	N70	N55	L715	1	2	0	243S
L716	N55	N70	L716	1	2	0	243N
L720	N105	N101	L720	1	3	0	245N
L721	N101	N105	L721	1	3	0	245S
L723	N116	N120	L723	1	3	0	141N
L724	N120	N116	L724	1	3	0	141S
L727	N120	N100	L727	1	3	0	68460W
L728	N100	N120	L728	1	3	0	68460W
L729	N49	N55	L729	1	2	0	222E
L730	N55	N49	L730	1	2	0	222W
L732	N163	N154	L732	1	3	0	251S
L733	N154	N163	L733	1	3	0	251N
L735	N52	N99	L735	1	2	0	10001S
L736	N99	N52	L736	1	2	0	10001N
L738	N114	N105	L738	1	3	0	68730E
L739	N105	N114	L739	1	3	0	68730E
L741	N57	N47	L741	1	2	0	116W
L742	N47	N57	L742	1	2	1	116E

La hiérarchie du réseau 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. Les figures C.2, C.3 et C.4 illustrent la répartition des différentes classes d'arcs.

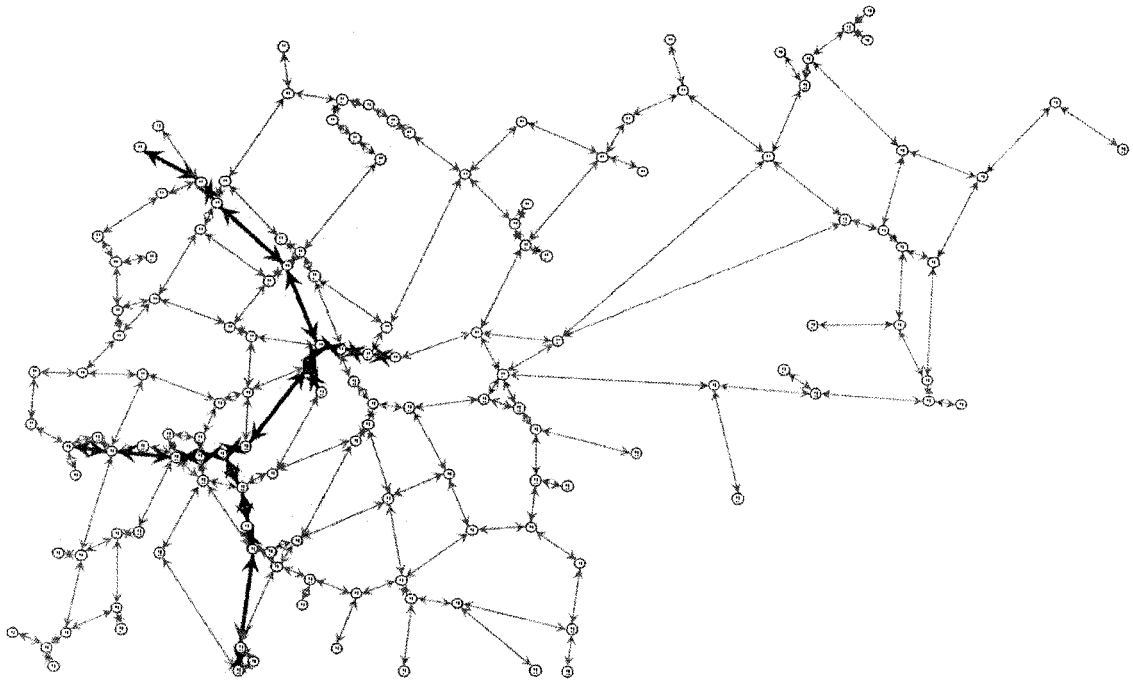


Figure C.2 : Répartition des arcs de classe 1

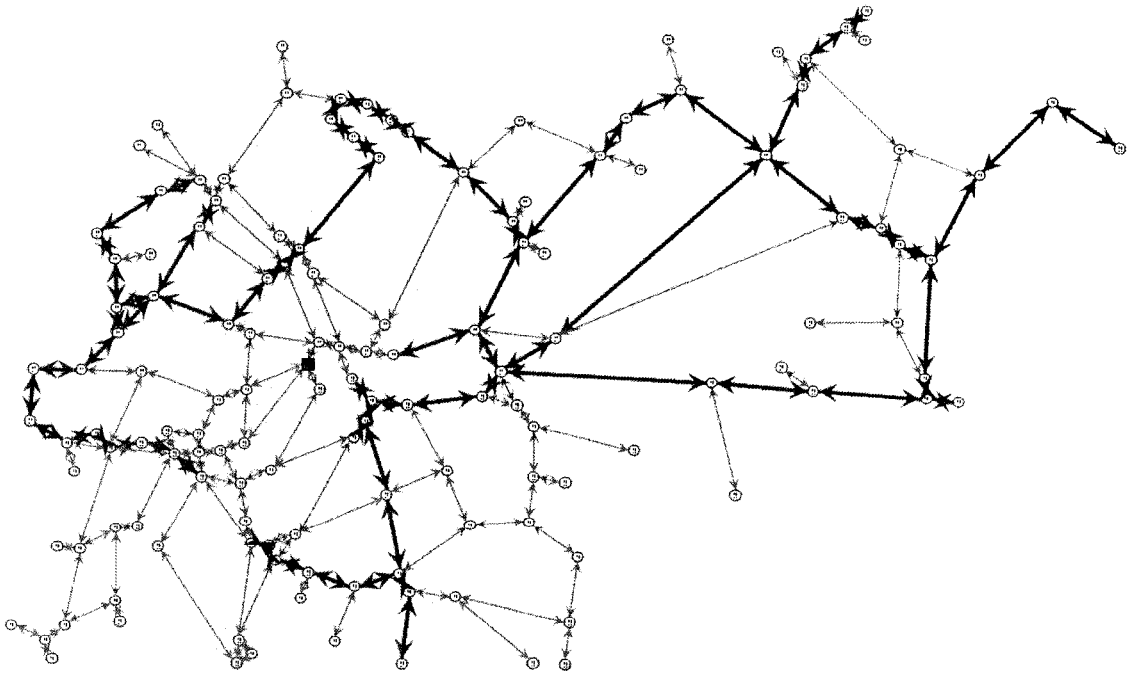


Figure C.3 : Répartition des arcs de classe 2

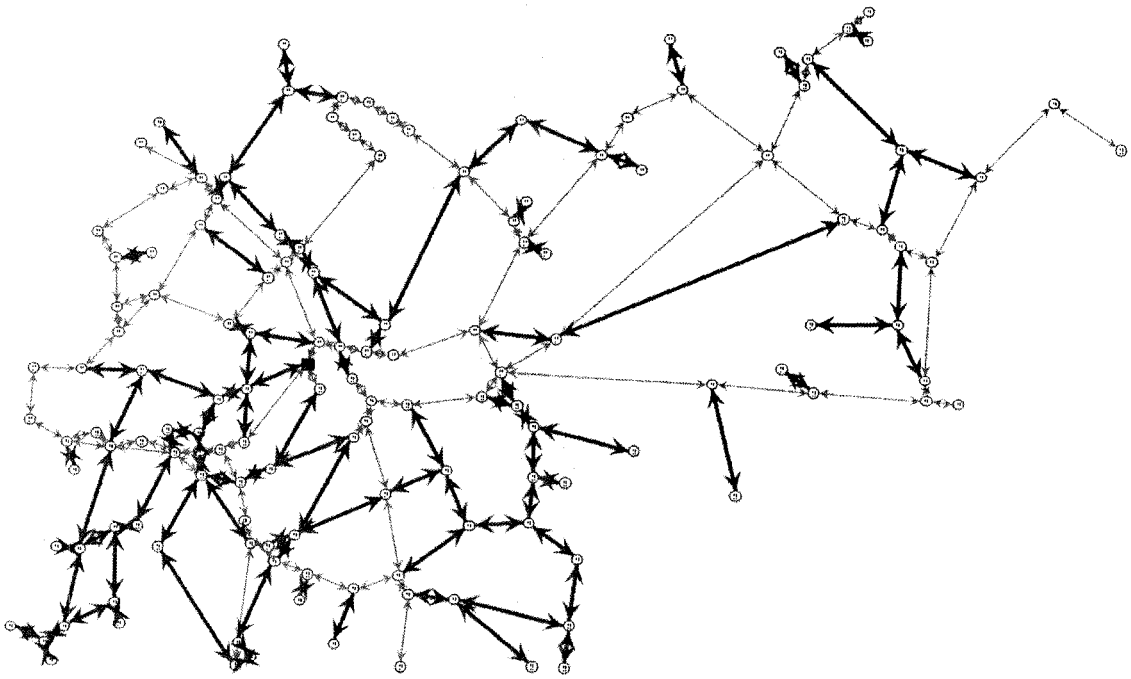


Figure C.4 : Répartition des arcs de classe 3

C.2 Circuits prédéterminés

Les trois premières méthodes de résolution sont basées sur l'utilisation de circuits prédéterminés. Ces circuits ont été construits manuellement et leur confection est basée sur l'expérience des patrouilleurs et des répartiteurs.

Les figures C.5 à C.26 présentent graphiquement les 22 circuits utilisés. Les circuits parcourus en sens inverse ne seront pas représentés mais sont utilisés dans les méthodes de résolution. Les numéros de circuits ne sont pas consécutifs.

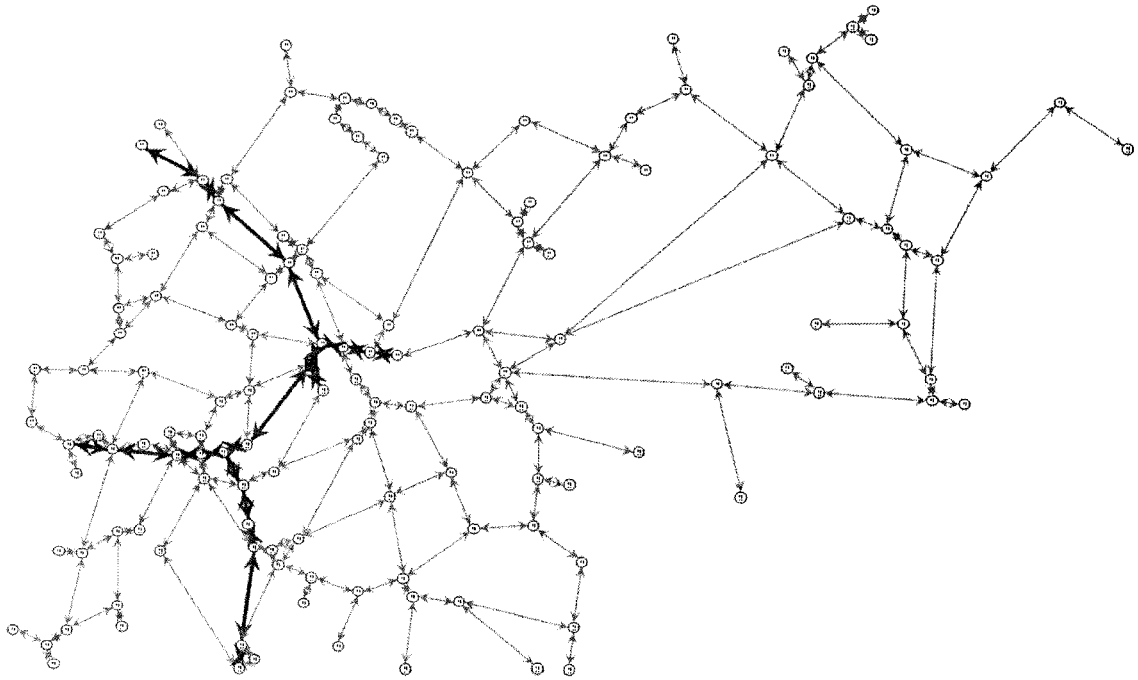


Figure C.5 : Circuit 1

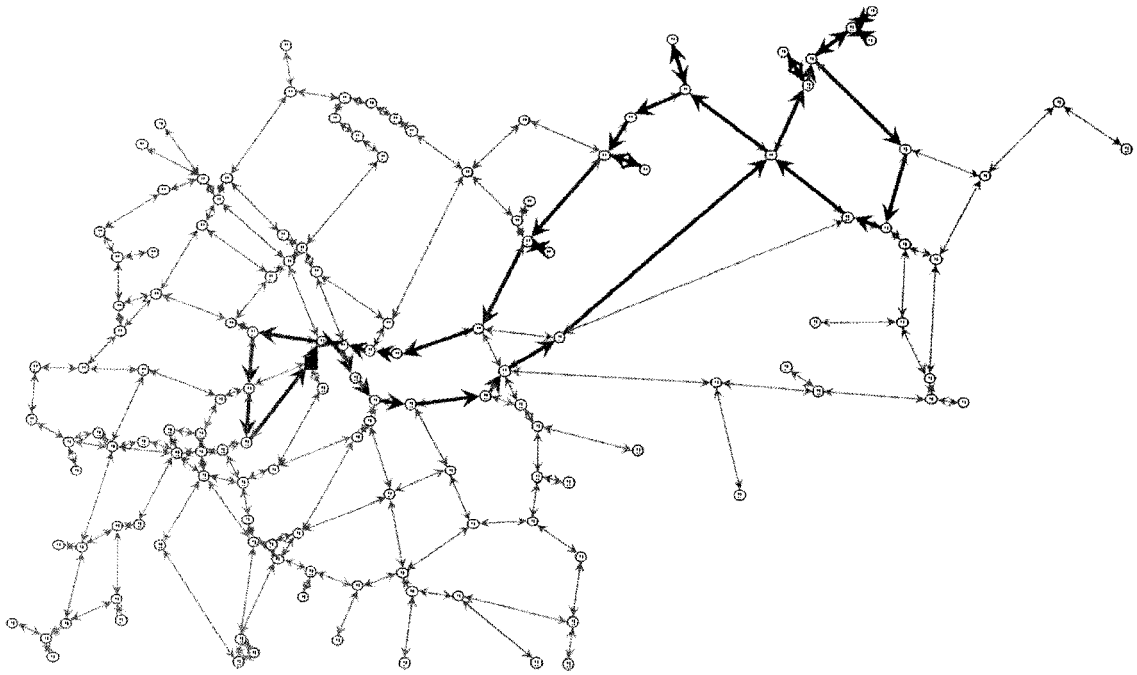


Figure C.6 : Circuit 2

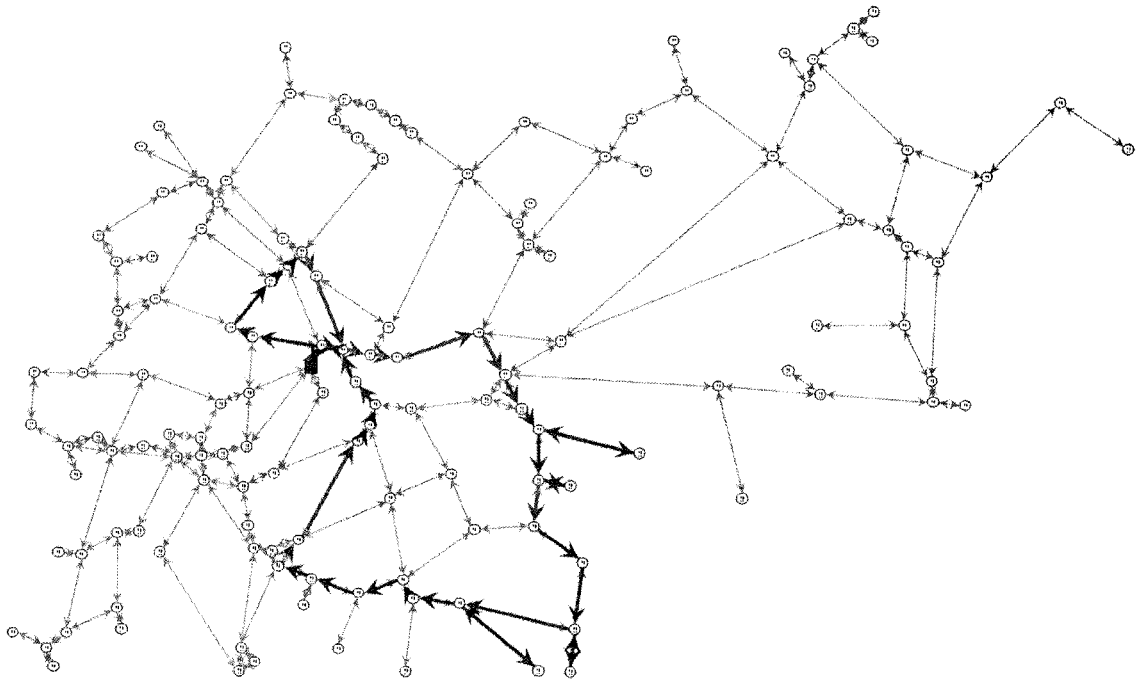


Figure C.7 : Circuit 4

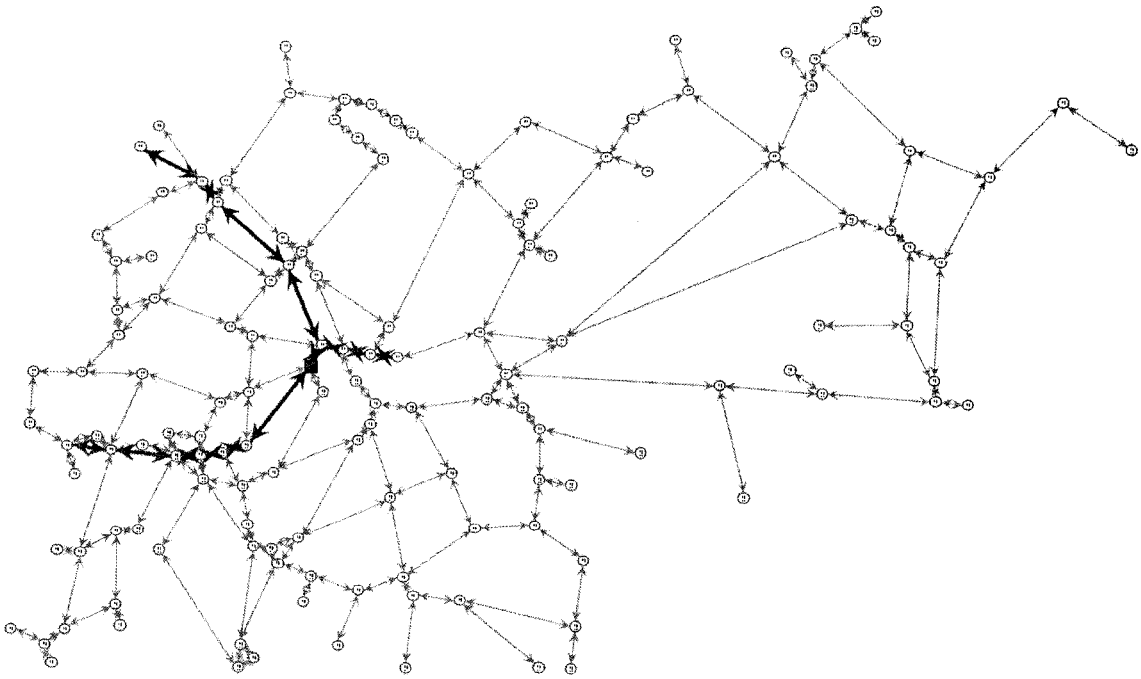


Figure C.8 : Circuit 5

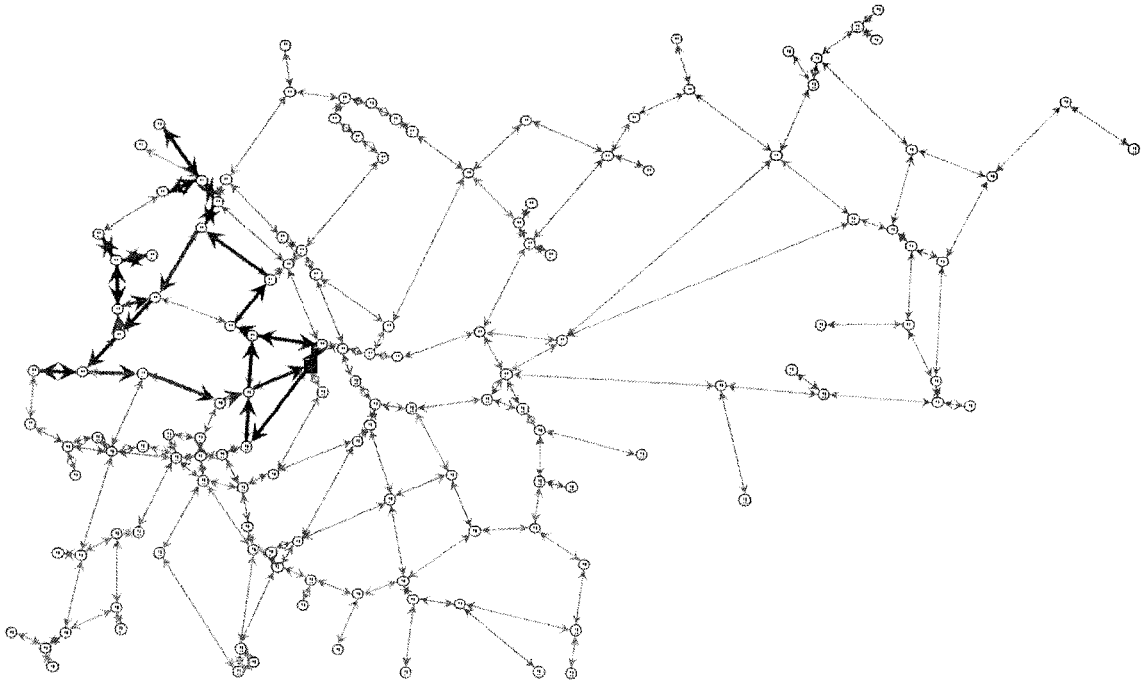


Figure C.9 : Circuit 6

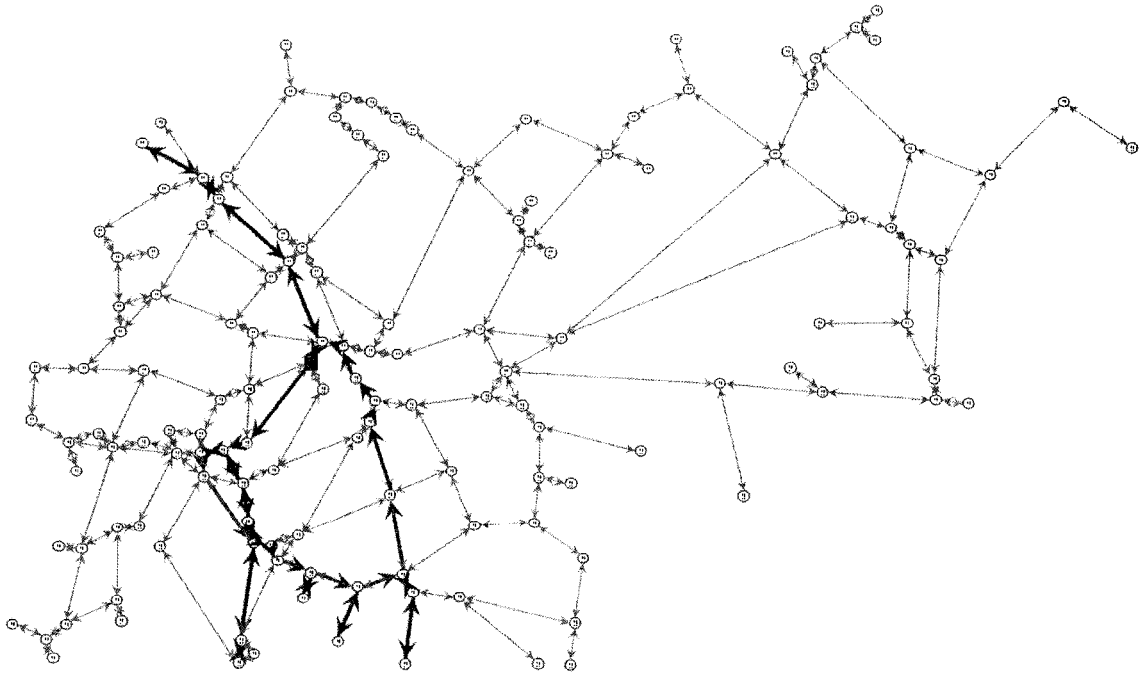


Figure C.10 : Circuit 7

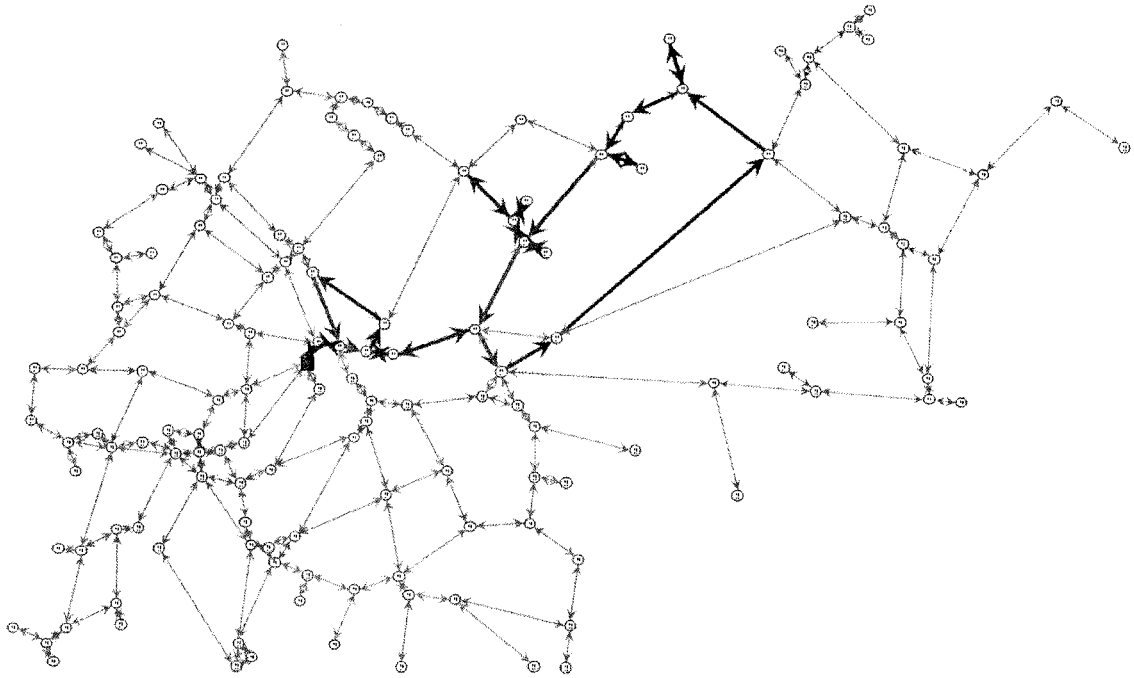


Figure C.11 : Circuit 8

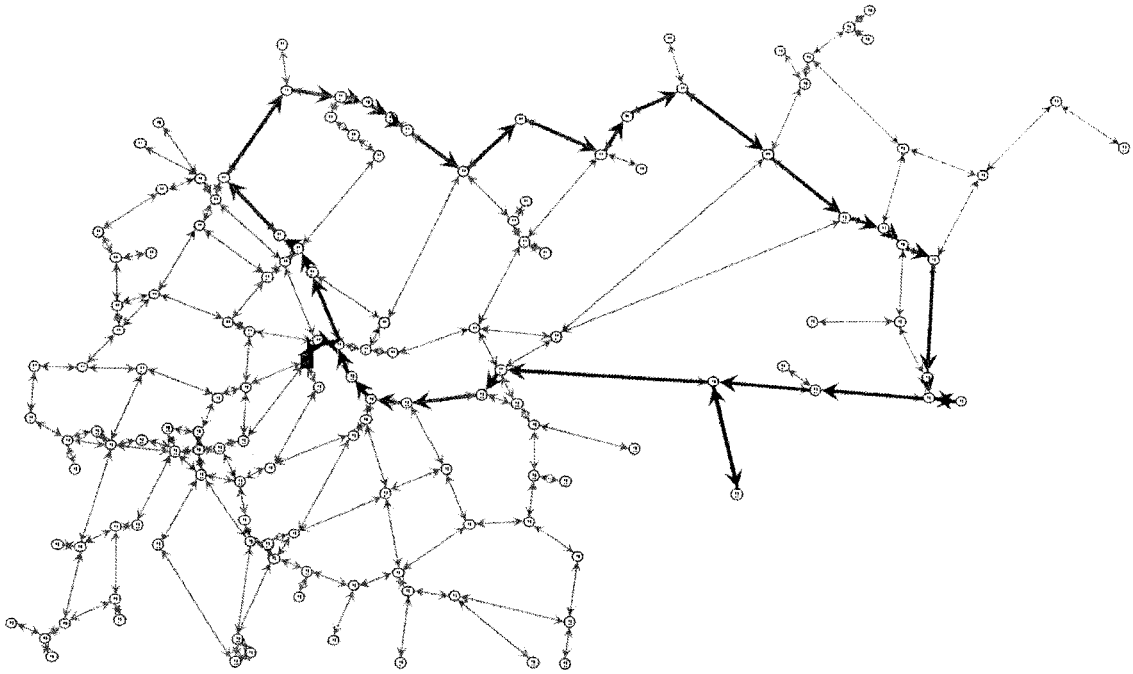


Figure C.12 : Circuit 9

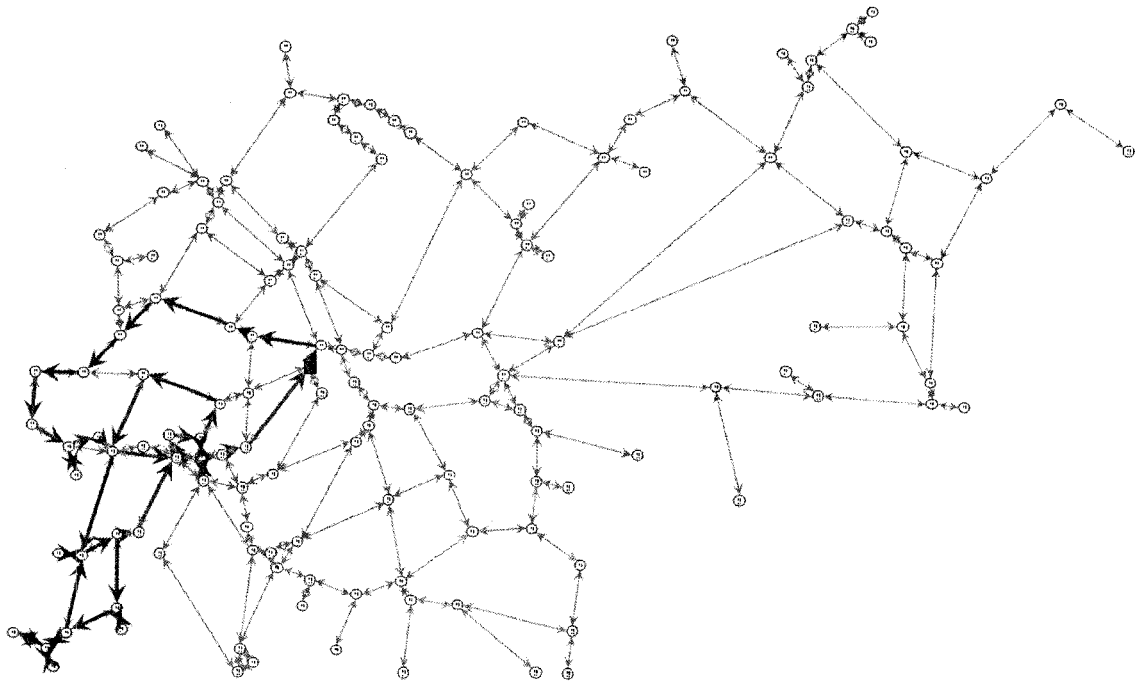


Figure C.13 : Circuit 10

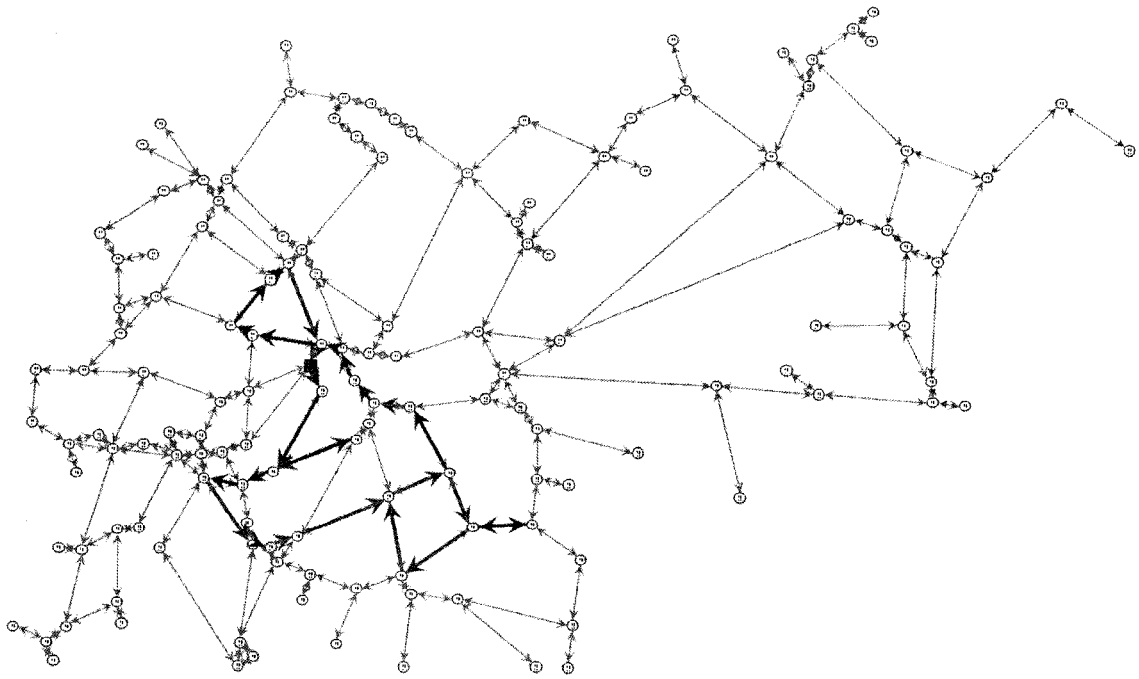


Figure C.14 : Circuit 11

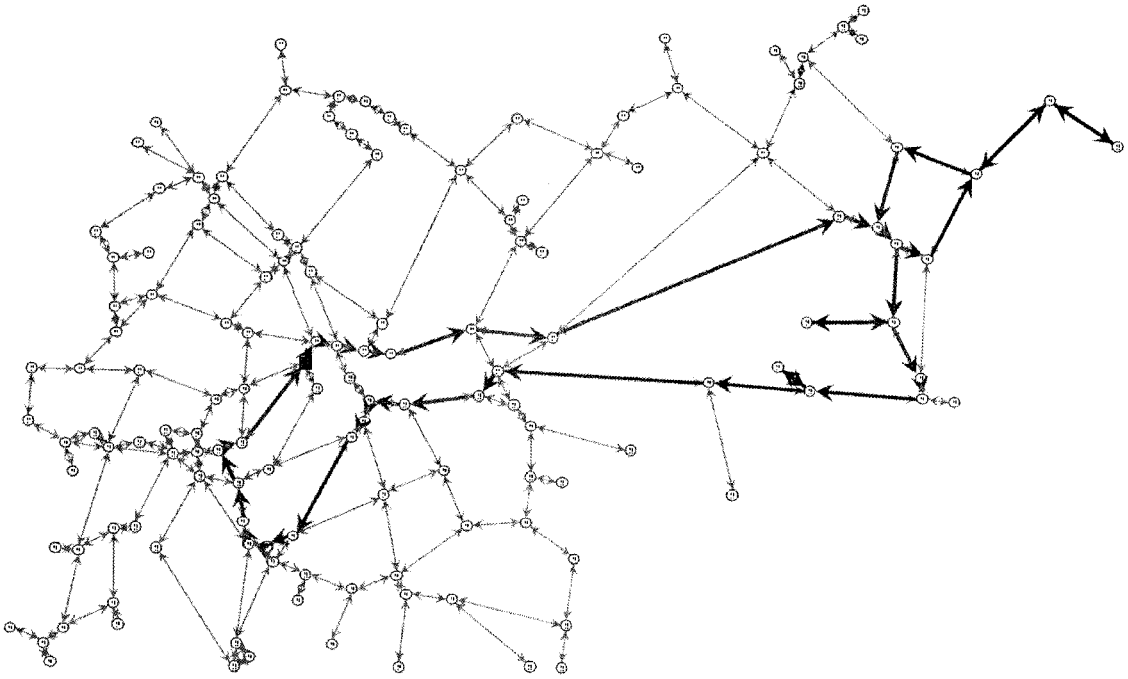


Figure C.15 : Circuit 12

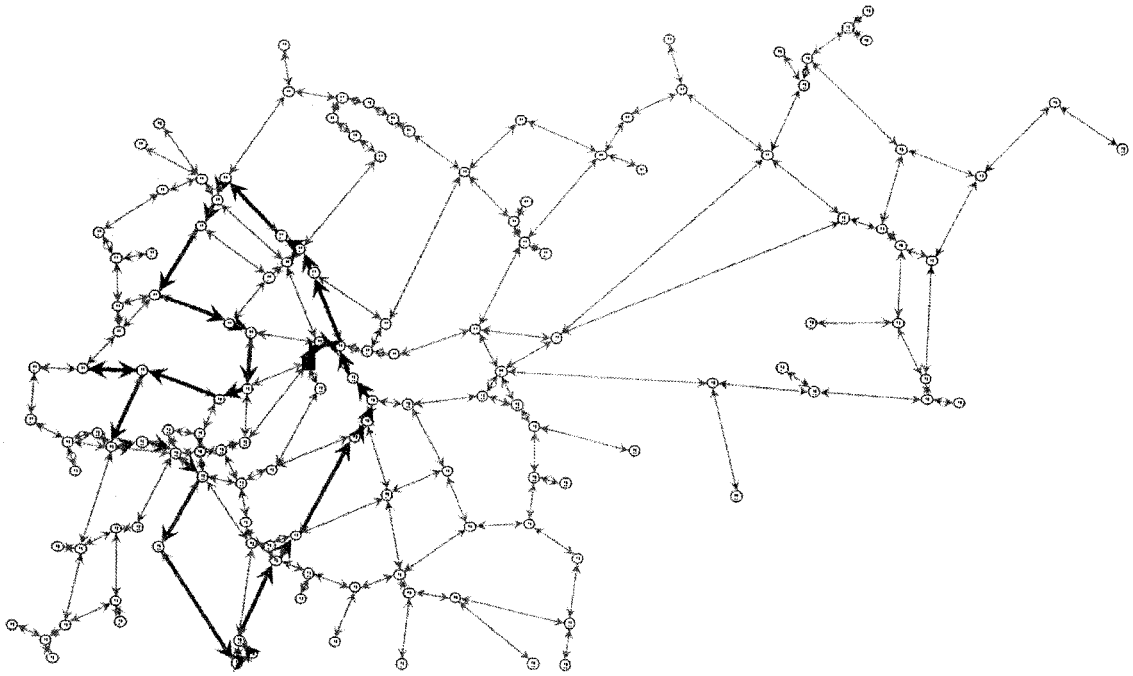


Figure C.16 : Circuit 14

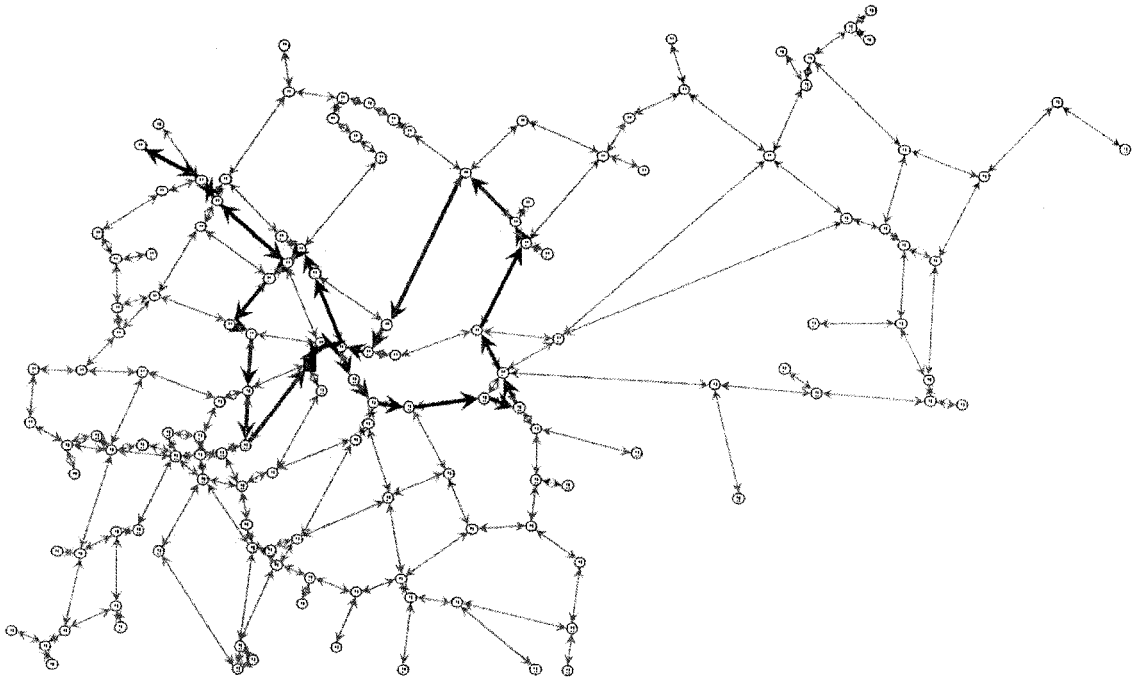


Figure C.17 : Circuit 15

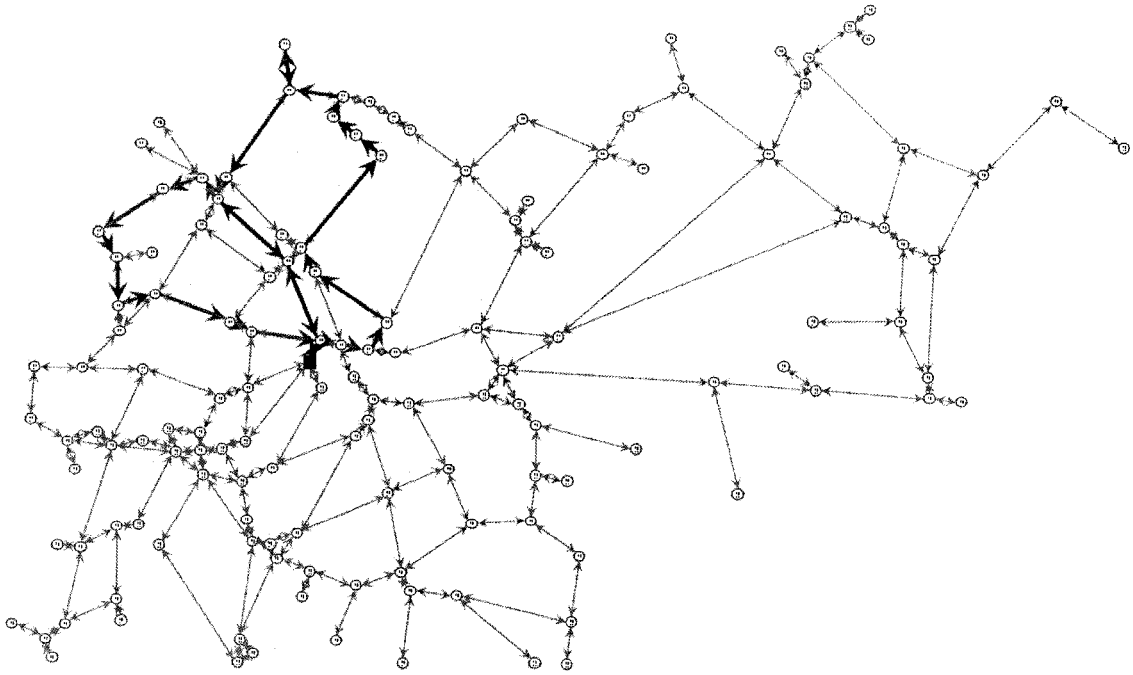


Figure C.18 : Circuit 16

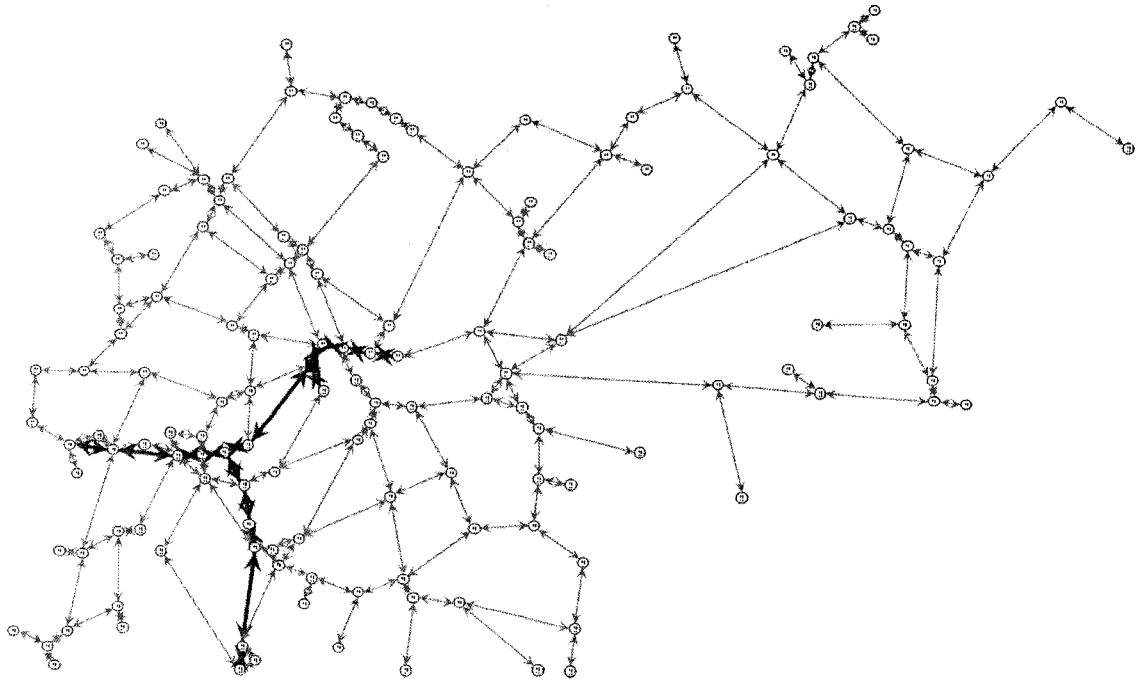


Figure C.19 : Circuit 17

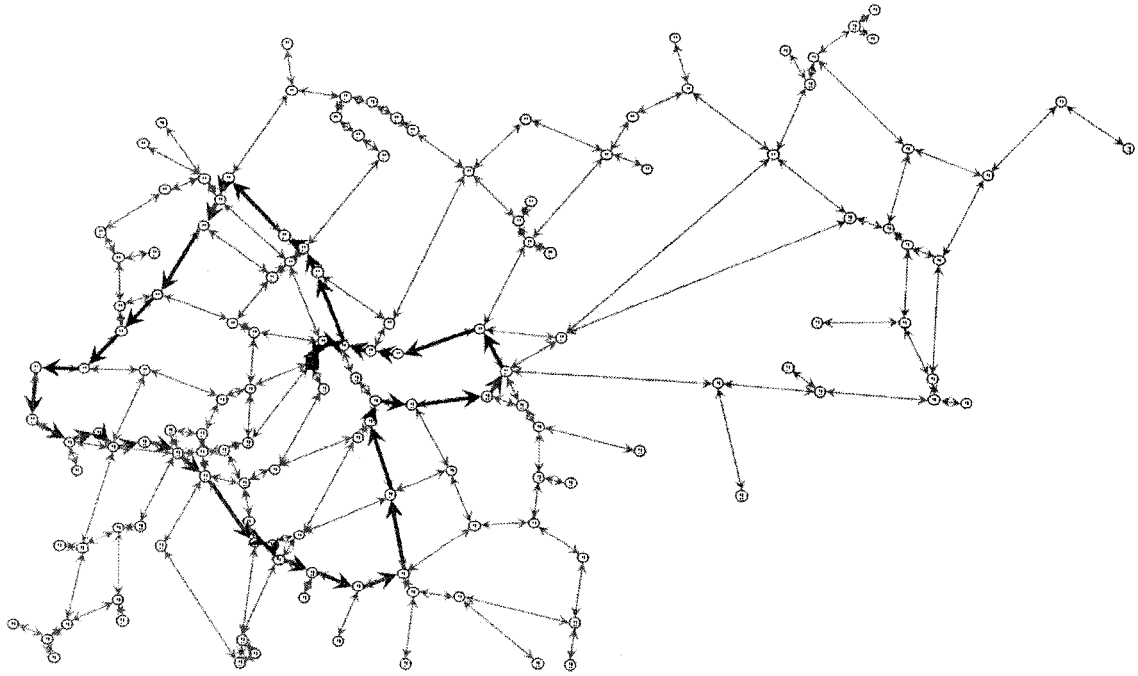


Figure C.20 : Circuit 18

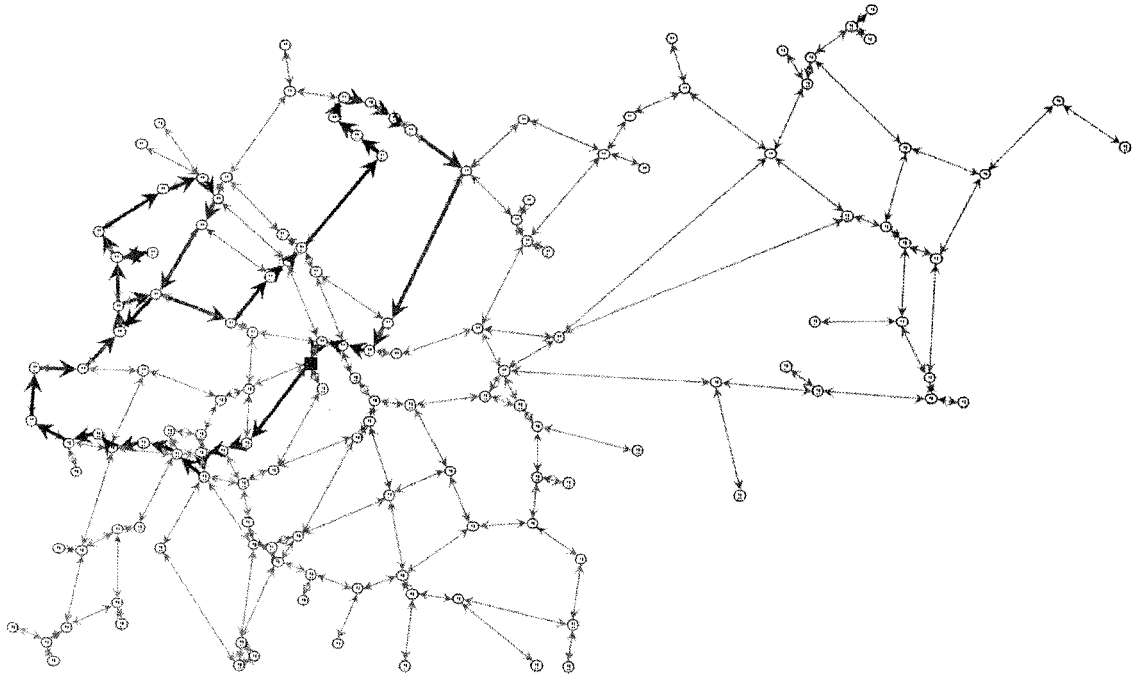


Figure C.21 : Circuit 201

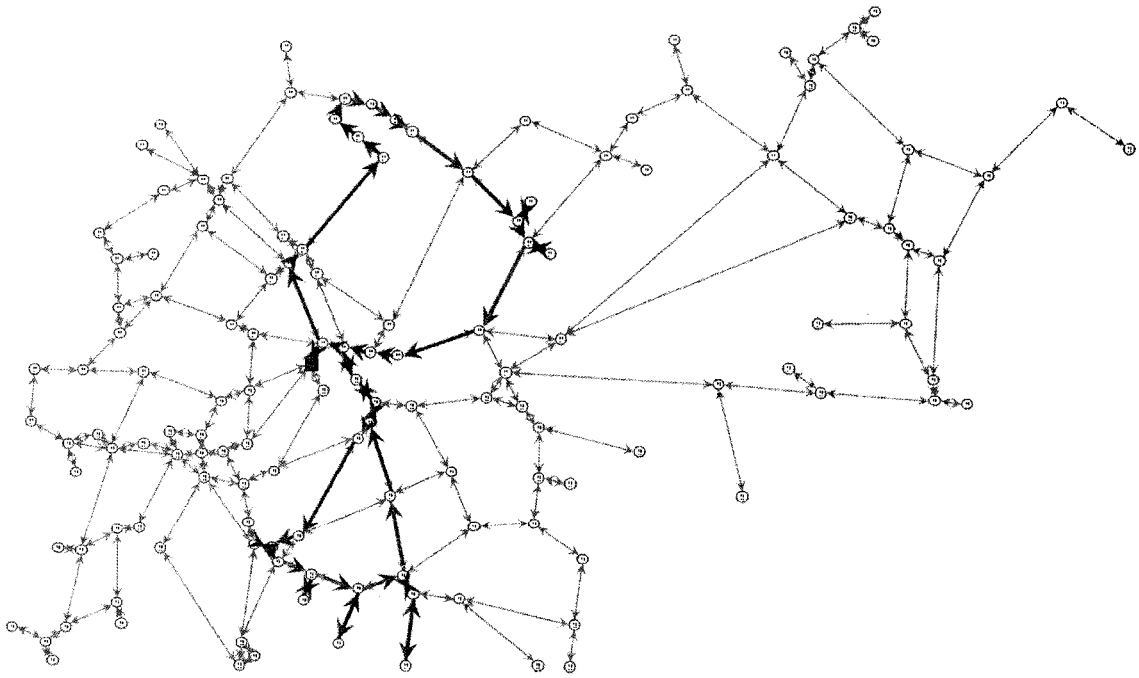


Figure C.22 : Circuit 202

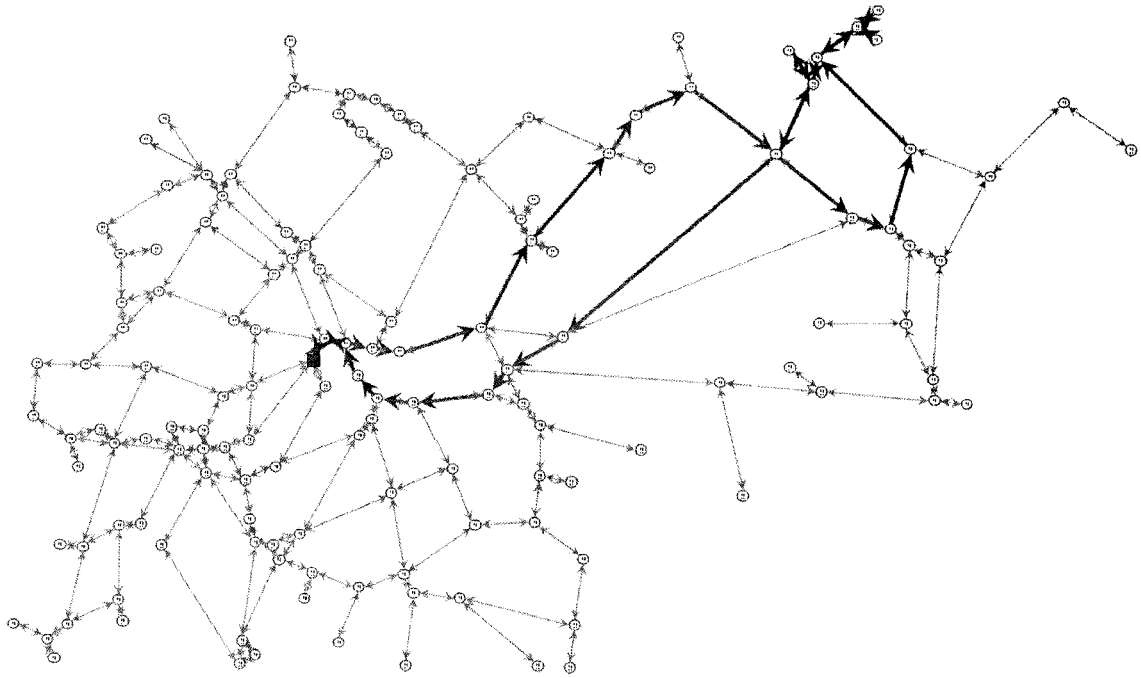


Figure C.23 : Circuit 203

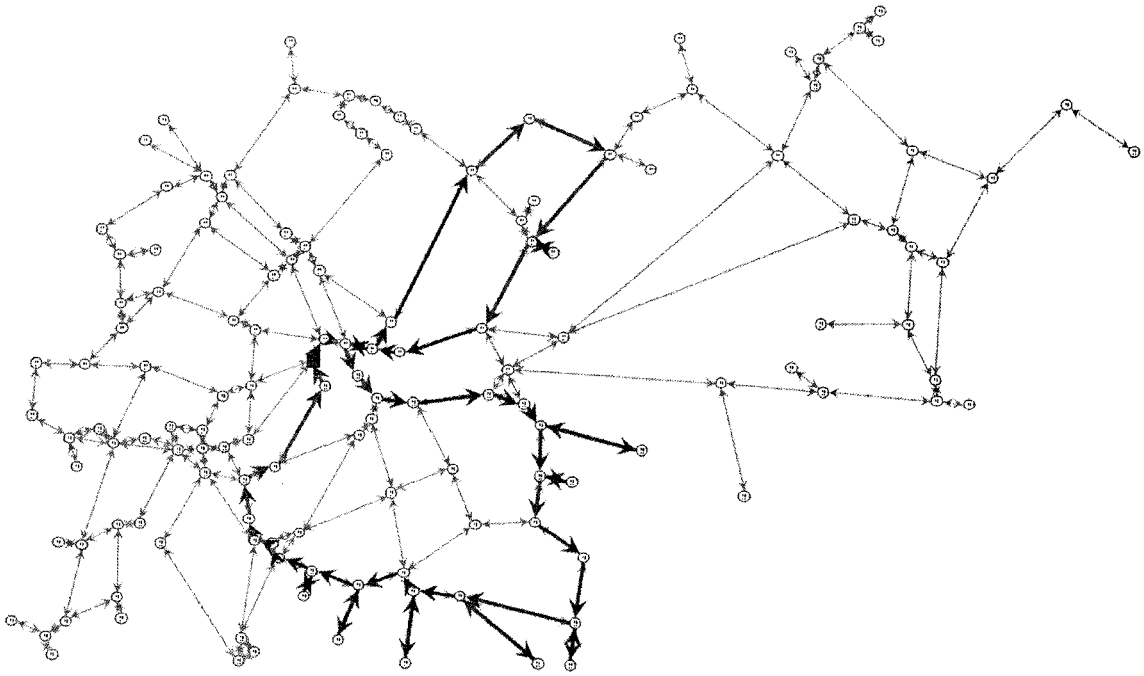


Figure C.24 : Circuit 204

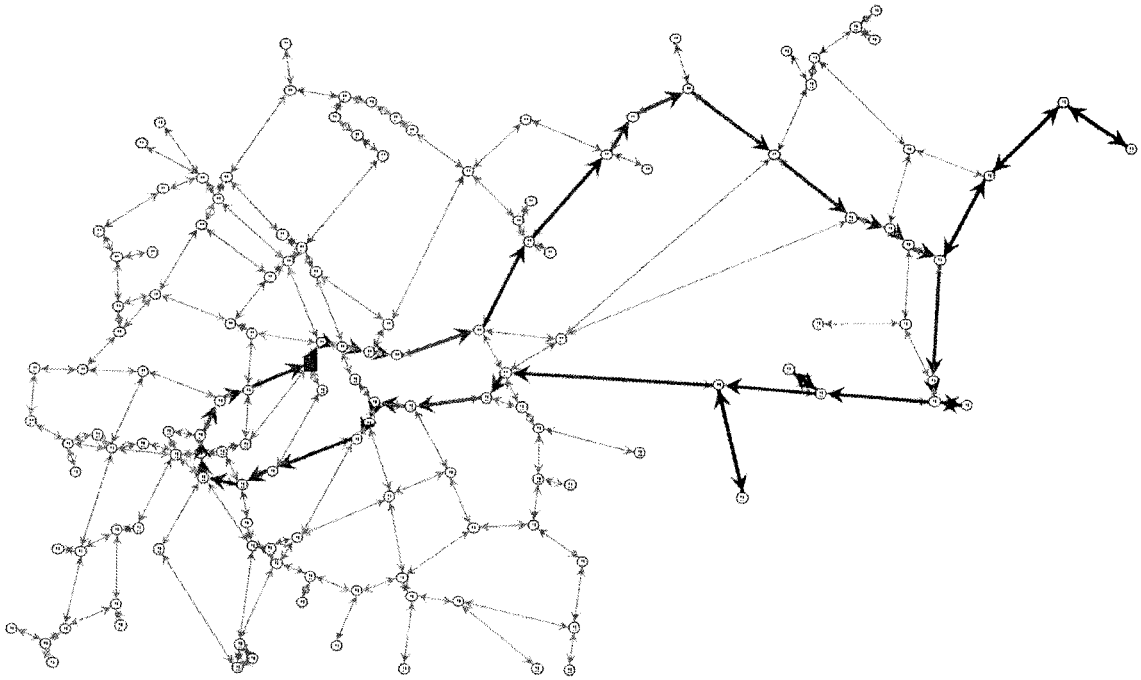


Figure C.25 : Circuit 205

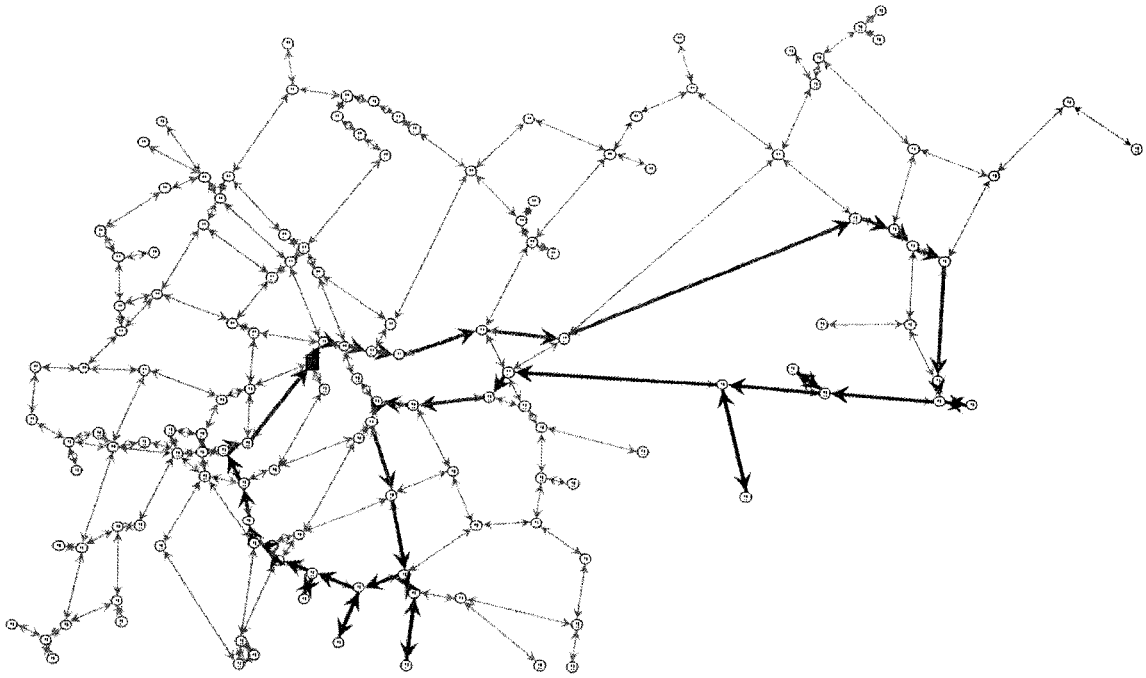


Figure C.26 : Circuit 206

Le tableau C.3 regroupe les caractéristiques des différents circuits. Dans la modélisation utilisée, les circuits inverses ont les mêmes caractéristiques que les circuits dont ils découlent bien que l'approche désagrégée privilégiée tout au long de ce mémoire permettrait une différenciation.

Tableau C.3 : Caractéristiques des circuits

ID Circuit	Nombre de liens	Longueur (Km)
CIR1	42	252.07
CIR2	42	328.12
CIR4	42	270.62
CIR5	28	174.57
CIR6	36	237.21
CIR7	47	294.25
CIR8	32	246.254
CIR9	37	300.71
CIR10	45	254.07
CIR11	28	209.599
CIR12	41	365.43
CIR14	33	218.262
CIR15	34	227.37
CIR16	29	205.39
CIR17	32	169.91
CIR18	37	214.17
CIR201	43	252.31
CIR202	48	269.60
CIR203	37	290.807
CIR204	51	370.02
CIR205	44	380.53
CIR206	45	360.32

Le formalisme de données préconisé dans cette étude permet d'obtenir toutes les informations concernant un circuit. Le tableau C.4 présente le détail des caractéristiques du circuit 11.

Tableau C.4 : Détails des caractéristiques du circuit 11

ID Lien	Classe	Longueur (Km)
L376	2	3.15
L382	2	8.24
L393	1	11.86
L396	3	3.12
L398	3	8.96
L400	1	2.69
L517	3	11.41
L524	3	5.12
L528	3	4.36
L532	2	2.39
L537	3	3.69
L543	3	11.74
L544	3	11.74
L546	3	12.98
L573	3	7.62
L574	3	7.62
L575	3	11.53
L577	3	13.22
L579	2	11.49
L582	3	4.77
L586	1	3.88
L588	2	4.04
L595	3	8.54
L595	3	8.54
L597	3	8.28
L603	1	3.36
L617	2	4.69
L733	3	10.58

ANNEXE D : UTILISATION D'UN LANGAGE DE MODÉLISATION MATHÉMATIQUE ORIENTÉ-OBJET

D.1 Une évolution bénéfique

La résolution d'un programme mathématique (programme linéaire) apporte une valeur ajoutée aux solutions obtenues par rapport aux heuristiques, par l'aspect exact du résultat. Cependant, le résultat en tant que tel, obtenu par la résolution offre certes de nombreuses informations mais ne représente pas la finalité d'une optimisation. En effet, l'utilisation de la programmation mathématique doit être fait dans l'optique d'une analyse des caractéristiques du résultat (et non seulement de sa valeur) mais également dans l'optique d'une analyse de sensibilité et ainsi de multiples résolutions sous différentes conditions.

Cependant, l'utilisation d'un langage peu évolué s'avère fastidieuse lorsque le modèle possède des centaines de variables et des milliers de contraintes. La figure D.1 présente l'interface proposée par un de ces logiciels (LINDO). La fenêtre supérieure gauche montre le programme linéaire ainsi que la méthode de programmation utilisés. Cette méthode « classique » rend la programmation très compliquée lors de l'utilisation de modèle de taille importante car il faut trouver un moyen de générer le code associé.

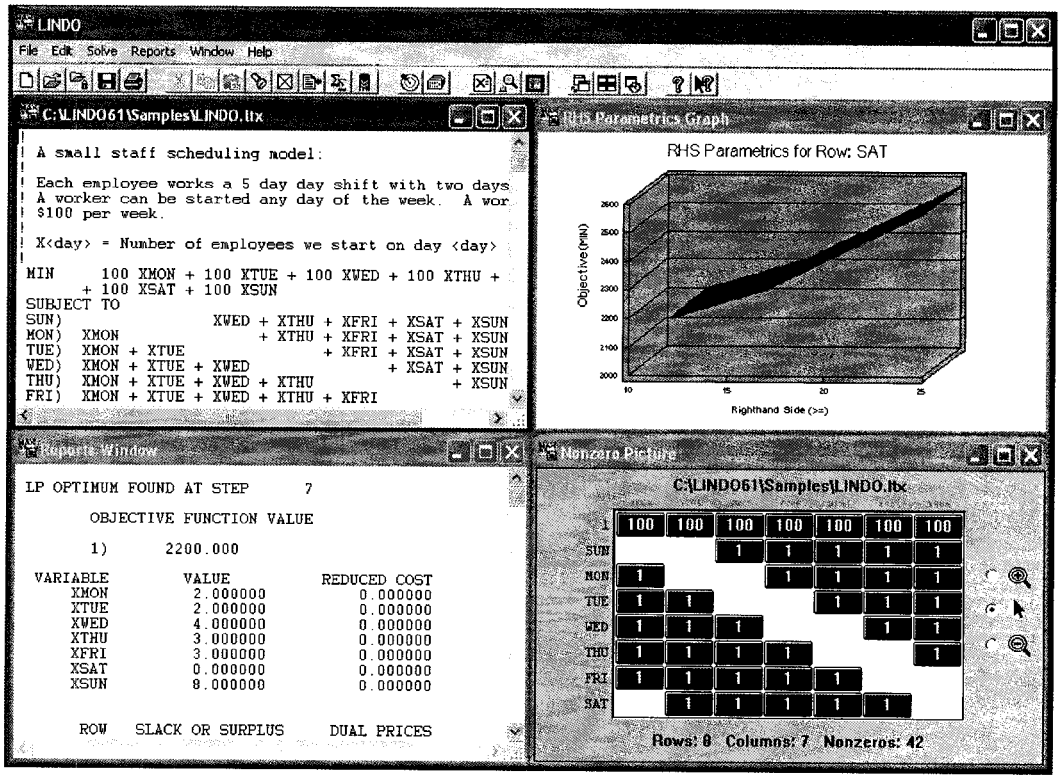


Figure D.1 : Interface et méthode de programmation du logiciel LINDO (http://www.lindo.com)

Cependant, de nouveaux logiciels (AMPL, ILOG) offre maintenant des langages de modélisation plus évolués et orientés-objets pour de nombreuses applications (programmation linéaire, non linéaire, programmation par contraintes).

D.2 Un langage orienté-objet

La programmation mathématique ne s'apparente pas seulement à la résolution d'un algorithme à l'aide d'un ordinateur et à l'impression de la solution optimale. En fait, le processus de résolution est plus complexe et peut être défini comme la suite des opérations suivantes (FOURER, 2003) :

- formuler le modèle, ensemble de variables, objectifs et contraintes représentant le problème ;

- collecter les données relatives à un problème particulier ;
- générer la fonction objectif et les contraintes en adéquation avec le modèle et l'ensemble de données ;
- résoudre le modèle à l'aide d'un programme (« solveur ») utilisant une algorithmique capable de trouver la solution optimale ;
- analyser les résultats ;
- raffiner le modèle et les données si nécessaires, résoudre une nouvelle fois.

Dans le cas spécifique de la programmation linéaire, il s'agit principalement d'expliciter la fonction objectif, d'expliciter les nombreuses contraintes via la matrice des coefficients, de taille très importante et composée principalement de zéros.

Les récents développements des langages de modélisation orientés-objets permettent d'une part d'écrire de manière plus compacte le modèle mathématique, mais également de générer automatiquement la matrice des coefficients. Ceci est réalisé d'une part par une architecture orientée-objet permettant de dissocier le modèle des données et d'autre part par des bibliothèques informatisées permettant une construction efficace des données.

D.2.1 Une écriture « naturelle »

L'écriture de modèles mathématiques en recherche opérationnelle était souvent fastidieuse et demandait certains efforts de passage du modèle « usager » au modèle informatique. Dans un souci de compacité, l'usager écrit généralement le modèle à l'aide de sommation, d'indices ou d'exposants puisés dans différents ensembles souvent disjoints. Une écriture classique du type : 100 X11 + 125 X12 + 32 X24 s'avère ainsi inadaptée lorsqu'on fait face à de grands ensemble de données. Les nouveaux logiciels offrent dorénavant un langage de modélisation évolué permettant d'utiliser la même

écriture compacte. La figure D.2 présente un parallèle entre le modèle usager et le modèle informatique pour un problème de transport.

I l'ensemble des origines
J l'ensemble des destinations
O_i l'offre de l'origine i
D_j l'offre de la destination j
c_{ij} le côut de transport de i à j
x_{ij} la quantité transportée de i à j

$$\min \sum_i \sum_j c_{ij} x_{ij}$$

$$s.c.$$

$$\sum_{j \in J} x_{ij} = O_i \quad \forall i \in I$$

$$\sum_{i \in I} x_{ij} = D_j \quad \forall j \in J$$

$$x_{ij} \geq 0$$

a) modèle usager

```
set ORIG;
set DEST;
param offre{ORIG} >=0 ;
param demande{DEST} >=0 ;
param cout {ORIG,DEST} >= 0;
var Trans {ORIG,DEST} >= 0 ;

minimize Cout_Total :
sum {i in ORIG, j in DEST} cout[i,j] * Trans[i,j];

subject to C_offre {i in ORIG}:
sum {j in DEST} Trans[i,j] = offre[i];

subject to C_demande {j in DEST}:
sum {i in ORIG} Trans[i,j] = demande[j];
```

b) modèle informatique

Figure D.2: Exemple de modélisation

D.2.2 Un accès et une construction des données adéquats

Dans une optique de multiples résolutions afin de raffiner le modèle mathématique ou d'étudier sa sensibilité face à différentes caractéristiques, la construction des données (matrice des coefficients) doit se faire de manière conviviale et efficace. L'utilisation d'outils informationnels tels que Microsoft Excel, Microsoft Access permet d'entrer, de stocker et de gérer ces données de manière efficace. Les nouveaux langages de modélisation offre maintenant la possibilité d'interagir avec ces outils afin de construire les données. La figure D.3 présente la structure d'accès utilisée par le logiciel AMPL.

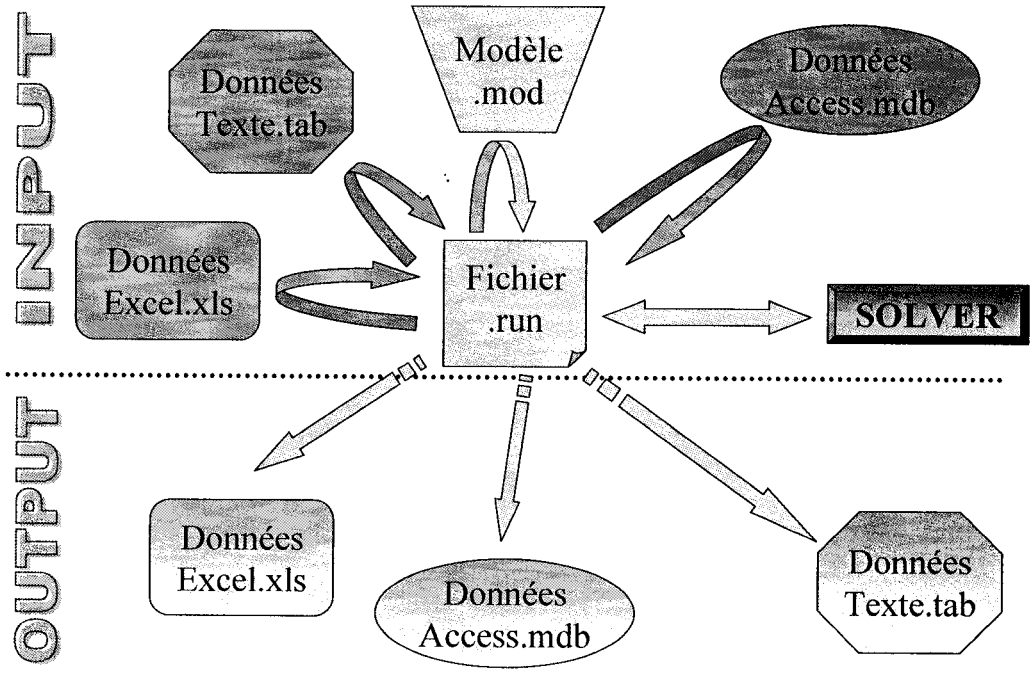


Figure D.3 : Architecture d'accès aux données d'AMPL

Le point central de cette architecture est un fichier de type script contenant :

- le nom du modèle à prendre en compte ;
- la définition des tables de données en entrée;
- le solver à utiliser ;
- la définition des tables de sorties ;
- différentes instructions relatives à la résolution.

La figure D.4 présente un exemple de fichier script.

```
option solver cplex;

model diet.mod;

table dietFoods IN "ODBC" "diet.xls" "Foods": FOOD <- [FOOD], cost, f_min, f_max;
table dietNutrs IN "ODBC" "diet.xls" "Nutrients": NUTR <- [NUTR], n_min, n_max;
table dietAmts IN "ODBC" "diet.xls" "Amounts": [NUTR, FOOD], amt;

read table dietFoods;
read table dietNutrs;
read table dietAmts;


table DietSens {j in FOOD} OUT "ODBC" "DietSens.mdb" ("Sens" & j):
[Food], f_min, Buy, f_max;


for {j in FOOD} {
  let cost[j] := cost[j] / 2;
  solve;
  write table DietSens[j];
  let cost[j] := cost[j] * 2;
}
```

Figure D.4 : Un exemple de fichier script

D.3 Fichiers de modélisation

Cette section présente les différents fichiers de modélisation et fichiers scripts utilisés dans le cadre du développement de l'outil de planification des activités de monitoring.

D.3.1 Confection de l'horaire

Le point commun des trois premières méthodes de planification réside dans la confection d'un horaire, d'une séquence de parcours des circuits. La figure D.5 présente le fichier modèle utilisé et la figure D.6 le fichier script d'accès aux données.

```
set FS1 ordered; # quart de travail de la fin de semaine 1
set S1 ordered; # quart de travail de la semaine 1
set FS2 ordered; # quart de travail de la fin de semaine 2
set S2 ordered; # quart de travail de la semaine 2

set NomP ordered; # Nom des 4 périodes
set Q:= FS1  union S1  union  FS2 union S2 ordered; # ensemble des quarts de travail
set FSS1:= S1 union FS1;
set FSS2:= S2 union FS2;



set K ; # ensemble des circuits

set NomC ordered ;# Nom des 3 classes
set C1 ; # ensemble des arcs de classe 1
set C1FS1 within C1; # ensemble des arcs de classe 1 Fin de Semaine 1
set C1S1 within C1; # ensemble des arcs de classe 1 Semaine 1
set C1FS2 ; # ensemble des arcs de classe 1 Fin de Semaine 2
set C1S2 ; # # ensemble des arcs de classe 1 Semaine 2
set C2 ; # ensemble des arcs de classe 2
set C2SS1 within C2; #ensemble des arcs de classe 2 pour FS1 + S1
set C2SS2 within C2; #ensemble des arcs de classe 2 pour FS2 + S2
set C3 ; # ensemble des arcs de classe 3
set C3R ; # ensemble des arcs de classe 3 non couvert
set A:= C1 union C2 union C3 ; # ensemble des arcs


param poids2 default 1;
param poids3 default 1;


param delta {A,K} >= 0, default 0 ;
param lien_longueur {A} ; # longueur des arcs
param longueur {K} ; # longueur des circuitss

var Y {K,Q}, binary ;

#L'objectif varie en fonction de la période de re-planification
maximize Couverture:
        4 * sum {k in K, j in Q, i in CFS1} delta[i,k] * Y[k,j] / longueur[k]
        + 2 * poids2 * sum {k in K, j in Q, i in C2SS1} delta[i,k] * Y[k,j] / longueur[k]
        + poids3 * sum {k in K, j in Q, i in C3R} delta[i,k] * Y[k,j] / longueur[k] ;




subject to affect_circuit {j in Q}:
        sum {k in K} Y[k,j] = 1 ;

subject to brassage_FS1 {k in K}:
        sum {j in FS1} Y[k,j]<=1 ;
```

```
subject to brassage_S1 {k in K}:
        sum {j in S1} Y[k,j]<=1 ;

subject to brassage_FS2 {k in K}:
        sum {j in FS2} Y[k,j]<=1 ;

subject to brassage_S2 {k in K}:
        sum {j in S2} Y[k,j]<=1 ;


# Exigences pour les arcs de classe 1
subject to exigences_FS1 { i in C1FS1}:
        sum {j in FS1, k in K} delta[i,k]*Y[k,j] >= 1 ;

subject to exigences_S1 { i in C1S1}:
        sum {j in S1, k in K} delta[i,k]*Y[k,j] >= 1 ;

subject to exigences_FS2 { i in C1FS2}:
        sum {j in FS2, k in K} delta[i,k]*Y[k,j] >= 1 ;

subject to exigences_S2 { i in C1S2}:
        sum {j in S2, k in K} delta[i,k]*Y[k,j] >= 1 ;



# Exigences pour les arcs de classe 2
subject to exigences2_FFS1 { i in C2SS1}:
        sum {j in FSS1, k in K} delta[i,k]*Y[k,j] >= 1 ;

subject to exigences2_FFS2 { i in C2SS2}:
        sum {j in FSS2, k in K} delta[i,k]*Y[k,j] >= 1 ;


# Exigences pour les arcs de classe 3
subject to exigences3 { i in C3R}:
sum {j in Q, k in K} delta[i,k]*Y[k,j] >= 1 ;
```

Figure D.5 : Fichier modèle de confection d'un horaire

```
model affectation3.mod ;

# Tables des 3 classes d'Arcs (seuls ceux associés aux circuits)
table ImportNomClasse IN "ODBC" "patrouille.mdb" "SQL=SELECT * from Classes order by
classe_priorite":
NomC <- [classe_id];
read table ImportNomClasse;

table ImportC1 {j in NomC : ord(j) = 1} IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT DISTINCT
lien_id, lien_longueur FROM Liens_effectifs WHERE classe_id ='" & j & "'"):
C1<- [lien_id],  lien_longueur ;
table ImportC2 {j in NomC : ord(j) = 2} IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT DISTINCT
lien_id, lien_longueur FROM Liens_effectifs WHERE classe_id ='" & j & "'"):
C2<- [lien_id], lien_longueur ;
table ImportC3 {j in NomC : ord(j) = 3} IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT DISTINCT
lien_id, lien_longueur FROM Liens_effectifs WHERE classe_id ='" & j & "'"):
C3<- [lien_id], lien_longueur ;;

# Tables des périodes
table ImportNomPeriode IN "ODBC" "patrouille.mdb" "SQL=SELECT * from Periodes order by
periode_priorite":
NomP <- [periode_id];
read table ImportNomPeriode;

#table des classes d'arcs réels par périodes Classe1
table ImportC1FS1 { p in NomP : ord(p) = 1} IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT DISTINCT
lien_id FROM Liens_reels1 WHERE periode_id ='" & p & "' AND lien_reel = false"):
C1FS1 <- [lien_id];
table ImportC1S1 { p in NomP : ord(p) = 2} IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT DISTINCT
lien_id FROM Liens_reels1 WHERE periode_id ='" & p & "' AND lien_reel = false"):
C1S1 <- [lien_id];
table ImportC1FS2 { p in NomP : ord(p) = 3} IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT DISTINCT
lien_id FROM Liens_reels1 WHERE periode_id ='" & p & "' AND lien_reel = false"):
C1FS2 <- [lien_id];
table ImportC1S2 { p in NomP : ord(p) = 4} IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT DISTINCT
lien_id FROM Liens_reels1 WHERE periode_id ='" & p & "' AND lien_reel = false"):
C1S2 <- [lien_id];

#table des classes d'arcs réels par périodes Classe2
table ImportC2SS1 { p in NomP : ord(p) <= 2} IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT
DISTINCT lien_id FROM Liens_reels2 WHERE periode_id ='" & p & "' AND lien_reel = false"):
C2SS1 <- [lien_id];
table ImportC2SS2 { p in NomP : ord(p) > 2} IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT DISTINCT
lien_id FROM Liens_reels2 WHERE periode_id ='" & p & "'AND lien_reel = false"):
C2SS2 <- [lien_id];

#table des classes d'arcs réels par périodes Classe3
table ImportC3R  IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT DISTINCT lien_id FROM Liens_reels3
where lien_reel = false"):
C3R <- [lien_id] ;

#table des quarts de travail
```

```
table ImportFS1 {j in NomP :ord(j) = 1} IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT * from
quarts_effectifs where periode_id='" & j & "' order by quart_priorite"):
FS1<- [quart_id];
table ImportS1 {j in NomP :ord(j) = 2} IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT * from
quarts_effectifs where periode_id='" & j & "' order by quart_priorite"):
S1<- [quart_id];
table ImportFS2 {j in NomP :ord(j) = 3} IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT * from
quarts_effectifs where periode_id='" & j & "' order by quart_priorite"):
FS2<- [quart_id];
table ImportS2 {j in NomP :ord(j) = 4} IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT * from
quarts_effectifs where periode_id='" & j & "' order by quart_priorite"):
S2<- [quart_id];

# Tables des cicuits
table ImportCircuit IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT * from Circuit_longueur_totale where
circuit_reel = false"):
K <- [circuit_id], longueur ;

table ImportDelta IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT DISTINCT * from Delta"):
[a ~ lien_id, k ~ vraicircuit], delta[a,k] ~ delta;

read table ImportC1;
read table ImportC1FS1;
read table ImportC1S1;
read table ImportC1FS2;
read table ImportC1S2;
read table ImportC2;
read table ImportC2SS1;
read table ImportC2SS2;
read table ImportC3;
read table ImportC3R;
read table ImportFS1;
read table ImportS1;
read table ImportFS2;
read table ImportS2;

read table ImportCircuit;
read table ImportDelta;

if card(CFS1) > 0 then let poids2:= card(CFS1) /  card(C2SS1) ;
if card(CFS1) > 0 then let poids3:=  card (CFS1) / card(C3R) ;
if card(CFS1) = 0 then let poids2:= 1 ;
if card(CFS1) = 0 then let poids3:= card(C2SS1) / card(C3R);

solve;

#Table de sortie
table Horaire OUT "ODBC" "Affectation3.xls" :
{k in K} -> [CICUIT], {q in Q} < Y[k,q] ~ (q)>;

table HorairedB OUT "ODBC" "patrouille.mdb" "Horaire" :
[K,Q], Y ;
```

```
write table Horaire;
write table HorairedB;
```

Figure D.6 : Fichier script du problème de confection d'un horaire

Un accent particulier a été porté afin de dissocier au maximum le modèle des données en utilisant par exemple un ordre dans l'appel des quarts de travail plutôt que le nom du quart qui pourrait être amené à changer.

Les méthodes de re-planification utilisent les mêmes fichiers de modélisation en faisant varier les ensembles d'arcs, de quarts mais également la fonction objectif.

D.3.2 Affectation des arcs omis

La troisième méthode développée utilise une composante d'affectation des arcs omis aux circuits planifiés. Cette greffe est réalisée à l'aide du programme linéaire d'affectation présenté à la figure D.7 et du fichier script présenté à la figure D.8.

```
set ARCS ; # ensembles des arcs à affecter
set CIRCUITS ; # ensemble des circuits admissibles pour chaque arc
set LIENS within {ARCS,CIRCUITS} ;


param distance {LIENS} >= 0 ; # distance ajoutée par l'ajout de l'arc au circuit
param capa default 10000; # capacité du véhicule
param longueur {CIRCUITS} >=0 ; # longueur du circuit
param limite {CIRCUITS} >= 0  default 6 ; # limite du circuit en nombre d'arcs

var Affectation {LIENS}, binary ; # affectation de l'arc au circuit;

minimize Distance_totale :
        sum {(a,c) in LIENS} Affectation[a,c]*distance[a,c];

subject to Affect_arc {a in ARCS}:
        sum {c in CIRCUITS : (a,c) in LIENS} Affectation[a,c] = 1;

subject to Limite_affect {c in CIRCUITS}:
        sum {a in ARCS : (a,c) in LIENS } Affectation[a,c] <= limite[c];

#subject to Capacite {c in CIRCUITS} :
#       longueur[c] + sum {a in ARCS: (a,c) in LIENS} Affectation[a,c]*distance[a,c] <= capa ;
```

Figure D.7 : Fichier modèle d'affectation

```
model affectation_arc.mod;

table Arcs IN: ARCS <- [ARCS];
table Circuits IN: CIRCUITS <- [CIRCUITS], longueur;

read table Arcs;
read table Circuits;

data Liens.dat;

solve;

#Table de sortie
table Affect OUT "ODBC" "Affectation3.xls" :
LIENS -> [ARCS,CIRCUITS] , Affectation, distance;

#Table de sortie
table Affectmdb OUT "ODBC" "patrouille.mdb"  :
LIENS -> [ARCS , CIRCUITS] , Affectation, distance;

#write table Affect;
write table Affectmdb;
```

Figure D.8 : Fichier script pour le problème d'affectation

Les différentes données sur les arcs et les circuits sont stockées dans des fichiers de type texte générés par des procédures en VBA à partir d'Access et d'Excel. Le résultat est lui aussi transcrit dans un fichier texte lu par la procédure VBA d'insertion de l'arc au circuit.

D.3.3 Affectation généralisée

La dernière méthode proposée (méthode de construction) utilise dans un premier temps un modèle d'affectation généralisée afin de construire les différentes grappes, point de départ à la confection des circuits. La figure D.9 et D.10 présentent les fichiers utilisés pour la résolution de ce problème.

```
set ARCS ; # ensembles des arcs à affecter
set GERMES ; # ensemble des germes


param distance {GERMES,ARCS} >= 0 ; # mesure (distance) d'afectation de l'arc au germe
param capa default 600; # capacité du véhicule en km
param longueur {ARCS} >=0 ; # longueur des arcs


var Affectation {GERMES,ARCS}, binary ; # affectation de l'arc au germe;


minimize Distance_totale :
        sum {i in ARCS, j in GERMES} distance[j,i]*Affectation[j,i];

subject to Affect_arc {i in ARCS}:
        sum  {j in GERMES} Affectation[j,i] >= 1;

subject to Capacite {j in GERMES}:
        sum {i in ARCS} Affectation[j,i]*longueur[i]/14 <= capa;
```

Figure D.9 : Fichier modèle du problème d'affectation généralisée

```
model affectation_gen.mod;

table ImportArcs IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT *  FROM Liens"):
ARCS <- [lien_id], longueur ~ lien_longueur;

table ImportGermes IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT DISTINCT germe_id  FROM
Germes_liens"):
GERMES <- [germe_id] ;

table ImportDistance IN "ODBC" "patrouille.mdb" ("SQL=SELECT * FROM Germes_liens"):
[germe_id, lien_id], distance;

read table ImportArcs;
read table ImportGermes;
read table ImportDistance;

solve;

#Table de sortie
table Affect OUT "ODBC" "Affectation.xls" :
[GERMESA,RCS] , Affectation ;

write table Affect;
```

Figure D.10 : Fichier script du modèle d'affectation généralisée

D.3.4 Équilibrage du réseau

L'étape suivante de la construction d'un circuit réside en la confection d'un graphe propice à l'extraction d'un circuit. Ceci repose sur l'obtention d'un graphe connexe et Eulérien. Si la première propriété est obtenue à l'aide de l'algorithme « connect-and-balance » exécuté de manière autonome, l'équilibrage, quant à lui, peut être obtenu en résolvant un problème de transport entre les nœuds déséquilibrés du réseau. Les figures D.11 et D.12 présentent les fichiers utilisés pour réaliser cette opération.

```
model transport.mod;

table Origine IN: ORIG <- [ORIG], offre;
table Destination IN: DEST <- [DEST], demande;
table Distance: [ORIG, DEST], cout;


read table Origine;
read table Destination;
read table Distance;

option solver cplex;
solve;


table ListeResultats OUT "Resultats.tab": [ORIG,DEST], Trans ;

write table ListeResultats;
```

Figure D.11 : Fichier modèle du problème d'équilibrage

```
set ORIG;
set DEST;

param offre{ORIG} >=0 ;
param demande{DEST} >=0 ;
param cout {ORIG,DEST} >= 0;

        check: sum {i in ORIG} offre[i] = sum {j in DEST} demande[j] ;

var Trans {ORIG,DEST} >= 0 ;

minimize Cout_Total :
        sum {i in ORIG, j in DEST} cout[i,j] * Trans[i,j];

subject to C_offre {i in ORIG}:
        sum {j in DEST} Trans[i,j] = offre[i];

subject to C_demande {j in DEST}:
        sum {i in ORIG} Trans[i,j] = demande[j];
```

Figure D.12 : Fichier script du problème d'équilibrage

L'utilisation de ce modèle s'inscrit dans la méthode *Reseau.RendreEulerien* présentée à l'annexe B (section B.5). Dans ce cas également, les données sont générées par la procédure et stockées dans des fichiers de type texte.