

**Titre:** Développement d'un système de gestion et de répartition des véhicules automatiques pour les mines souterraines  
Title: Development of a system for the management and distribution of automated vehicles for underground mines

**Auteur:** Renaud Grimard  
Author:

**Date:** 2001

**Type:** Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis

**Référence:** Grimard, R. (2001). Développement d'un système de gestion et de répartition des véhicules automatiques pour les mines souterraines [Mémoire de maîtrise, École Polytechnique de Montréal]. PolyPublie. <https://publications.polymtl.ca/6956/>  
Citation:

## Document en libre accès dans PolyPublie

Open Access document in PolyPublie

**URL de PolyPublie:** <https://publications.polymtl.ca/6956/>  
PolyPublie URL:

**Directeurs de recherche:** Michel Gamache, & Paul Cohen  
Advisors:

**Programme:** Non spécifié  
Program:

**UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL**

**DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME DE  
GESTION ET DE RÉPARTITION DES VÉHICULES  
AUTOMATIQUES POUR LES MINES SOUTERRAINES**

**RENAUD GRIMARD**

**DÉPARTEMENT DES GÉNIES CIVIL, GÉOLOGIQUE ET DES MINES  
ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

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

**JUIN 2001**



National Library  
of Canada

Acquisitions and  
Bibliographic Services

395 Wellington Street  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Bibliothèque nationale  
du Canada

Acquisitions et  
services bibliographiques

395, rue Wellington  
Ottawa ON K1A 0N4  
Canada

Your file Votre référence

Our file Notre référence

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.

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 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.

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 autrement reproduits sans son autorisation.

0-612-65579-2

Canada

**UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL**

**ÉCOLE POLYTECHNIQUE DE MONTRÉAL**

**Ce mémoire intitulé:**

**DÉVELOPPEMENT D'UN SYSTÈME DE  
GESTION ET DE RÉPARTITION DES VÉHICULES  
AUTOMATIQUES POUR LES MINES SOUTERRAINES**

présenté par: **GRIMARD Renaud**

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

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

**Mme RIOPEL Diane, Ph.D, présidente du jury**

**M. PECK Jonathan, Ph.D, membre**

**M. GAMACHE Michel, Ph.D., membre et directeur de recherche**

**M. COHEN Paul, Ph.D., membre et codirecteur de recherche**

## **REMERCIEMENTS**

J'aimerais tout d'abord remercier mon directeur de recherche, Michel Gamache pour son soutien constant et ses précieux conseils qui ont su m'apporter l'encouragement nécessaire au bon déroulement du projet. J'aimerais également remercier mon codirecteur M. Paul Cohen pour le côté visionnaire qu'il a su apporter au projet et pour les ressources matérielles et financières qu'il a déployées tout au long du projet. Un merci particulier à mon ami et confrère Louis-Philippe Bigras, sans qui la construction du simulateur et la mise en temps réel du système n'aurait pu être possible. Finalement je remercie ma copine Mélanie et ma famille pour les encouragements et le soutien financier des deux dernières années.

## RÉSUMÉ

Les systèmes de gestion et de répartition des véhicules sont conçus pour augmenter la productivité des opérations de manutention. Comparativement aux mines à ciel ouvert qui ont adopté rapidement cette technologie, les mines souterraines tardent à les implanter. La raison principale de ce retard vient des caractéristiques propres aux mines souterraines, comme les difficultés de communication et les réseaux de transport, qui ne permettent pas l'implantation des systèmes disponibles sur le marché.

Le système développé dans ce travail est fait spécifiquement pour les mines souterraines, traitant à la fois les problèmes de routage, d'ordonnancement et de répartition. Le modèle représentant le problème permet d'affecter les véhicules sur des réseaux à segments bidirectionnels en évitant les conflits, sans restreindre l'accès aux segments du réseau à un seul véhicule à la fois. Il permet également d'orienter les véhicules de façon à ce qu'ils se présentent pelle première aux points de chargement et de déchargement.

Le problème est résolu à l'aide d'un algorithme de plus court chemin acyclique sur un réseau discrétilisé dans le temps et peut gérer la circulation de plusieurs véhicules. La construction du modèle se fait selon une approche déterministe, considérant comme invariables les temps de transport et de service des véhicules.

Trois critères heuristiques d'affectation ont été introduits par l'entremise de la structure de coût révélant des performances différentes que celles observées dans les mines à ciel ouvert. La génération de résultats par l'utilisation d'un simulateur utilisant notre modèle de décisions a permis d'identifier l'importance que la congestion peut avoir sur le rendement global de l'opération. Le simulateur fonctionne en temps réel compte tenu du faible temps de calcul du système.

## ABSTRACT

Fleet management systems cannot be easily adapted to underground mining contexts and practically no alternative systems are available at present for such contexts. Important differences between underground and open pit mining contexts concern the means for traffic monitoring and the types of haulage roads. The main difficulty in underground operations is posed by the nature of the road network.

In the literature, there are only few papers dealing with dispatching and fleet control in underground mines. The literature related to AGVs (Automated Guided Vehicles) systems for the manufacturing industry is the most relevant one to the development of an underground assignment system. An underground mine network presents many similarities with a plant network: unidirectional or bi-directional path segments, single vehicle segments, queues at servers, etc. But underground mines also present additional peculiarities: space limitation around servers limits the length of queues; LHDs can travel forward or in reverse thus giving more analysis flexibility.

This work is on optimal management system for a fleet of automated LHD (Load-Haul-Dump) vehicles that is able to take dispatching decisions according to objectives established by the planning crew, as well as routing and scheduling decisions to control vehicles along their paths, thus rendering these decisions closer to underground reality. All decisions must be taken in real-time. The decision model is resolved using an acyclic shortest path problem on a large discretised network.

The system takes assignment decisions (dispatching, routing and scheduling) in real time whenever a vehicle asks for a new destination. Various decisions criteria are being analyzed within this algorithm. The decision system handles front-vs-end loader considerations on a network using bi-directional edges.

The system is flexible enough to consider different optimisation criterion : minimising waiting time of LHD, minimising deviation from an optimal production plan established for the shift duration.

## TABLES DES MATIÈRES

<b>REMERCIEMENTS .....</b>	<b>IV</b>
<b>RÉSUMÉ.....</b>	<b>V</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>VI</b>
<b>TABLES DES MATIÈRES .....</b>	<b>VIII</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>XI</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>XII</b>
<b><u>CHAPITRE 1 INTRODUCTION.....</u></b>	<b>1</b>
1.1    Généralités : .....	1
1.2    Mines à ciel ouvert vs. mines souterraines : .....	2
1.3    Environnement manufacturier vs. mines souterraines : .....	3
<b><u>CHAPITRE 2 DESCRIPTION DU PROJET .....</u></b>	<b>5</b>
2.1    Description du problème à résoudre : .....	5
2.2    Trois sous-problème : .....	7
2.3    Contexte des mines souterraines : .....	8
2.3.1    Provenance et destination.....	8
2.3.2    Voies et circulation .....	10
2.3.3    Zones d'évitement.....	10
2.3.4    Transport .....	11
<b><u>CHAPITRE 3 REVUE DE LA LITTÉRATURE .....</u></b>	<b>13</b>
3.1    Mines à ciel ouvert .....	14
3.1.1    Procédures heuristiques.....	15
3.1.2    Procédures de répartition avec plan de production .....	16
3.2    Mines souterraines .....	19
3.3    Systèmes manufacturiers : V.A .....	23
3.4    Retour sur les caractéristiques du problème .....	40

3.4.1	Types de tâches .....	40
3.4.2	Déférence entre affectation lorsque une tâche apparaît et lorsqu'un véhicule est libre.....	41
3.4.3	Temps réel.....	41
3.4.4	Optimisation globale vs optimisation locale .....	42
3.4.5	Types de segments de route .....	44
3.4.6	Sens d'une chargeuse navette et types de manœuvres .....	45
3.4.7	Problème de blocage partiel et total .....	45
3.5	Résumé.....	46
<b><u>CHAPITRE 4 MÉTHODE</u></b> .....		47
4.1	Propriétés considérée .....	48
4.2	Modélisation du problème : spécificités .....	51
4.2.1	Réseau de base .....	51
4.2.2	Orientation d'un véhicule.....	52
4.2.3	Discrétisation.....	54
4.2.4	Fenêtre de temps .....	57
4.2.5	Conflits.....	58
4.2.6	Blocage total.....	61
4.2.7	Rappel : .....	65
4.3	Modélisation du problème : ajustement des coûts .....	66
4.3.1	Minimiser temps de demi-cycle .....	66
4.3.2	Minimiser l'écart entre la production et un plan pré-établi.....	67
4.3.3	Affectations fixes .....	68
4.4	Fonctionnement général du système.....	69
4.4.1	Rôle du module d'affectation.....	69
4.4.2	Rôle du module de représentation de la mine .....	71
4.4.3	Relations entre les deux modules .....	72

<b><u>CHAPITRE 5 RÉSULTATS.....</u></b>	<b>74</b>
5.1    Présentation des scénarios .....	76
5.2    Quantification des résultats.....	81
5.2.1    Niveau de saturation.....	81
5.2.2    Comparaison des critères d'affectation.....	83
5.3    Discussion.....	88
5.3.1    Point de saturation.....	88
5.3.2    Effet de la méthode routage .....	90
5.3.3    Effet du critère d'affectation .....	91
<b><u>CHAPITRE 6 CONCLUSION .....</u></b>	<b>95</b>
6.1    Retour sur le travail.....	96
6.2    Recommandations.....	99
<b><u>CHAPITRE 7 BIBLIOGRAPHIE.....</u></b>	<b>100</b>

## LISTE DES FIGURES

Figure 2.1 Chantier avec points de soutirages .....	8
Figure 2.2 Chantier Chambre et piliers .....	9
Figure 3.1 Modélisation d'intersection [ref : Krishnamurthy <i>et al.</i> , 1993] .....	32
Figure 3.2 Optimalité globale .....	43
Figure 4.1 Modélisation du réseau de base .....	51
Figure 4.2 Orientation des véhicules.....	53
Figure 4.3 Modélisation d'une intersection .....	54
Figure 4.4 Discréétisation #1 .....	55
Figure 4.5 Discréétisation #2 .....	56
Figure 4.6 Discréétisation #3 .....	56
Figure 4.7 Représentation des fenêtres de temps .....	58
Figure 4.8 Situations avec et sans conflits .....	59
Figure 4.9 Exemple de blocage total .....	61
Figure 4.10 Organisation sans blocage total .....	63
Figure 4.11 Modélisation du réseau pour éviter les blocages totaux .....	65
Figure 4.12 Liens entre les deux modules.....	73
Figure 5.1 Signification des nœuds.....	77
Figure 5.2 Modèle de mine .....	78
Figure 5.3 Graphe de base associé à la mine modèle.....	79
Figure 5.4 Point de saturation atteint .....	82
Figure 5.5 Point de saturation non atteint .....	82
Figure 5.6 Arbre des résultats .....	85
Figure 5.7 Performances selon les critères d'affectation .....	87
Figure 5.8 Goulot d'étranglement.....	89
Figure 5.9 Exemple .....	92

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 3.1 Critères d'affectation heuristiques .....	25
Tableau 4.1 Structure de données des fenêtres de temps .....	60
Tableau 4.2 Données de minimisation d'écart .....	67
Tableau 4.3 Liste d'événements .....	71
Tableau 5.1 Associations des points de chargement aux points de déchargement .....	80
Tableau 5.2 Paramètres de base .....	81
Tableau 5.3 Méthode de comparaison .....	84
Tableau 5.4 Résultats des simulations .....	86
Tableau 5.5 Exemple, cas#1.....	92
Tableau 5.6 Exemple, cas#2.....	93

## CHAPITRE 1

### Introduction

#### 1.1 Généralités

L'exploitation en souterrain est souvent la seule voie possible pour atteindre les gisements de grande profondeur. Ce type d'exploitation dure depuis très longtemps mais se fait souvent à coûts très élevés comparativement aux exploitations à ciel ouvert. En fait, depuis quelques années, l'industrie minière connaît un essor considérable dans le domaine de l'exploitation de gros gisements à ciel ouvert. De toutes les raisons qui peuvent y être attribuables, nous nous intéresserons particulièrement à une d'entre elles, soit la capacité des mines à opérer de très grandes flottes de transport par la gestion et la répartition de ces flottes à l'aide de systèmes d'affectation. Depuis les trente dernières années ces systèmes ont prouvé leur efficacité, permettant d'augmenter la productivité d'une opération minière d'en moyenne 10% (Murinathinam & Yingling). Mais comment se fait-il qu'en général les mines souterraines n'ont pas encore adopté cette technologie? En fait, le transfert de tels systèmes ne se fait pas aussi simplement qu'il peut sembler. L'absence de transparence des opérations, la complexité des cycles de minage et les coûts d'investissements très élevés pour adapter de tels systèmes sont quelques-unes des raisons qui peuvent expliquer la situation.

Comme mentionné plus haut, les différences entre une opération à ciel ouvert et une opération souterraine sont assez considérables pour ne pas permettre l'adaptation directe des technologies de gestion et de répartition. D'autre part, en regardant le problème de gestion et de répartition des véhicules dans les mines souterraines, un rapprochement avec les systèmes conçus pour les environnements manufacturiers, soit, les systèmes permettant de contrôler les véhicules automatiques effectuant le transport d'une cellule de production à une autre, peut être fait. Toutefois certaines différences ne permettent

pas de décrire le problème de la même façon. Mais quelles sont ces différences et quelles influences ont-elles sur le transport dans la mine?

### **1.2 Mines à ciel ouvert vs. mines souterraines**

Tout d'abord, le réseau sur lequel un véhicule souterrain circule est très limité en espace comparativement à celui des mines à ciel ouvert. En effet, il est fréquent de retrouver uniquement des segments de route à une voie à l'intérieur d'un réseau souterrain, ce qui constraint les véhicules à ne pas se croiser à l'intérieur d'une galerie. Une autre conséquence de la configuration des réseaux souterrains est l'impossibilité de former des files d'attente aux point de chargement ou de déchargement, étant donné que ceux-ci sont souvent confinés à la présence d'un seul véhicule pendant que les autres véhicules doivent attendre plus loin dans le mine. Ces difficultés ne sont pas présentes dans les mines à ciel ouvert.

Les communications dans les mines souterraines sont également plus complexes que dans les mines à ciel ouvert. La présence de parois rocheuses ne permet pas un transfert d'information numérique de la même façon qu'à air ouvert, mais l'obstacle principal vient du champ de vision, limité à quelques mètres, que les opérateurs de véhicule ont devant eux.

Finalement, le transport du minerai et du stérile dans les mines se fait généralement à l'aide de véhicules de type chargeuse navette. Ces véhicules permettent d'effectuer des cycles complets de transport sans nécessiter l'intervention de pelles ou d'autres types d'équipements de chargement. Dans les mines à ciel ouvert, comme les équipements de chargement sont très dispendieux, leur mise en fonction doit être justifiée par une utilisation maximale afin de minimiser leurs périodes d'inactivité. Ce problème n'est pas rencontré dans les mines souterraines, où plusieurs sites de chargement peuvent être accessibles même s'ils sont peu visités.

### 1.3 Environnements manufacturiers vs. mines souterraines

Comme les systèmes conçus pour les mines à ciel ouvert ne semblent pas adéquats pour les mines souterraines, il serait pertinent de s'attarder sur les systèmes de gestion et d'affectation des véhicules de type 'V.A'. Un V.A (*Véhicule Automatique*) est un type de véhicule utilisé dans les environnements manufacturiers. Ces véhicules automatiques permettent d'effectuer le transport de marchandises et d'outils entre les différentes cellules de production. Ces véhicules automatiques sont contrôlés par un système de gestion et de répartition des véhicules.

Tout comme les mines souterraines, les environnements manufacturiers, de par leur grande densité d'infrastructures, offrent des réseaux de transport qui comportent régulièrement des segments bidirectionnels à une seule voie. Par contre les conditions d'opérations de V.A sont moins hostiles que celles présentes dans les mines souterraines, ce qui permet aux systèmes de gestion et de répartition d'effectuer des horaires de production pour un horizon temporel très grand. Il ne serait pas possible de faire de même dans les mines souterraines compte tenu des variations de temps de chargement et de déchargement. Un autre aspect qui diffère entre les mines souterraines et les environnements manufacturiers vient du type de véhicule. Les V.A sont des véhicules qui n'ont pas nécessairement de sens, autrement dit, ce sont souvent des véhicules qui peuvent se présenter dans un sens ou dans l'autre aux points de chargement et de déchargement<sup>1</sup>. Cette règle est une a été déduite en étudiant les graphes sur lesquels les systèmes pour V.A sont modélisés or, elle ne peut pas être généralisée. De leur côté, les chargeuses navette doivent se présenter aux points d'opérations pelle première, entraînant la nécessité de considérer un endroit pour permettre aux véhicules de se réorienter avant d'atteindre leur destination.

---

<sup>1</sup> Plus précisément, les chariots porteurs n'ont pas de sens mais les chariots à fourche en ont.

Tout au long de ce travail, l'intérêt sera porté sur les mines souterraines et particulièrement sur la manutention du mineraï, du stérile et du remblai dans les mines. Nous verrons comment améliorer les opérations de transport par la mise en place d'un système d'affectation des unités de transport à différentes tâches tout en tenant compte des différentes interactions entre les véhicules sur un réseau de transport souterrain. La première partie du travail se divise en deux sections. La première section porte sur la description et sur l'importance du problème de répartition et de gestion de trafic. Dans cette section sont identifiées les trois composantes principales d'un système soit : la répartition, le routage et l'ordonnancement en plus des caractéristiques propres aux mines souterraines. La seconde section contient une revue des travaux faits jusqu'à aujourd'hui, pouvant être utiles au développement d'un système de gestion et de répartition du trafic. La deuxième partie de ce travail permet d'aborder la résolution du problème proprement dit. Pour ce, un retour sur les éléments pertinents retrouvés tout au long de la revue de littérature est présenté, suivi des caractéristiques propres au système que je présente. Dans cette seconde partie, le modèle de résolution du problème est exposé en détail ainsi que les méthodes utilisées pour le rendre efficace en temps réel. La troisième partie porte sur les méthodes d'évaluation du système développé ainsi que sur les résultats obtenus lors des essais effectués. Finalement ce travail se termine par une discussion sur les résultats obtenus ainsi que par une remise en perspective des objectifs du travail.

## CHAPITRE 2

### Description du projet

#### 2.1 Description du problème à résoudre

Le transport du minerai dans les mines est une étape importante qui, par son efficacité, fait varier la productivité globale des opérations et, par conséquent, les coûts directs d'exploitation d'un gisement. Le problème abordé dans ce travail ne touche pas la nature propre des moyens de transport, mais plutôt la gestion et l'optimisation des ressources de transport disponibles, dans le but d'améliorer le rendement global des opérations.

Les segments de routes, les points de chargement et de déchargement et les intersections composent l'environnement dans lequel les camions de type chargeuse navette doivent fonctionner pour répondre aux demandes de production en minerai, stérile et remblai. Le transport permet d'acheminer le minerai, stérile et remblai des points de chargement aux points de déchargement sur un réseau de routes. L'efficacité de cette tâche peut être accrue par une bonne affectation des chargeuses navette aux différents points de chargement. Les méthodes utilisées dans le choix des affectations doivent prendre en considération les conséquences des affectations sur le trafic des véhicules, afin d'éviter les collisions.

Actuellement, dans la grande majorité des mines souterraines, les affectations se font de manière fixe c'est-à-dire qu'avant de débuter une période de travail, un ou plusieurs véhicules sont assignés à un endroit de chargement d'où ils doivent effectuer le transport du minerai qui s'y trouve, et ce, jusqu'à épuisement de la ressource ou jusqu'à un avis contraire. Le choix des routes, ou encore la priorité que les véhicules ont les uns sur les autres, se fait suivant un ensemble de règles que chaque opérateur connaît bien. Par

exemple, à une intersection, les véhicules chargés ont priorité. D'autres mécanismes de contrôle allant jusqu'au système de feux de signalisation sont mis en place de façon à empêcher les risques de conflits. Cette façon de faire est simple et peut être améliorée étant donné que des véhicules ont souvent à attendre à un point de chargement ou à une intersection quand ils pourraient être en fonction à un autre point de chargement ou dans une autre zone de la mine. D'autre part, il est important de comprendre qu'un véhicule qui attend entraîne une perte de productivité qu'il soit plein ou vide. Donc le problème principal est de choisir, au moment où une chargeuse navette devient disponible, la tâche qu'il doit accomplir en fonction des besoins en mineraux ou en stérile, mais également en fonction de la facilité que ce véhicule aura à se rendre à la destination, de manière à améliorer globalement l'efficacité des véhicules et par conséquent la productivité d'une opération.

## 2.2 Trois sous-problèmes :

Un système de gestion et de répartition de trafic peut être séparé en trois étapes : répartition, routage et ordonnancement. Chacune de ces étapes remplit un rôle bien précis dans l'affectation d'un véhicule.

### Répartition

Consiste à assigner un véhicule à une tâche

### Routage

Consiste à choisir une route pour l'assignation donnée

### Ordonnancement

Consiste à établir les temps de passage sur les segments de la route choisie

Étant donné que la quantité de routes dans une mine souterraine est limitée, compte tenu des coûts importants que chaque excavation engendre, plusieurs véhicules doivent partager des sections de routes à une seule voie. Ce partage est donc souvent contraint par les conflits qui peuvent survenir entre les véhicules. C'est pourquoi le routage et l'ordonnancement deviennent essentiels et doivent tenir compte, suite à l'assignation (répartition) d'un véhicule à une tâche, de tous les événements potentiels pour choisir une bonne route et évaluer les temps de passage du véhicule sur la route.

## 2.3 Contexte des mines souterraines :

Cette partie du travail classifie les différentes composantes d'une mine en fonction de leur impact sur le transport du minerai ou du stérile. Par exemple, on qualifiera une galerie en fonction de la façon d'y circuler plutôt qu'en fonction de sa forme, ou encore un chantier en fonction de ses points d'accès plutôt qu'en fonction de sa séquence de production. Cette classification permettra de mieux comprendre les besoins et les contraintes associés à notre problème.

### 2.3.1 Provenance et destination

On retrouve une dizaine de types de chantiers différents dans l'industrie, mais nous les qualifierons en fonction de leur moyen d'extraction qui fait varier le mode de manutention (voir figure 2.1 et 2.2):

1. Chantiers avec plusieurs points de soutirage
2. Chantiers à un seul point de soutirage
3. Chambres et piliers

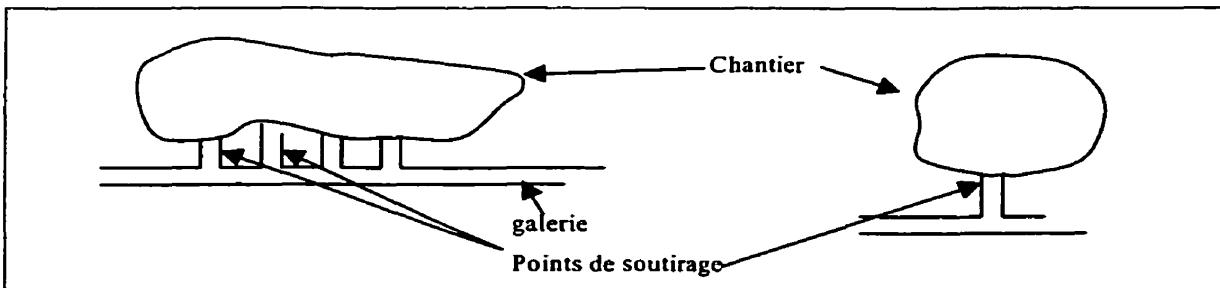


Figure 2.1 Chantier avec points de soutirages

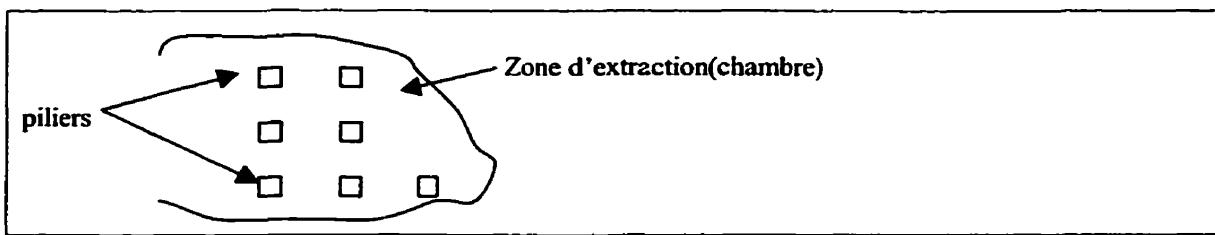


Figure 2.2 Chantier Chambre et piliers

Un point de soutirage est le point d'extraction du minerai. Les différences dans le mode d'extraction sont dues à l'accessibilité du minerai. Dans le cas des chantiers à plusieurs points de soutirage (figure 1), un même type de matériel peut être extrait à différents endroits et au même moment dans un chantier, tandis que dans le cas des chantiers à un seul point de soutirage (figure 2.1), un seul point d'extraction peut être exploité pour un type de matériel. En ce qui concerne les chantiers de type chambre et piliers, la notion de point d'extraction n'est plus aussi importante, étant donné que l'accès au gisement se fait horizontalement et que plusieurs faces d'exploitation peuvent être constamment exposées. Quand les chantiers sont de petites tailles, le minerai est extrait comme pour les chantiers à un point de soutirage, tandis que lorsqu'ils sont de grandes dimensions leur exploitation se rapproche de celle des gisements en fosses. Cette ressemblance se voit par les routes de grandes dimensions, par l'espace disponible pour une file d'attente et pour les manœuvres des véhicules, autrement dit l'espace de travail est suffisamment grand pour ressembler à une mine à ciel ouvert. Le développement de galeries et de monteries se fait en utilisant un seul point d'extraction et est considéré comme l'exploitation d'un chantier à un point d'extraction.

Un point de chargement possède une capacité limitée et cette capacité est fonction de la quantité de minerai ou stérile foudroyée. Dans certains cas, le transport est arrêté parce qu'il n'y a plus de matériel à transporter, mais dans d'autres cas, il faut arrêter pour conserver un équilibre de stabilité des parois dans le chantier. De plus, dans la conception d'une méthode de répartition il sera important de considérer les files d'attente pouvant se créer aux points de chargement.

### 2.3.2 Voies et circulation

La circulation dans une mine se fait par des galeries, rampes, monteries ou puits mais encore une fois, ces termes seront classifiés autrement. Deux types de segments peuvent être employés, les segments unidirectionnels et les segments bidirectionnels (voir fig 2.3). Les segments peuvent être à une voie ou deux.

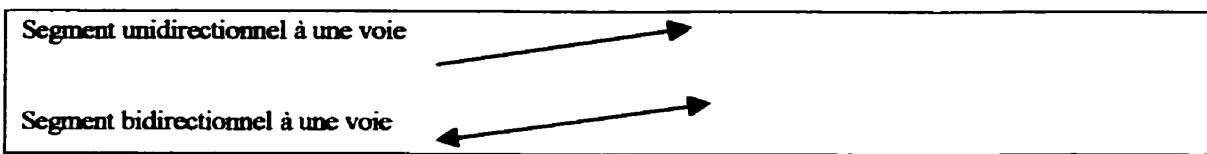


Figure 2.3 Type de segments

Un segment unidirectionnel peut être utilisé à sens unique seulement. Généralement, les segments bidirectionnels sont présents en majorité et même en exclusivité dans les mines. Nous verrons dans la partie suivante du travail, que le contrôle du trafic sur des segments bidirectionnels est plus complexe que sur les segments unidirectionnels.

### 2.3.3 Zones d'évitement

Trois types de voies d'évitement sont considérés, elles servent au retrait ou au positionnement d'un véhicule. Ces points sur un réseau de circulation sont très utiles pour le bon contrôle du trafic, particulièrement dans le cas des segments à une seule voie. Ces trois types sont :

1. arrêt à une intersection : dans ce cas l'évitement n'est pas un emplacement physique, mais une tâche qu'un véhicule doit effectuer à un endroit désigné par le système;
2. baie de sécurité : Une baie de sécurité est une cavité dans la paroi d'une galerie où un véhicule peut s'y réfugier; (voir fig. 2.4)
3. cul de sac : Un cul de sac est à peu près semblable à une baie de sécurité sauf que la façon d'y accéder est différente; (voir fig. 2.4)

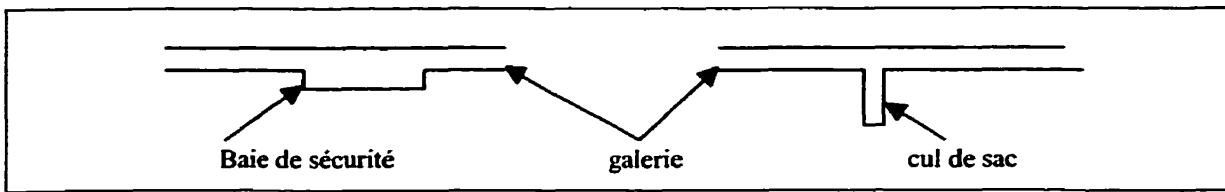


Figure 2.4 Arrêt des véhicules

Les points d'évitement de type cul de sac sont également utilisés pour aligner les véhicules afin qu'ils puissent se présenter aux points de chargement et de déchargement dans la bonne position.

#### 2.3.4 Transport

Le choix du mode de transport à utiliser pour le minerai est attribuable à plusieurs facteurs et constitue en soi un large domaine d'expertise. Trois classes de modes de transport se retrouvent dans l'industrie : le transport par rail, par convoyeurs et par roues. L'attention de ce travail se portera sur la dernière classe qui, à son tour, peut être divisée en deux soit les chargeuses navette et les camions/pelles. Les chargeuses navette seront les véhicules considérés dans le développement de la méthode. Une chargeuse navette peut effectuer à elle seule tout le cycle de transport. Elle peut circuler dans les deux sens sur de longues distances mais devra se présenter avec sa pelle vers l'avant aux points de chargement et de déchargement. Les chargeuses navette étudiées sont considérées automatiques et ne nécessitent pas l'intervention d'un opérateur pour fonctionner.

Comme tout véhicule, les chargeuses navette sont susceptibles de briser et ont besoin d'entretien. La méthode incluse dans le système n'a pas comme objectif de développer un plan d'entretien mais tentera de gérer l'arrêt prévu ou imprévu d'un véhicule en tenant compte de l'influence qu'il a sur le reste des opérations.

Pour chaque chargeuse navette, ses propriétés de base devront être établies. Celles-ci peuvent être très nombreuses mais nous choisirons quelques unes comme la vitesse, la disponibilité et la capacité de transport. Ces données sont propres à chaque véhicule.

## CHAPITRE 3

### Revue de la littérature

Les aspects qui nous intéressent le plus dans la gestion du trafic dans les mines souterraines sont le contrôle opérationnel d'une flotte de véhicules et la répartition des véhicules aux différentes tâches. Les mines à ciel ouvert ont, à l'aide de bons systèmes de répartition, amélioré significativement le rendement global et la productivité des opérations. Le système de répartition est même devenu un outil indispensable de planification. Mais comme nous avons vu, les mines à ciel ouvert et les mines souterraines ont peu de points en commun quand il est question de transport du minerai que ce soit dû aux équipements, au réseau de transport, aux moyens de communication et de suivi ou encore à la disponibilité du minerai. Donc, pour développer une bonne méthode de répartition du trafic et un bon contrôle de la circulation, les travaux faits dans le domaine des véhicules industriels automatiques (V.A) seront aussi utiles que ceux faits pour le transport dans les mines à ciel ouvert.

Cette partie se divise en trois sections, la première section effectue le survol des travaux concernant les systèmes de répartition des mines à ciel ouvert et des mines souterraines et la deuxième section aborde de façon plus détaillée les travaux concernant la répartition et le contrôle du trafic des V.A dans un environnement manufacturier. La troisième section fait un retour sur différentes caractéristiques du problème en les associant à des notions apportées par les articles présentés.

### 3.1 Mines à ciel ouvert

À première vue, l'optimisation de la productivité d'une flotte peut passer par la minimisation du temps d'attente des camions ou des pelles, mais cette optimisation se dévoilera beaucoup plus complexe. Prenons par exemple le cas d'une exploitation à deux pelles, A et B, et de plusieurs camions. La pelle A est très près du concasseur comparativement à la pelle B. Si la procédure d'évaluation du répartiteur est la minimisation des temps de transport, alors la pelle B sera souvent libre tandis que de longues files se formeront à la pelle A. Il s'avère donc complexe d'établir une procédure de répartition qui soit optimale au sens global des opérations, compte tenu du grand nombre de paramètres à considérer. La qualité d'une procédure peut être évaluée selon quatre critères qu'elle doit respecter :

- considérer les temps d'attente des camions et des pelles;
- respecter les contraintes de mélanges des différents types de minerais;
- voir la situation dans son ensemble;
- être exécutable en temps réel par un ordinateur.

Des solutions au problème ont été étudiées par plusieurs chercheurs et continuent de faire l'objet d'améliorations. Dans cette section se trouvent les descriptions des principales procédures de répartition. Ces procédures peuvent être classifiées en deux catégories principales, les heuristiques et les méthodes dites avec plan de production. Les heuristiques sont des méthodes approximatives basées généralement sur un seul critère et qui affecte un seul camion à une seule pelle, tandis que les méthodes avec plan de production sont des méthodes d'optimisation basées sur un plan de production préétabli.

### 3.1.1 Procédures heuristiques

Les heuristiques sont des méthodes non exactes mais qui permettent d'obtenir généralement une très bonne solution en très peu de temps. Dans ce texte, les heuristiques signifient des procédures qui consistent à affecter un camion à une pelle en fonction d'un critère de décision à satisfaire qui peut être la minimisation du temps d'attente des pelles ou minimisation des temps de cycle des camions. Les méthodes heuristiques ne tiennent pas compte des affectations à venir, se concentrant sur un seul camion à la fois. Par exemple, un camion demande une affectation et deux pelles sont disponibles. Si le camion est affecté à la première pelle, on évalue que cette pelle sera inactive durant 3 minutes et si le camion est affecté à l'autre pelle, cette inactivité sera de 5 minutes. Si la règle heuristique de répartition est d'affecter le camion à la pelle dont le temps d'inactivité est le plus élevé alors le répartiteur prendra la décision d'envoyer le camion à la pelle qui sera inactive durant 5 minutes. En fait, il existe plusieurs procédures heuristiques qui ont été évaluées ainsi que plusieurs critères de décision, Munirathinam & Yingling, (1994) en font un excellent résumé.

Il est démontré que ces procédures améliorent la productivité d'une flotte de camions par rapport à un système d'assignation fixe, mais demeurent limitées, car elles ne permettent pas de considérer plusieurs camions à la fois et elles ne peuvent pas considérer plus d'un objectif (critère de répartition) à la fois comme le contrôle des teneurs ou le ratio stérile ou encore la minimisation des temps d'attente. D'un autre côté, et selon Munirathinam & Yingling, (1994), elles deviennent très efficaces dans le cas de grandes opérations où des procédures plus complexes comme les méthodes avec plan de production sont difficilement applicables compte tenu des variations constantes dans les opérations qui doivent être transmises à un modèle mathématique. Ces modèles seront présentés dans la prochaine section.

### 3.1.2 Procédures de répartition avec plan de production

Les systèmes de répartition de trafic avec plan de production sont composés de deux blocs. Le premier a comme rôle d'établir les besoins statiques en transport et le second permet de répartir les camions en temps réel selon les critères établis par le premier bloc. Quatre méthodes sont présentées soit celle de White & Olson, celle de Bonates & Lizotte, celle de Soumis *et al.* et finalement celle de Li. Pour faciliter la compréhension, certaines méthodes sont divisées et présentées par blocs.

#### White & Olson (Dispatch)

Afin d'établir une séquence de production à court terme, White & Olson ont proposé un algorithme constitué d'une programmation linéaire (bloc #1, (voir plus bas)). Les facteurs que ce problème considère pour établir l'état de l'opération sont :

- disposition géographique;
- disponibilité et taux d'avancement de la pelle pour des conditions en place;
- caractéristiques du matériel de transport;
- besoins du moulin.

Pour satisfaire en temps réel les séquences de production à court terme établies par la résolution du bloc #1, une procédure heuristique est utilisée dans le bloc #2.

#### Bloc #1

Dans le premier bloc, un problème de programmation linéaire (PL) est utilisé pour établir un plan de production. Ce plan de production permet de déterminer le taux de production optimal pour le quart de travail en évaluant le taux d'avancement des pelles, la capacité du moulin et la qualité acceptable. Il permet également de maximiser la production par unité de transport sur un parcours tout en respectant les contraintes de capacité des unités de production.

Afin de permettre certaines modifications non-planifiées à l'horaire de production, un intervalle de contrôle T est créé permettant de s'éloigner à court terme des contraintes

reliées au moulin. Cet algorithme constitue la base du système de répartition ‘DISPATCH’ développé par Modular Mining et utilisé par plusieurs mines dans le monde.

### Bloc #2

Le second bloc du système de White et Olson utilise une procédure heuristique qui a comme but de minimiser les écarts entre la production de la mine et celle planifiée telle que présentée par la solution optimale du programme linéaire obtenue du premier bloc. - L'utilisation d'une procédure heuristique à l'intérieur de la méthode de résolution limite la portée du système. - Cette minimisation des écarts de production est faite en associant le meilleur camion à la pelle la plus en demande. Pour ce, DISPATCH crée deux listes. La première constitue la liste des camions qui doivent recevoir une assignation dans une courte période de temps à venir. La liste est classée en fonction des temps où les camions deviennent disponibles. La seconde liste contient les chemins ou segments qui sont les plus en retard par rapport aux objectifs de production établis par le bloc #1. L'association de la pelle (segment) ayant le temps demandé le plus bas au meilleur camion donne l'assignation. Cette méthode évalue la situation en considérant plusieurs camions et pelles sur une liste, mais n'évalue pas différentes combinaisons de répartition. C'est pourquoi, il n'est pas exact de dire que cette méthode trouve la solution optimale pour chaque camion à être assigné.

Bonates et Lizotte (1988) proposent une méthode semi-automatique plus simple que celle de White et Olson, qui est applicable pour les petites à moyennes opérations. Le programme linéaire est résolu afin de trouver un taux de production optimal. L'objectif est de maximiser la production. Le programme linéaire est généralement résolu une fois par quart de travail et ce, au début du quart. Pour établir le plan de production, on considère quatre contraintes : la première assure que le taux de production ne dépasse pas la capacité du concasseur, la deuxième garantit l'obtention d'une teneur tandis que la troisième contrôle la production de chaque pelle (écart acceptable) et finalement la

dernière contrainte vérifie à ce que la production puisse être accomplie par l'équipement disponible. Sur ce point, le système considère que la production varie linéairement par rapport à la quantité d'équipements. Le modèle permet de dissocier le mineraï du stérile sans toutefois tenir compte de leur qualité.

Le système proposé par Bonates et Lizotte est un système semi-automatique, c'est-à-dire qu'il suggère des solutions à l'opérateur du système qui les accepte ou non. Pour en arriver aux solutions proposées, le système fonctionne par simulation, en tentant, à l'aide de différents critères heuristiques, de se rapprocher le plus possible du plan de production.

Soumis *et al.*(1989) ont développé une procédure mathématique qui se divise en trois étapes :

1. Plan d'équipement
2. Plan d'opération
3. Plan de répartition

Les deux premières étapes constituent le premier bloc, c'est-à-dire le bloc qui détermine le plan des opérations. Le plan d'équipements, se servant du nombre de camions, de la position des pelles, des teneurs aux pelles et d'autres positions clés, évalue les différentes possibilités de positionnement et de production des pelles par rapport au matériel disponible. De cette évaluation, dix solutions sont présentées à l'écran du répartiteur suggérant le tonnage et la position des pelles pour une période de travail. Suite à la décision du répartiteur, le système exécute le plan d'opérations qui génère des objectifs plus réalistes en déterminant la production de chaque pelle et les meilleurs chemins à utiliser. Pour ce, il prend en considération le nombre de camions et la position des pelles. Comparativement aux autres méthodes, l'optimisation se fait par programmation non-linéaire. Les méthodes non-linéaires permettent des combinaisons de production qui ne se situent pas aux extrêmes des ensembles de possibilités.

La fonction objectif de la procédure de répartition minimise la somme des différences carrées entre les temps moyens d'attente des camions et des pelles tels que calculés par le plan de répartition. Le plan de répartition calcule les temps morts des pelles et des camions en ajustant constamment les différents temps de cycle. Comparativement à la méthode de White et Olson qu'utilise DISPATCH, cette méthode évalue la meilleure combinaison de répartition pour un ensemble égal en camions et en pelles en utilisant un problème d'affectation. L'ensemble des camions comprend le camion à affecter ainsi que ceux qui le seront dans un avenir rapproché. Compte tenu de la nature du problème d'affectation, cette méthode ne permet pas d'assigner plus d'un camion à une pelle à l'intérieur de l'ensemble. Toutefois, Soumis et al. n'appliquent pas la solution dans sa totalité, c'est-à-dire qu'ils considèrent uniquement l'affectation du camion à affecter et remettent en cause les autres affectations dans le prochain problème d'affectation. Cette procédure qui intègre plusieurs camions dans la décision de répartition permet également de tenir compte des derniers changements d'état des éléments d'opération dans la mine et d'ajuster les futures affectations en conséquence.

Ces méthodes permettent de prendre en considération une foule de facteurs qui rendent les opérations à ciel ouvert plus performantes. Mais comme il sera démontré dans la section suivante ces facteurs ne sont pas les mêmes que ceux retrouvés dans les mines souterraines.

### 3.2 Mines souterraines

Les méthodes de répartition qui viennent d'être présentées ont différents niveaux de sophistication. Dans le cas des procédures avec plan de production, une solution offrant une vision globale de l'environnement, permet d'être atteinte comparativement aux règles heuristiques qui évaluent le rendement d'un véhicule à la fois. Toutefois

l'environnement des mines souterraines est, comme expliqué plus haut, très différent de celui des mines à ciel ouvert. C'est pourquoi les systèmes de répartition pour les mines à ciel ouvert n'ont pas à faire de gestion de trafic, de routage et d'ordonnancement, pour affecter un véhicule à un point de chargement, assumant que le chemin le plus court entre le point d'affectation et la destination est libre et ne sera pas une source de conflits. Par conséquent les systèmes les plus performants, soit les systèmes avec plans de production ne peuvent être appliqués intégralement aux mines souterraines. Toutefois adapter les critères élaborés dans ces méthodes, comme le respect des contraintes de mélange, serait favorable pour la méthode développée.

Les travaux portant sur les système de gestion et de répartition dans les mines souterraines sont peu nombreux ou simplement descriptifs. Toutefois les travaux faits par Vagenas sont intéressants et probablement les plus évolués dans le contexte des mines souterraines.

Nikos Vagenas (1991) a abordé la question de l'affectation de véhicules chargeuses navette au moment où Kim et Tanchoco (1991) développaient leur méthode d'affectation de V.A sans conflits sur un réseau à segments bidirectionnels. Vagenas traite le problème des RAL (*remote-controlled/automatic LHD*) qui circulent automatiquement dans la mine mais qui nécessitent l'intervention d'opérateur pour effectuer le chargement et le déchargement du minerai. Il utilise la méthode du chemin le plus court pour choisir la destination et contrôle les conflits sur le réseau à l'aide de différents algorithmes.

La méthode d'affectation présentée dans l'article de N. Vagenas, est la mieux adaptée aux mines souterraines. Il est important de tenir compte que cette méthode est développée pour les véhicules à circulation automatique. Pour ce, la méthode prend en considération les relations que les véhicules peuvent avoir entre eux. Le développement

de sa méthode de répartition passe par deux modules. Le module de choix de route est constitué des algorithmes du plus court chemin, de vérification de ralentissement, de résolution des conflits dans les segments bidirectionnels et l'algorithme de traverse d'une zone de trafic. Le module de répartition, quant à lui, est l'algorithme de sélection de destination utilisant des procédures heuristiques. Toutefois dans la sélection d'une méthode heuristique de répartition la solution proposée n'est pas nécessairement une solution optimale.

Le travail de Vagenas peut être extrêmement utile dans la définition des contraintes des mines souterraines et sera un bon outil de base dans les travaux de définition d'une méthode de répartition. Le module de représentation des activités est bien défini. Une des faiblesses de la méthode de Vagenas est l'ajout d'algorithmes pour le contrôle des conflits au lieu de les incorporer directement dans le modèle.

Les travaux de Vagenas se sont ensuite dirigés vers la simulation d'opérations minières. À l'aide de ses simulations il peut vérifier l'efficacité de la méthode développée et quantifier l'amélioration apportée. La simulation permet également de répondre à des questions importantes dans le design d'infrastructures par exemple:

1. À partir des infrastructures d'une mine, combien de RAL sont nécessaires pour satisfaire une production donnée?
2. À partir des infrastructures d'une mine, combien de RAL peuvent fonctionner sans créer de congestion?
3. À partir des infrastructures d'une mine, combien d'opérateurs sont nécessaires au bon fonctionnement des opérations de chargement?

La simulation est à mon avis un outil indispensable à validation d'une méthode de répartition. Dans ce cas, la simulation a été réalisée afin de vérifier la possibilité de transformer une section de la mine en y intégrant des RAL, plutôt que pour vérifier l'efficacité de différentes procédures de répartition. Les éléments et les contraintes

utilisées pour effectuer la simulation sont très près de la réalité d'une opération, mais ne font pas l'objet de validation sur le terrain (opération qui serait sûrement très coûteuse).

### 3.3 Systèmes manufacturiers : V.A

Les technologies développées pour les mines à ciel ouvert ne sont pas applicables directement aux mines souterraines, et les travaux portant sur les mines souterraines sont peu nombreux, il est donc important d'identifier les éléments à compléter ou à modifier de ces systèmes. Comme il est mentionné dans la section précédente, aux procédures de répartition, doivent être additionnées des procédures de choix de routes et de contrôle du trafic. Pour ce, les systèmes de gestion et de répartition de trafic développés pour les V.A seront très utiles car ils traitent les trois aspects qui nous concernent soit la répartition, le routage et l'ordonnancement.

Egbelu et Tanchoco (1984) furent des premiers à tenter d'améliorer le rendement d'une flotte d' V.A d'un point de vue opérationnel plutôt que par l'amélioration individuelle des véhicules. Cet article était orienté vers les performances des différentes procédures assignant un véhicule à la fois sans considérer l'effet de l'affectation sur le reste de la flotte. Les procédures testées sont des procédures heuristiques basées sur des critères de distance, temps de parcours ou d'attente. En effet, cet article ne traite pas de la gestion des conflits durant le transport des unités de production. Également dans la conception du réseau seuls les segments unidirectionnels furent employés. Par contre ces travaux allaient influencer plusieurs autres recherches.

Egbelu et Tanchoco ont évalué différentes procédures de répartition et les divisent en deux catégories qui se rapportent aux états du système.

1. Tous les V.A sont disponibles et une tâche doit être effectuée : quel V.A devra réaliser la tâche compte tenu de sa position actuelle, de sa distance et de son temps d'exécution?

2. Les V.A sont tous en opération et plusieurs tâches doivent être satisfaites : suite à l'exécution d'une tâche quelle demande sera remplie par quel V.A compte tenu de l'ordre des priorités dans lequel les tâches doivent être effectuées, de la position des V.A et des points d'opérations à visiter, des distances et des temps d'exécution?

Dans cet article, ces deux points sont traités séparément, la situation #1 ayant comme titre ‘assignation au centre de production’, c'est-à-dire : pour un véhicule qui se libère, quelle tâche doit-il effectuer compte tenu de toutes les demandes et la situation #2 ‘assignation au véhicule’, c'est-à-dire : pour tous les véhicules qui sont libres, lequel doit répondre à la demande envoyée. D'où les deux types d'assignments possibles et quelques heuristiques permettant d'affecter un véhicule à une tâche.

Tableau 3.1 Critères d'affectation heuristiques

Assignation par les centres de production	Assignation par les véhicules
<b>Centre aléatoire</b> : la tâche à effectuer par un véhicule est choisie aléatoirement	<b>Véhicule aléatoire</b> : le véhicule est choisi aléatoirement pour effectuer la tâche
<b>Centre le plus près</b> : la tâche à effectuer par un véhicule est choisie en fonction de la plus courte distance entre elle et le véhicule	<b>Véhicule le plus près</b> : le véhicule choisi est celui le plus près de la tâche à effectuer.
<b>Centre le plus loin</b> : la tâche à effectuer par un véhicule est choisie en fonction de la plus longue distance entre elle et le véhicule	<b>Véhicule le plus loin</b> : le véhicule choisi est celui le plus loin de la tâche à effectuer.
<b>Premier arrivé premier servi modifiée</b> : la tâche à effectuer par un véhicule est choisie en fonction du moment d'exécution le plus tôt parmi les véhicules	<b>Véhicule ayant attendu le plus</b> : le véhicule choisi est celui qui a attendu le plus longtemps
<b>La file d'attente la plus longue</b> : la tâche à effectuer par un véhicule est choisie en fonction de l'endroit où le nombre de tâches en attente est le plus élevé	<b>Véhicule le moins utilisé</b> : le véhicule choisi est celui le moins utilisé
<b>Temps d'arrivée de l'unité de production</b> : la tâche à effectuer par un véhicule est choisie en fonction du moment le plus court où cette tâche sera complétée	

Le réseau utilisé a été modélisé à l'aide de segments reliant les centres de production (nœuds). Les segments sont de type unidirectionnels, ce qui diminue les possibilités de problèmes de contrôle de trafic. Une évaluation des performances des différentes

heuristiques indique que le rendement global varie en fonction du type d'assignation employée.

Les trois prochains articles se concentrent sur l'amélioration du rendement par la mise en place d'un réseau de circulation à segments bidirectionnels plutôt que sur les procédures de répartition. La mise en place d'un réseau à segments bidirectionnels est essentielle pour notre projet, les routes des mines en sont presque exclusivement composées.

Par leur recherche, Egbelu et Tanchoco (1986) venaient de démontrer qu'il est possible d'améliorer le rendement global d'une flotte de véhicules par une bonne stratégie d'assignation des V.A aux différentes tâches. Par contre d'autres améliorations pouvaient être apportées dont le remplacement des segments unidirectionnels par des segments bidirectionnels. Ce changement engendre différents problèmes dont le contrôle des véhicules aux intersections. Quelques stratégies pour résoudre ce problème sont présentées.

L'article aborde deux problèmes causés par le remplacement des segments unidirectionnels par des segments bidirectionnels : la configuration du réseau et le contrôle du trafic. Ce deuxième point est particulièrement intéressant, amenant les auteurs à dresser différentes stratégies pour résoudre le problème de conflits aux intersections.

La gestion du trafic aux intersections se complexifie beaucoup avec la mise en place d'un réseau à segments bidirectionnels. Si un seul véhicule se présente à une intersection, la situation est triviale, mais si plus d'un véhicule s'y présentent, alors une liste des priorités doit être établie. Cette liste suit l'ordre des affectations. Une situation

plus complexe à gérer est la rencontre de deux véhicules à une intersection dont le parcours est le même mais inversé. Dans ce cas des règles de priorités et d'évitement doivent être employées.

Pour évaluer l'impact des segments bidirectionnels dans le design d'un réseau, les auteurs procèdent par simulation. La simulation d'opérations a été modélisée en utilisant des segments unidirectionnels dans un premier temps, puis des segments bidirectionnels. L'utilisation des segments bidirectionnels a démontré qu'à l'intérieur d'une même période de temps, la quantité de tâches effectuées pouvait être augmentée de 60% à 99% dépendant du nombre de véhicules en opérations. Plusieurs façons peuvent être utilisées pour quantifier l'amélioration de la productivité due à l'utilisation de segments bidirectionnels. Mais avant d'entreprendre la transformation de segments il est important d'évaluer l'utilisation de ces segments, le niveau de congestion du réseau, la quantité de zone de retraits et autres facteurs pouvant faire varier l'efficacité de la flotte sur le réseau.

L'utilisation de segments bidirectionnels présente de nombreux avantages quant à l'amélioration de la productivité et se montre essentielle pour la création d'un système appliqué aux mines souterraines. Par contre, cette nouvelle configuration du réseau engendre une augmentation des conflits sur les segments et aux intersections ce qui complexifie beaucoup le contrôle du trafic multipliant les règles de contrôle. Il faut maintenant voir comment il serait possible d'améliorer le rendement global par un meilleur contrôle du trafic. L'objectif visé demeure l'affectation optimale des véhicules c'est pourquoi il faut prendre en considération l'effet du trafic sur l'ensemble de la circulation.

L'évolution du système d'affectation des V.A dans un environnement industriel a profité beaucoup de l'implantation de segments bidirectionnels en substitution aux segments unidirectionnels. L'article par Chang W. Kim et Jose M. A. Tanchoco (1991) généralise le problème en présentant une méthode qui permet d'établir des itinéraires les plus courts qui ne causent pas de conflits entre les véhicules. Il traite de routage et de d'ordonnancement considérant qu'une assignation est donnée. En plus cet article permet de bien comprendre le problème dans son ensemble étant donné qu'il traite en même temps les conflits aux intersections, sur les segments unidirectionnels ou bidirectionnels. La méthode de résolution détermine dans un premier temps un graphe de fenêtres de temps. Dans ce graphe, chaque nœud représente une fenêtre où un segment est disponible (libre) et chaque arc indique un lien possible entre deux segments, c'est-à-dire les deux segments peuvent être empruntés successivement. Tout chemin dans le graphe représente un itinéraire sans conflit pour le véhicule à assigner. L'itinéraire est par la suite déterminé en utilisant la méthode du chemin le plus court développée par Dijkstra.

L'algorithme proposé dans cet article prend en considération l'état du trafic pour calculer le chemin le plus court sans conflit à l'intérieur d'un réseau à segments bidirectionnels. Chaque nœud possède une table des temps d'entrées et de sorties pour chaque véhicule. Ces intervalles de temps sont réservés exclusivement aux véhicules désignés tandis que le temps non occupé est disponible pour les véhicules à assigner. Les affectations sont faites vers les intervalles de temps disponibles plutôt que vers les nœuds physiques. Pour connaître la disponibilité des segments entre les intervalles de temps disponibles, les auteurs introduisent le concept du graphe de fenêtres de temps. Les nœuds de ces graphes représentent les fenêtres de temps disponibles et les arcs représentent l'accessibilité à ces nœuds.

À la fin de l'article les auteurs suggèrent quelques améliorations qui peuvent être apportées à leur méthode. Ces suggestions sont la recherche A\*, la possibilité d'avoir plus d'un véhicule à une intersection et la réassignation en cas de retard.

La méthode présentée dans cet article est extrêmement intéressante en ce qui concerne la détection de conflits et l'ajustement des parcours en fonction de ces conflits. Le développement de l'algorithme pour les segments bidirectionnels rapproche la méthode de la réalité des parcours des V.A et la rend adaptable aux réseaux routiers des mines souterraines. Par contre, les variations de temps de cycle dans les opérations souterraines ne permettent pas de planifier si facilement l'exécution des tâches. Pour ce, un ajustement constant des fenêtres de temps devrait être fait en fonction du déroulement réel des opérations.

Dans l'article d'Egbelu et Tanchoco (1984) il a été question de différentes règles de répartition. Les autres articles présentés jusqu'à maintenant, portaient plus particulièrement sur le choix d'une route en fonction des conflits que crée la flotte de véhicules à l'intérieur d'un réseau à segments bidirectionnels versus unidirectionnels. Pour ce, le chemin le plus court avec fenêtres de temps s'est avéré une excellente méthode de résolution. Dans l'article de Sabuncuoglu et Hommertzheim (1992), un algorithme de répartition dynamique des V.A est présenté tout en effectuant un bon survol des approches pouvant être employées. L'essentiel de l'algorithme porte sur le choix de l'affectation à prendre en fonction des différents besoins qu'un centre manufacturier peut avoir. L'algorithme évalue successivement, à l'aide de plusieurs règles heuristiques, les besoins du système par des critères préétablis.

La capacité des files d'attente avant ou après le traitement à une machine est limitée, d'où la provenance de certains problèmes que Sabuncuoglu et Hommertzheim décrivent très bien soit le blocage partiel et le blocage total. Le blocage partiel survient quand la capacité des files d'attente aux machines, après le traitement, est pleine, et le blocage total survient quand le système devient assez engorgé pour que plus aucune circulation ne soit possible.

Il est important de faire la différence entre les approches au problème de répartition. Voici la description des deux approches (« *On-line* » et « *Off-line* ») présentées par les auteurs ainsi que l'explication de celle qu'ils ont utilisée.

‘Off-line’ : Toutes les tâches sont planifiées pour la période de production à venir.

‘On-line’ : Les tâches sont planifiées à mesure qu’elles surviennent.

Selon la classification présentée, la méthode développée par les auteurs est qualifiée de ‘on-line’.

Dans l'article de Egbelu et Tanchoco (1984), il était question de règles d'assignation par centre de production quand un véhicule avait à choisir entre différentes tâches à accomplir, ou d'assignation par véhicule, quand tous les véhicules sont libres et qu'une tâche est à accomplir. Sabuncuoglu et Hommertzeim incluent dans leur algorithme des ensembles de procédures pour chacun de ces cas.

Quand un V.A complète une tâche, le système d'assignation doit le diriger vers une autre tâche. Voici les types de logiques et leur ordre des priorités évaluées par l'algorithme (l'objet en fabrication ayant à circuler d'un centre de production à un autre avant d'être complété sera référencé comme 'Unité de production'):

- Identification des centres de production dont les files d'attentes sont pleines ou en blocage partiel:

Une unité de production complétée et encore dans la dernière file d'attente

Une unité de production au centre le plus en demande

Une unité de production dont la file d'attente du centre suivant est la plus courte

Une unité de production ayant l' V.A libre le plus près

Une unité de production ayant le moins de travail restant

- Identification des files d'attente dans les zones d'évitement (‘buffers’)

Unité de production ayant la plus petite file d'attente à venir

- Identification des centres de production libres

### **Le centre de production le plus près**

**Une unité de production ayant le temps le plus court avant la complétion de sa tâche**

- Identification de l'unité de production et du centre de production le plus approprié (cette situation survient quand les zones d'évitement sont libres et qu'aucun centre de production n'a de file d'attente considérée comme critique)
  - Une unité de production qui attendra le moins au centre suivant
- Identification de l'unité de production à machiner à l'intérieur d'un centre de production
  - Une unité de production qui attendra la moins au centre suivant.

La méthode développée par Sabuncuoglu et Hommertzheim en établissant les priorités qui doivent être considérées par le système permet d'augmenter le rendement des opérations tout en minimisant les possibilités de problèmes de blocage partiel et total. Par contre le modèle utilisé emploie un réseau à segments unidirectionnels, ce qui, à prime abord, limite les possibilités d'optimisation globale du système.

L'article de Krishnamurthy, Batta et Karwan (1993) porte sur le choix d'une route qu'un V.A peut prendre lorsqu'on lui assigne une tâche. Les auteurs présentent une méthode qui s'applique aux réseaux à segments bidirectionnels comparativement aux réseaux unidirectionnels. La méthode de choix de route développée se base sur une procédure de génération de colonnes où le générateur de colonnes est un problème de plus court chemin avec des contraintes de fenêtres de temps utilisant des règles heuristiques.

Krishnamurthy, Batta et Karwan définissent un graphe  $G=(V,E,\Delta)$  constitué de nœuds, d'arcs et de relations de jonctions entre les segments. Ils donnent quelques définitions très utiles à l'étude du problème.

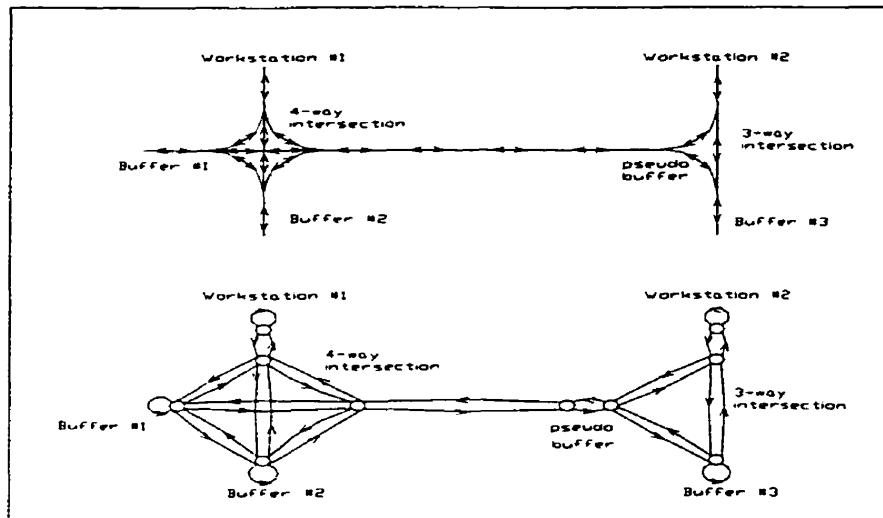


Figure 3.1 Modélisation d'intersection [ref : Krishnamurthy *et al.*, 1993]

Les intersections de la figure 3.1 incluent un ‘buffer’ (zone d’évitement), un pseudo-buffer et une ‘Workstation’ (point de chargement ou de déchargement). La différence entre un ‘buffer’ et un ‘pseudo-buffer’ est que le ‘buffer’ est un segment de route qui se situe en dehors du réseau principal où un véhicule peut attendre que la voie principale se libère, tandis que le ‘pseudo-buffer’ se situe à l’intérieur du réseau principal. La définition des relations entre les segments est très importante pour empêcher que les véhicules effectuent des opérations non conformes comme le changement subi de direction.

Pour développer leur méthode de choix de routes sans conflits, Krishnamurthy, Batta et Karwan utilisent une technique de génération de colonnes où le sous-problème est un plus court chemin avec fenêtres de temps dans le but de minimiser le ‘makespan’, soit le temps nécessaire à terminer l’ensemble des tâches. La méthode développée permet d’éviter le blocage partiel. Dans la formulation du problème maître, les variables (colonnes) utilisées sont les routes pour chaque V.A qui elles sont générées par le sous-problème.

La procédure de génération de colonnes est une méthode de décomposition utilisée lorsque le nombre de variables est très grands (centaines de milliers). Cette méthode est constituée de deux éléments principaux : un problème maître et un ou des sous-problèmes. Le rôle du ou des sous-problèmes est de générer des colonnes (variables) pour le problème maître. Dans le présent contexte, les colonnes sont des routes possibles pour chaque V.A. Ces routes sont générées sans tenir compte de possibles conflits entre les véhicules. C'est alors le rôle du problème maître de gérer ces conflits. Le problème maître est un programme linéaire. Parmi les contraintes du programme linéaire, un bloc de contraintes sert à vérifier que l'ensemble des routes choisies est libre de conflits. La fonction objectif du problème maître consiste à minimiser le « makespan » total des routes choisies. Le sous-problème est un algorithme basé sur celui de Dijkstra, mais il permet d'éviter les conflits.

La procédure de génération de colonnes débute avec le choix de routes sans conflits pour chaque V.A, à l'aide du sous-problème appelé séquentiellement. Une fois que cette solution initiale est générée, elle est intégrée dans le problème maître qui est résolu jusqu'à l'optimum. Les variables duales de cette solution optimale sont renvoyées vers le sous-problème de façon à modifier les coûts des arcs. Le chemin le plus court représente une route possible, donc une nouvelle variable hors base pour le problème maître. Le coût de ce chemin représente le coût réduit de la variable. Ainsi le plus court chemin trouve la variable hors base dont le coût réduit est le plus petit. Si ce coût réduit est négatif, alors le nouveau chemin constitue la variable entrante dans le problème maître et de ce fait la solution du problème maître n'est plus optimale. Sinon la solution actuelle du problème maître représente la solution optimale du problème à résoudre.

Dans l'évaluation de leur méthode Krishnamurthy, Batta et Karwan ont utilisé trois réseaux différents dont deux utilisés par Egbelu et Tanchoco (1986). Le nombre d' V.A

variait selon les réseaux et pouvait atteindre 9 unités. Le nombre de demandes à traiter était soit une ou deux fois le nombre d' V.A.

Avec leur méthode de choix de routes se basant sur la résolution d'un plus court chemin avec fenêtres de temps utilisant des règles heuristiques, Krishnamurthy, Batta et Kawan ont obtenu des solutions qui étaient 25% des fois optimales dans un temps raisonnable. Cette méthode se montre efficace dans le choix des routes sur un réseau à segments bidirectionnels. Des simulations ont été produites et présentées dans l'article. Le réseau utilisé est constitué de 188 nœuds, deux intersections à quatre voies, 2 intersections à 3 voies, 10 stations de travail, 20 buffers et 24 pseudo-buffers. Les simulations produites pour 6, 7, 8 ou 9 V.A ont obtenu des solutions optimales en des temps allant de 9 à 732 secondes. Par contre la solution heuristique initiale, qui est optimale dans 25 % des cas, est obtenu au minimum en 1,1 seconde et au maximum en 11,1 secondes.

Jusqu'à présent, les articles résumés portaient soit sur la répartition de véhicules ou sur le choix de routes en fonction des contraintes de circulation. L'article de Langevin *et al.* (1994) aborde le problème d'une autre façon en trouvant une solution optimale au problème incluant à la fois la répartition, le choix de route et la détermination d'itinéraires (répartition, routage et ordonnancement) au lieu de combiner deux ou trois problèmes comme faits dans les articles précédents. La méthode développée permet de trouver une solution optimale pour deux V.A sur un horizon de temps déterminé. Dans la résolution du problème, la méthode du chemin le plus court avec fenêtres de temps est utilisée pour les opérations de choix de route et de détermination de l'itinéraire. La solution finale du problème est déterminée à l'aide de la programmation dynamique.

L'objectif principal de la méthode développée par Langevin *et al.* résolvant ces trois parties est de répondre aux demandes à l'intérieur d'un temps le plus court possible. Les

demandes consistent au transport d'unités de production d'un centre à un autre, mais peuvent également être le transport d'outils ou l'entreposage.

Dans la résolution du problème principal, la résolution d'un problème du plus court chemin avec fenêtres de temps est utilisée pour les opérations de choix de routes et de détermination de l'itinéraire. La répartition des tâches se fait à partir de routes ne causant pas de conflits de circulation. Ces routes sont déterminées sur un réseau à segments bidirectionnels. La vitesse des véhicules est assumée constante. La solution finale du problème est déterminée à l'aide de la programmation dynamique.

Comme l'horaire de production est connu pour une certaine période, des tâches doivent être effectuées à l'intérieur d'intervalles de temps. Le réseau comprend les nœuds qui sont les points de contrôle et les segments auxquels sont associés des coûts proportionnels au temps de transport.

La méthode de Langevin *et al.* fonctionne de façon itérative en améliorant un plan partiel de transport jusqu'à l'obtention d'une solution finale. Un plan partiel de temps de transport est un horaire et une route pour chaque véhicule satisfaisant un sous-ensemble des tâches à accomplir. Les itérations consistent à ajouter une tâche à chacun des véhicules créant deux nouveaux plans partiels de transport. À ces plans de transport est appliqué l'algorithme du chemin le plus court avec fenêtres de temps pour détecter les conflits de circulation. Si aucun conflit n'est détecté, alors un nouveau plan partiel de transport est trouvé, sinon une des deux routes est gardée fixe pendant que l'autre est modifiée. L'algorithme utilisé pour résoudre le problème de plus court chemin avec fenêtres de temps est celui développé par Desrochers et Soumis (1988). Les fenêtres de temps sur les nœuds et segments sont déterminées à partir des intervalles d'occupation. Donc la méthode est basée sur l'énumération de plans partiels de transport à l'aide de programmation dynamique.

Dans sa notation, l'état d'un véhicule comprend dans l'ordre, les tâches que le véhicule doit effectuer et les routes utilisées pour effectuer ces tâches. Comme la méthode engendre une quantité astronomique d'états possibles, une procédure d'élimination d'états et de ses nombreux successeurs a été développée et procède par des tests de dominance. Un état S1 domine un autre état S2 s'il peut être démontré que tout successeur de S2 peut être associé à un successeur de S1 qui est équivalent ou meilleur. L'état dominé S2 peut être éliminé. Trois tests de dominance sont présentés. Chacun des tests compare deux états différents:

- 1 Redondance: Si deux états sont semblables alors un seul des deux reçoit un successeur. Des états semblables ont la même série de tâches, le même temps de complétion et la même position finale.
- 2 Dominance 1: Si l'état\_Sa comprend les mêmes tâches que l'état\_Sb et que le véhicule k peut partir de la position finale de l'état\_Sa et se rendre à la position finale de l'état\_Sb et arriver avant, alors l'état\_Sb est éliminé.
- 3 Dominance 2: Si l'état\_Sb est plus grand que l'état\_Sa, qui est optimal, et que les mêmes tâches sont effectuées, alors l'état\_Sb peut être éliminé.

En cas d'arrêts sur le réseau, de modification des tâches ou d'expiration de la période planifiée, l'algorithme est appelé et la situation est réévaluée. La période planifiée dépend des caractéristiques de l'environnement de travail. Plus la période est courte plus l'algorithme est efficace. Cette caractéristique de la méthode a été facilement démontrée lors des simulations.

Langevin *et al.* proposent une règle heuristique basée sur le schéma de programmation dynamique qui permet de limiter la quantité d'états possibles à évaluer. De cette façon, la solution optimale n'est plus garantie mais une bonne exploration permet de l'atteindre dans la majorité des cas. Tout d'abord l'algorithme évalue les 'n' tâches à venir, ces dernières étant classées par ordre chronologique. Plus 'n' est petit, plus le temps de recherche est court. Cette façon de faire pourrait permettre de considérer plus de deux

V.A. Une autre façon de faire pour limiter le nombre d'états serait d'affecter une nouvelle tâche à un seul véhicule créant ainsi un seul successeur au lieu de deux.

La méthode développée par Langevin *et al.* permet d'obtenir une solution optimale pour la répartition, le choix de routes et la détermination des itinéraires d'une flotte de deux V.A. Dans le domaine des V.A et dans la catégorie des méthodes 'off-line', cette approche est la plus complète, permettant l'affectation des V.A en considérant la situation plus globalement que les autres approches. Par contre, le fait que cette méthode soit 'off-line' limite les possibilités d'adaptation vers l'environnement minier compte tenu des conditions beaucoup trop changeantes des mines souterraines comme les variations dans les temps de cycle. Toutefois, il serait peut-être très pertinent de tester la méthode en utilisant un temps de planification plus court que pour les V.A.

Dans l'article précédent, Langevin et al. nous ont présenté une méthode de répartition, de choix de route, et de détermination d'itinéraires qui permettait une vision globale de l'ensemble du système. Seifert, Kay et Wilson (1998) ont développé une méthode dynamique de choix de routes, basée sur une stratégie hiérarchique de simulation. Selon le niveau de réalisme des simulations, cette approche peut apporter des solutions ayant une vision globale de la situation. Cette méthode appliquée aux V.A prend en considération la présence de piétons dans le réseau et oriente ses décisions en fonction des interactions piétons/ V.A. L'objectif principal de leurs travaux est de comparer le rendement d'une approche dynamique versus une approche statique.

Pour exploiter le potentiel maximal qu'une flotte de V.A peut donner, il faut mettre l'accent sur la flexibilité de ces systèmes, c'est pourquoi Seifert *et al.* présentent une approche dynamique au problème de choix de route pour les véhicules en prenant en considération la congestion sur le réseau. Selon les auteurs, les méthodes analytiques de chemin le plus court avec poids variables sur les segments sont difficilement applicables

sinon impossibles dues à leur complexité. La complexité des calculs provient particulièrement du fait que les poids des segments, en plus d'être variables, sont dépendants les uns aux autres, sur le réseau. Par exemple, la congestion sur un segment est dépendante de celle sur le segment précédent, donc, les segments sont stochastiquement dépendants. Pour ces raisons, une méthode plus réaliste pouvant considérer à tout instant l'état présent du système, doit être développée.

Dans la construction de leur système, Seifert *et al.* utilisent le langage de simulation Slam II combiné avec des routines écrites en C pour simuler certains événements. En accumulant l'information produite lors de chaque simulation, le système peut générer une analyse des facteurs limitatifs. Pour chaque nœud et chaque arc est enregistré toute l'information nécessaire aux analyses soit les temps nécessaires au chargement/déchargements aux nœuds d'entrée et de sortie, les temps de passage, les ralentissements, le nombre de passages de piétons et autres statistiques. Les V.A et les piétons sont représentés par des entités suivant le calendrier des événements en fonction des conditions du système. La modélisation des interactions entre V.A et piétons se fait par blocage de l'une des entités si elles entrent en conflits. Les réactions au blocage se font par une logique pré-déterminée. Les simulations sont vérifiées et validées par la comparaison des activités planifiées et les résultats obtenus.

La méthode statique utilisée comme point de comparaison pour la méthode dynamique, assigne un véhicule à une tâche par le chemin le plus court. C'est la méthode la plus généralement utilisée dans les systèmes de répartition.

Jusqu'à présent, toutes les méthodes présentées autant pour la répartition de véhicules, le choix de routes et la détermination des itinéraires utilisent des graphes comme outils de modélisation. Pour le choix des routes à utiliser, la méthode s'avérant la plus efficace est le chemin le plus court sur un graphe composé de fenêtres de temps représentant les moments où les segments et les nœuds sont disponibles. Dans la composition du graphe,

les conflits pouvant survenir sont pris en considération éliminant ainsi les solutions qui ne sont pas applicables comme par exemple la superposition de deux véhicules ou le croisement dans un segment à une voie.

Toutefois la gestion du trafic et le contrôle de la circulation peut être fait à l'aide de réseaux de Petri. Les méthodes appliquant les réseaux de Petri n'effectuent pas directement l'optimisation du système mais permettent d'effectuer le contrôle du trafic.

Bien que certains auteurs, Yim et Linn, (1993), Lee et Dicesare (1994), Hsieh et Kang (1998), Zeng et Al. (1991) ont utilisé les réseaux de Petri avec succès, nous ne les appliquerons pas car cette approche ne permet pas d'optimiser.

### **3.4 Retour sur les caractéristiques du problème**

Pour élaborer une bonne méthode de répartition, il est important de mettre en évidence les caractéristiques de répartition propres aux mines souterraines pour nous amener à bien poser le problème à résoudre. Cette caractérisation apporte une bonne définition des composantes importantes et permettra d'évaluer de façon objective la méthode qui sera développée. Les caractéristiques qui nous intéressent sont toutes exposées avant d'aborder les méthodes pour résoudre spécifiquement notre problème.

#### **3.4.1 Types de tâches**

Le cycle de transport est composé de quatre étapes: 1) d'abord le véhicule situé à un point de déchargement doit se rendre à un point de chargement, 2) ensuite il se charge de minerai, 3) se rend à un point de déchargement et 4) décharge son contenu. Toutefois le véhicule en question peut se trouver ailleurs qu'à un point de déchargement quand il débute son cycle. Par exemple au début d'un quart de travail le véhicule se situe au stationnement ou suite à une réparation le véhicule se situe au garage.

Les tâches peuvent être considérées de deux façons : soit comme cycle complet de transport ou soit individuellement. L'avantage à considérer les tâches par cycle de transport est que de cette façon la situation peut être vue plus globalement et offre donc plus de possibilités d'optimisation, par contre en les considérant individuellement la précision sur chaque parcours établie est accrue. Mais cette distinction prend plus d'importance dans le contrôle de la circulation car généralement, aller se charger implique qu'un point de déchargement est déjà connu, c'est pourquoi la question sera de savoir s'il faut déterminer l'itinéraire du cycle complet ou de la tâche immédiate à venir.

Dans les mines à ciel ouvert comme dans les mines souterraines les cycles de transport sont indépendants les uns aux autres dans le sens où le point de déchargement est la

destination finale du mineraï. Par contre dans les systèmes de répartition et de gestion du trafic des V.A, une tâche est dépendante aux autres tâches. Par exemple si l'ordre de circulation d'une pièce est ABC, et qu'on veut la faire passer du point B au point C elle a dû auparavant circuler du point A au point B.

### **3.4.2 Différence entre affectation lorsque une tâche apparaît et lorsqu'un véhicule est libre**

Dans le développement de règles de répartition, Egbelu et Tanchoco ont fait la différence entre assignation par centre de production, c'est-à-dire quand un véhicule vient de terminer une tâche et qu'il doit effectuer une tâche demandée, et assignation par véhicule, c'est-à-dire quand tous les véhicules sont libres et qu'une tâche doit être effectuée. Cette distinction peut être comparée au milieu minier. L'assignation par véhicule serait l'assignation de départ quand tous les véhicules sont au stationnement quant à l'assignation par centre de production serait l'assignation qui survient dans le cours normal des activités de production soit quand tous les véhicules sont en fonction.

### **3.4.3 Temps réel**

La notion de temps réel est relativement complexe. Pour l'aborder nous devons présenter deux autres notions bien expliquées par Sabuncuoglu et Hommertzheim soit les assignations on-line et off-line. L'assignation off-line consiste à assigner plusieurs tâches aux véhicules pour une période donnée tandis qu'avec l'assignation on-line, une tâche est donnée quand un véhicule est libre. À ces deux types d'assignations peut être ajouté le qualificatif temps réel . Le temps réel signifie la capacité du système à agir en fonction des conditions du système en constante évolution. Dans le cas d'une assignation off-line cela voudrait dire réassigner les véhicules s'ils dévient de l'itinéraire planifié, tandis que dans le cas d'une assignation on-line cela voudrait dire réévaluer la situation quand l'état du système change par exemple quand une tâche est complétée.

Pour un système de répartition et de contrôle de trafic appliqué aux mines, pouvoir agir en temps réel est essentiel compte tenu de l'aspect stochastique de l'ensemble du système. Par contre le choix entre une approche on-line et une approche off-line est délicat. Voyons ce que les auteurs présentés avaient choisies.

Egbelu et Tanchoco, dans leur premier article, préconisent l'approche on-line, de même que pour Sabuncuoglu et *al.* et Vagenas, par contre Krishnamurthy *et al.* ainsi que Langevin *et al.* ont adopté une méthode off-line qui permet d'établir un itinéraire pour une période donnée en considérant toutes les interactions possibles. Dans les méthodes développées pour les mines les distinctions sont moins claires. Les procédures heuristiques sont on-line, toutefois les méthodes avec plans de production font la combinaison des deux approches en évaluant le travail à effectuer en fonction des objectifs pré-établis pour ensuite affecter les véhicules de façon à respecter le plan de production.

### 3.4.4 Optimisation globale vs optimisation locale

La solution optimale d'un problème est la solution qui, selon les conditions imposées et à l'intérieur du domaine des solutions, offre le meilleur rendement. Compte tenu du caractère stochastique de l'environnement minier, la solution optimale du problème résolu ne garantit pas l'optimalité globale du système. L'optimalité globale du système peut être calculée à l'aide du rendement final d'une flotte de production dans la réalité et peut être divisée en deux sous-problèmes soit la possibilité d'effectuer des retours en arrière et la capacité de considérer un horizon de planification.

Dans les systèmes avec plans de production appliqués aux mines à ciel ouvert, étant donné que plusieurs affectations peuvent être considérées avant de prendre une décision, la situation est vue globalement. Toutefois le système ne revient pas sur le choix des

affectations. C'est également ce que fait la méthode off-line de Langevin *et al.* qui évalue plusieurs tâches à faire et ce, par plusieurs véhicules avant d'arriver au choix final. Par contre comme l'environnement minier change constamment la méthode de Langevin devrait être réévaluée trop souvent.

Le problème principal pour atteindre une solution qui serait globalement optimale est l'évaluation des parcours de transport. Comme nous l'avons vu, quand vient le temps d'affecter un véhicule dans une mine souterraine, il faut lui choisir une destination mais également une route et un horaire de parcours, ce qui se fait en réservant des intervalles de passages sur les nœuds ou les segments que le véhicule devra traverser. Le choix des intervalles doit se limiter à ceux encore disponibles car la réévaluation de tous les intervalles de passages à chaque affectation peut possiblement être trop long pour pouvoir être réalisé à l'intérieur d'une période de temps acceptable. Autrement dit, toutes solutions impliquant la modification des itinéraires déjà établis sont automatiquement éliminées. Voici un exemple qui illustre bien le problème et la perte d'optimalité globale d'une solution pourtant localement optimale.

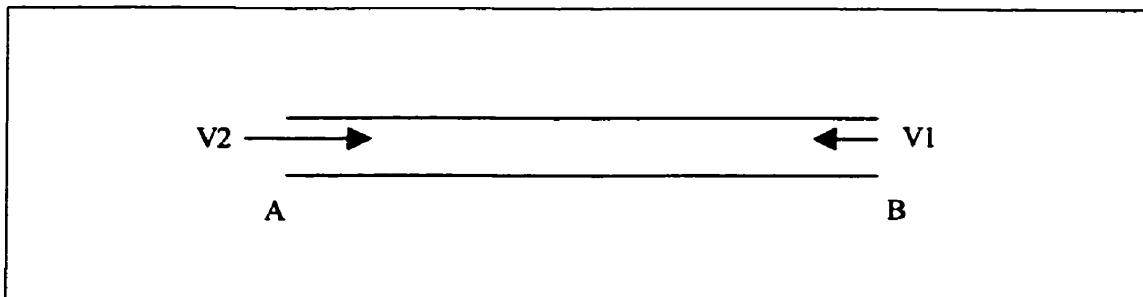


Figure 3.2 Optimalité globale

Le véhicule V1 doit emprunter le segment BA bidirectionnel à une voie, au temps 15 (voir fig. 3.2). Traverser le segment prend 10 unités de temps. Le segment devient occupé par le véhicule V1 de 15 à 25, par contre le segment doit être réservé par le véhicule V1 de 5 à 25 pour éviter les collisions frontales, c'est-à-dire qu'il faut éviter que

tout véhicule entre en A 10 unités de temps avant le départ de V1 en B. Au temps 6, le véhicule V2 reçoit une affectation et doit utiliser le segment AB. Si le segment AB n'était pas occupé par V1, V2 l'utilisera de 6 à 16, mais comme il est réservé pour V1, V2 doit attendre 19 unités de temps au point A et l'utiliser de 25 à 35, pour laisser passer V1 préalablement affecté. Le temps d'attente total des deux véhicules est de 19 unités de temps, soit 0 pour V1 et 19 pour V2. Si une solution globalement optimale pouvait être atteinte, l'itinéraire de V1 aurait été d'attendre 1 unité de temps au point B et d'utiliser le segment de 16 à 26 tandis que le véhicule V2 l'aurait utilisé de 6 à 16 ce qui aurait créé un temps total d'attente de 1 unité de temps comparativement à 19 dans le premier cas. Ceci pourrait être fait en augmentant l'horizon de planification ou en allant modifier les itinéraires déjà planifiés.

### 3.4.5 Types de segments de route

Le réseau de transport d'une mine souterraine est relativement limité par les coûts élevés qu'implique une excavation. Dans les mines à ciel ouvert cette contrainte n'existe pratiquement pas étant donné que les routes sont généralement conçues en calculant trois fois la largeur du camion le plus large. C'est pourquoi les environnements manufacturiers sont utiles permettant de comprendre les interactions possibles sur un réseau de dimension limitée. Les premiers systèmes étaient conçus en fonction de segments unidirectionnels, pour ensuite voir apparaître les systèmes de contrôle pour les réseaux à segments bidirectionnels à une voie. Pour éviter les conflits frontaux ou de ralentissement sur les segments, deux types d'approches sont présentées. La première, la plus utilisée, est de réservé des segments ou des nœuds pour une période. L'inconvénient de cette approche est que si deux véhicules se suivent, le second ne pourra circuler sur le segment tant que le premier ne sera pas complètement sorti du segment. La seconde approche présentée par Kim et Tanchoco permet l'utilisation simultanée d'un segment par plus d'un véhicule. Les conflits sur un segment (i,j) peuvent être détectés en comparant les temps planifiés de traverses aux nœuds i et j. Si l'ordre

d'occupation des fenêtres de temps d'une paire de véhicules allant dans la même direction est inversé, alors il y a conflit quelque part sur le segment (i,j). Par exemple, des véhicules V1 et V2 prévoient traverser un segment (i,j) simultanément et dans le même sens. Pour ce, ils inscrivent leurs temps de passage sur le segment (i,j). Si le temps de passage de V1 au point i est inférieur au temps de passage de V2 au point i alors V1 au point j doit être inférieur à V2 au point j, sinon on peut dire que leurs fenêtres de temps sont inversées et que V2 dépasse V1 dans le segment (i,j).

### **3.4.6 Sens d'une chargeuse navette et types de manœuvres**

Dans les articles présentés un véhicule est considéré comme étant un point circulant de nœuds en nœuds. Par contre bien qu'une chargeuse navette peut circuler dans les deux sens, il doit se présenter pelle première aux points de chargement et de déchargement. Pour ce une chargeuse navette peut manœuvrer à différents endroits, mais doit le faire absolument à une intersection ou à un cul-de-sac. Aucune manière d'inclure cette manœuvre dans l'algorithme principal n'est décrite dans la littérature présentée.

### **3.4.7 Problème de blocage partiel et total**

La capacité des files d'attente avant ou après le traitement à une machine est limitée, d'où la provenance de certains problèmes que Sabuncuoglu et Hommertzeim décrivent très bien soit le blocage partiel et total. Tous les auteurs ayant développé des systèmes de gestion et de répartition de trafic dans les environnement manufacturiers ont eu à faire face à ce problème.

Dans les mines, le blocage est une situation généralement rare et signifierait que les points de déchargement seraient pleins. Dans ce cas, le minerai est dirigé vers une halde. Le blocage total pourrait survenir si tous les véhicules se trouvent coincés dans

un segment à une voie. La situation peut possiblement être évitée par une bonne modélisation du réseau.

### 3.5 Résumé

La partie qui se termine a permis d'effectuer le survol de différentes approches de résolution propres à des problèmes qui sont relativement différents mais dont l'union d'éléments stratégiques permettront d'établir les bases pour le développement d'un système propre aux mines souterraines. Cette partie a également permis de mettre en évidences diverses caractéristiques qui ont ou n'ont pas été traitées par les différents auteurs cités. En somme, après avoir défini les grandes lignes du problème, dans la première partie du travail, puis établi les caractéristiques propres ainsi que différentes approches de résolutions dans cette partie, il est maintenant temps de poser les paramètres propres à notre problème, de présenter le modèle développé ainsi que la méthode résolution pour un système de gestion et de répartition des chargeuses navette dans les mines souterraines.

## CHAPITRE 4

### Méthode

La revue de littérature précédemment exposée décrit plusieurs méthodes et systèmes portant sur la gestion et la répartition de trafic dans les mines et des environnements manufacturiers. La diversité des thèmes et des problèmes abordés est toutefois trop vaste pour être incorporée à l'intérieur d'un seul système de gestion et de répartition de trafic appliquée aux mines souterraines. Suite à la présentation de différents articles, un retour sur les définitions abordées au début du travail identifiant spécifiquement les particularités de notre problème a été exposé.

Dans cette partie du travail, la première section présente les propriétés considérées dans la composition et la résolution du problème est exposée. Ces propriétés permettent d'établir la portée et les limites du système. Ensuite vient la modélisation du problème qui constitue en soi la plus grande partie du travail. Cette modélisation est divisée en deux parties : la première décrit certains aspects spécifiques du modèle et la deuxième présente le modèle dans son ensemble. Finalement, dans la dernière section, les algorithmes de résolution du problème et de construction du réseau sont décrits en plus d'apporter certains détails sur l'implantation du modèle.

#### 4.1 Propriétés considérées

Afin d'aborder les méthodes de résolution du problème de routage, d'ordonnancement et de répartition d'un véhicule circulant dans une mine souterraine, il est important de définir quelles propriétés permettent de représenter le transport souterrain.

Pour répondre aux besoins propres au milieu souterrain, le système développé possède les propriétés suivantes :

- Le système peut gérer plusieurs véhicules à la fois sur le réseau.
- Le système opère selon une approche on-line.
- Le système est en mesure de gérer en temps réel plusieurs demandes d'affectation.
- Le système ne peut pas changer le parcours d'un véhicule une fois la solution obtenue.
- Les véhicules circulent à la même vitesse et ont la même capacité.<sup>2</sup>
- Les temps de passage sur les segments, ainsi que les temps de chargement et de déchargement sont fixes.
- Les véhicules à affecter sont de type chargeuse navette.
- Les véhicules doivent nécessairement se présenter aux points de chargement et de déchargement pelle première.
- Le système décide du meilleur endroit où le véhicule effectue son retournement.
- Un véhicule demande une affectation quand il arrive à un point de chargement ou de déchargement et obtient une solution avant de repartir de ce point.
- La solution renvoyée au véhicule est constituée de fenêtres de temps sur les différents nœuds de son parcours, formant un demi-cycle.
- Les segments du réseau sur lequel circule une chargeuse navette peuvent être occupés par plus d'un véhicule à la fois.
- Le réseau est constitué de segments bidirectionnels à une voie.

---

<sup>2</sup> Il est à noter que cette hypothèse n'est pas contrainte par le modèle mathématique, mais par la structure de donnée choisie pour l'implanter.

- À partir d'un point de chargement, seuls les points de déchargement permis, peuvent être utilisés.
- Une affectation est donnée suivant un critère établi.

Les propriétés qui viennent d'être énoncées forment la base sur laquelle le problème est modélisé. Certaines de ces propriétés peuvent faire l'objet de discussion quant au niveau de réalisme qu'ils permettent au modèle d'obtenir. Par exemple le déterminisme des temps de transport, de chargement et de déchargement, ne correspond pas à l'aspect stochastique que l'on retrouve dans les mines souterraines. Toutefois, il a semblé plus important d'inclure d'autres paramètres comme l'affectation on-line ou l'orientation des véhicules et de développer des techniques de résolution efficaces et flexibles pour éventuellement, dans un travail futur, aborder ces aspects négligés, selon des bases solides. Le modèle permet entre autre d'utiliser des véhicules n'ayant pas à se présenter pelle première ou encore de construire un réseau pour n'importe quel type de mines. Autrement le modèle est utilisé pour certaines de ses possibilités très précises mais est conçu pour traiter des cas plus généraux.

Avant de commencer la description du modèle développé, il serait intéressant de revenir une dernière fois sur l'article de Kim et Tanchoco, compte tenu du fait que cet article s'est montré particulièrement rusé quant à l'approche qu'il utilise pour résoudre le problème de routage et d'ordonnancement de plusieurs véhicules sur un réseau à segments bidirectionnels et ce, à l'intérieur d'une approche on-line. De façon générale Kim et Tanchoco construisent un réseau de fenêtres de temps disponibles pour les nœuds et sans conflits pour ensuite effectuer un plus court chemin d'un nœud source vers un nœud puits. Le réseau doit être reconstruit à chaque fois qu'une affectation est demandée étant donné que l'environnement d'opération a changé et que l'affectation d'un véhicule se base sur l'état actuel des véhicules. Pour éviter les conflits frontaux sans limiter le passage sur les segments à un seul véhicule à la fois, une vérification en croix des fenêtres de temps est faite. (voir 3. Revue de littérature) Plusieurs idées

comme la vérification des conflits et le plus court chemin sur la portion disponible du graphe sont utilisées à l'intérieur du modèle qui suit.

## 4.2 Modélisation du problème : spécificités

Comme il est expliqué dans les propriétés du problème, le graphe doit considérer l'orientation des véhicules, ce qui génère d'importantes différences entre le modèle présenté et celui de Kim et Tanchoco. En plus, lors de la période de développement du système, les problèmes rattachés aux blocages totaux ont été trop importants pour ne pas être considérés directement dans la construction du réseau. Dans cette section, les spécificités de notre modèle sont identifiées point par point.

### 4.2.1 Réseau de base

La représentation d'une mine souterraine se fait à l'aide d'un réseau. Ce réseau est constitué d'arcs et de nœuds. Les nœuds représentent des points stratégiques dans la mine comme des points d'intersection, de chargement ou de déchargement. Les arcs représentent les segments de routes liant ces points les uns aux autres. Prenons la mine de la figure 4.1 et voyons l'allure du réseau qui permet de représenter cette mine. Des explications et une classification des types de nœuds suivent.

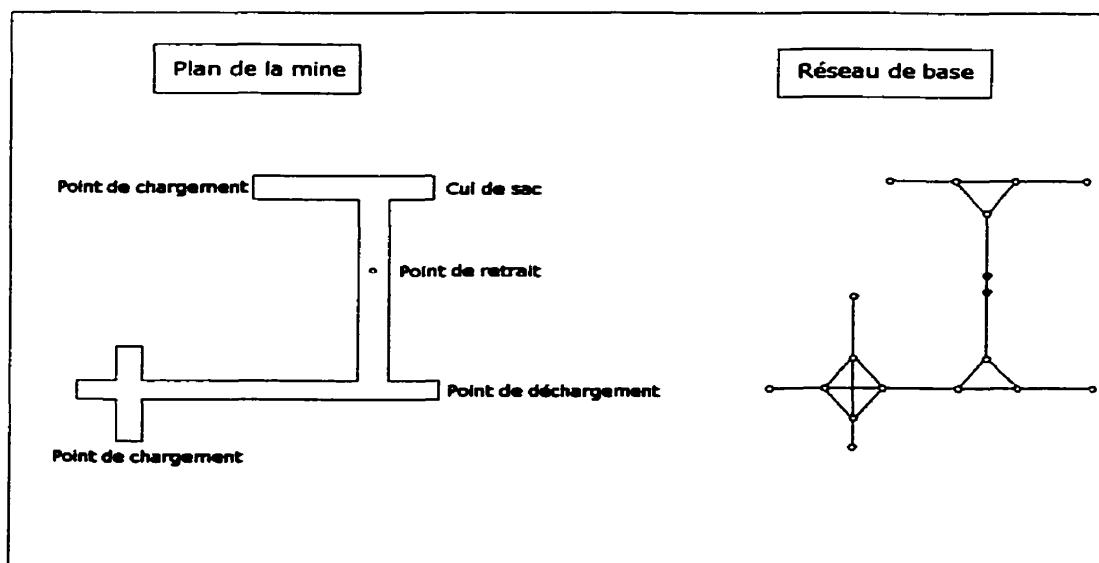


Figure 4.1 Modélisation du réseau de base

Les intersections de la mine doivent être représentées par plusieurs nœuds de façon à permettre à un véhicule d'attendre dans l'une des branches de l'intersection pendant que d'autres véhicules passent par les autres segments. Cette façon de faire a été présentée par Krishnamurthy, Rajan Batta et Mark (1993), or quelques modifications y ont été ajoutées pour le rendre utilisable pour des segments bidirectionnels. Ces nœuds d'intersection jouent un rôle particulier, notamment en ce qui concerne l'orientation des véhicules, c'est pourquoi ils sont considérés différemment et entrent dans la classe appelée nœud d'intersection. La seconde classe de nœuds est constituée des nœuds de sortie ou nœuds de retrait. Comme présenté à la figure 4.1 ces nœuds doivent être dédoublés et ce, de façon à permettre de considérer l'orientation d'un véhicule à l'intérieur même du graphe. (De plus amples détails sont donnés sous le thème « orientation des véhicules ».) La troisième classe de nœuds comprend les nœuds de fond de galerie ou encore de cul de sac. Finalement, il reste les nœuds de chargement et de déchargement qui forment les nœuds source et destination de base.

#### 4.2.2 Orientation d'un véhicule

Un véhicule à un nœud de chargement ou de déchargement, doit changer de sens avant de se rendre à sa destination finale. Partant de ce principe, le réseau sur lequel circule le véhicule est dédoublé en deux niveaux pour former le réseau du haut et le réseau du bas, et ainsi permettre au véhicule de partir du haut pour se rendre au bas ou encore partir du bas pour se rendre au haut, dépendamment de son orientation initiale. Autrement dit, partir d'un niveau pour se rendre vers l'autre signifie qu'il y a eu changement de sens quelque part entre le nœud initial et le nœud terminal, même si ce changement de sens est virtuel. Avant de déterminer les situations où un véhicule change de sens, examinons la figure 4.2 qui permet d'illustrer les cas où un véhicule change de sens. Suivra ensuite une généralisation du phénomène.

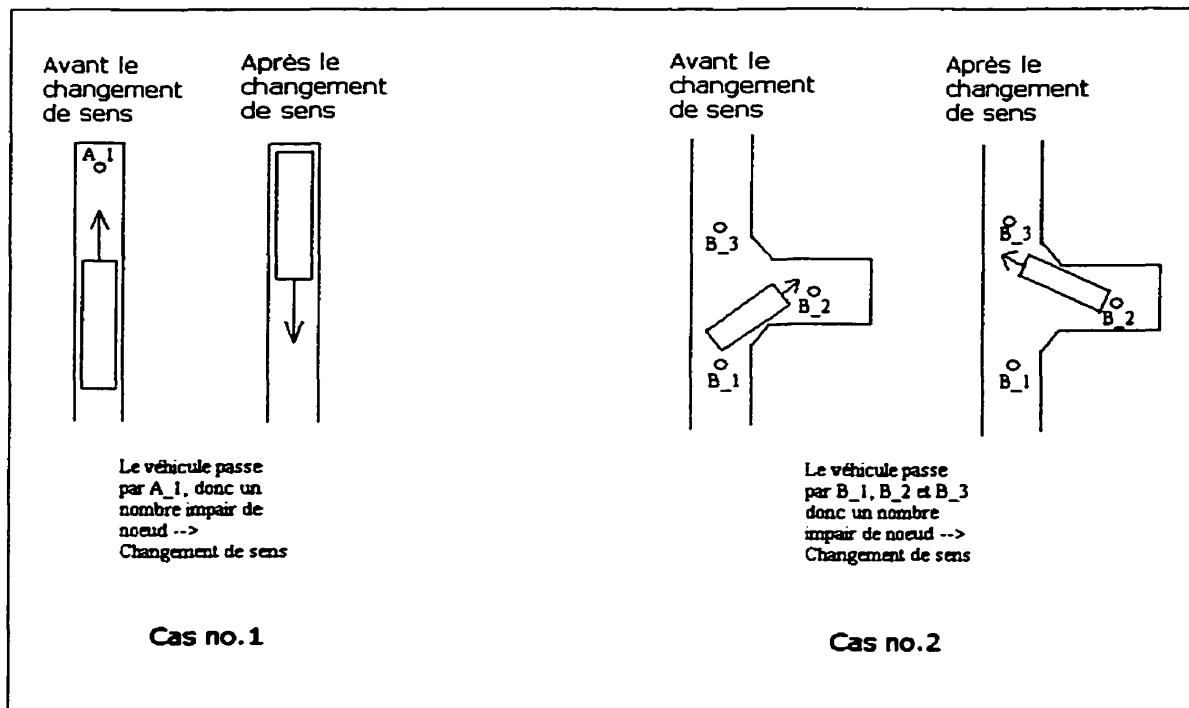
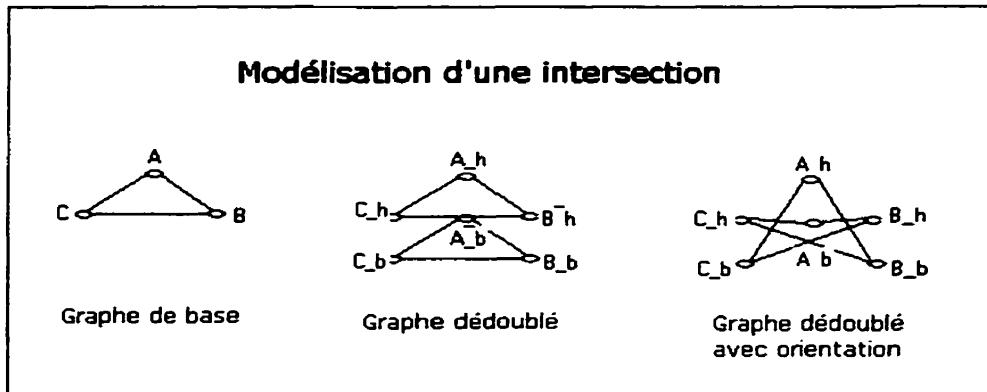


Figure 4.2 Orientation des véhicules

Dans le cas no.1 le véhicule utilise une fois un nœud pour changer d'orientation et dans le cas no.2 le véhicule utilise trois nœuds pour changer d'orientation. En examinant le réseau de la figure 4.2, et en tentant d'observer les situations où un véhicule change de sens, il est clair que chaque fois qu'un véhicule traverse un nombre impair de fois un groupe de nœuds d'une même classe, ce véhicule change de sens. C'est pourquoi tous les arcs adjacents à un nœud de la classe des nœuds d'intersection, de sortie ou de fond de galerie (cul de sac) sont des arcs dont les nœuds initiaux et terminaux se trouvent sur des niveaux différents dans le graphe. Si un arc entre deux nœuds passe d'un niveau à l'autre alors il n'existe pas d'arcs entre ces deux nœuds sur le même niveau.

En tentant de visualiser l'allure du nouveau réseau de la figure 4.3 tous les arcs semblent changer de niveau. En fait sur ce réseau, les arcs changent effectivement tous de niveaux à l'exception des arcs rattachant les nœuds de chargement et de déchargement.

Dans la prochaine sous-section, soit « discréétisation », sont décrits plusieurs autres arcs qui eux, demeurent sur le même niveau.



**Figure 4.3** Modélisation d'une intersection

### 4.2.3 Discréétisation

Dans l'énumération des propriétés du modèle et dans la définition même du problème, il est question de temps réel. Comme mentionné plus haut, l'aspect dynamique du problème, résultant de la nécessité pour un véhicule de connaître l'état actuel des véhicules, compte tenu de leurs déplacements, est un aspect essentiel. En plus, il est nécessaire d'obtenir une solution considérant les changements dans l'état de la mine dans un temps très court (la notion de temps très court sera traité plus loin). Pour aborder ce sujet, deux options sont envisageables : choisir un algorithme de plus court chemin avec fenêtre de temps comme méthode de résolution ou encore discréteriser le graphe dans le temps. De ces deux options la seconde a été retenue, afin de simplifier la résolution du plus court chemin. Or, il est important de mentionner à ce stade du travail que la première option, soit l'utilisation d'un algorithme de plus court chemin avec fenêtres de temps, n'est pas écartée et qu'il serait souhaitable que celle-ci soit testée dans un prochain travail pour permettre de comparer les deux options.

Donc comme la méthode retenue est la discréétisation, voyons comment celle-ci est réalisée. Tout d'abord, il est important de noter que le nombre de nœuds et d'arcs explose en fonction de l'horizon temporel du graphe, étant donné que chacun des nœuds du graphe de base, dédoublé pour l'orientation, est représenté pour toutes les unités de temps de cet l'horizon temporel. Autrement dit, le même nœud existe pour chacune des unités de temps de l'horizon temporel. À l'intérieur d'une même unité de temps, il n'y a plus d'arcs joignant les différents nœuds mais plutôt des arcs se dirigeant vers des nœuds plus loin dans le temps. Prenons un exemple simple illustré en trois étapes, permettant de comprendre la discréétisation d'un graphe et d'identifier les différentes classes d'arcs.

Le graphe de base de la figure 4.4 contient trois nœuds et deux arcs. Il est à noter que pour des fins de simplification, ce graphe ne considère pas le sens d'un véhicule. L'horizon temporel est de dix unités de temps. Les flèches sur les arcs ne sont pas présentes pour améliorer la lisibilité mais il faut prendre en considération que les arcs vont dans le sens de l'accroissement du temps.

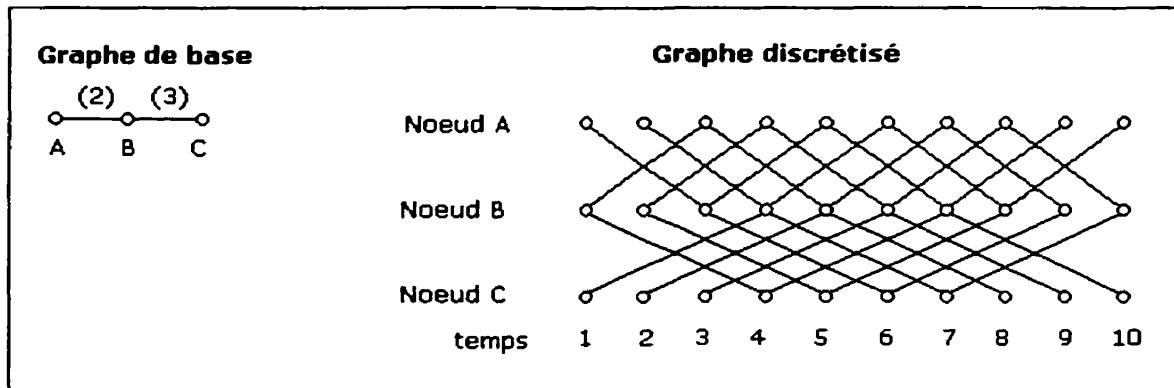


Figure 4.4 Discréétisation #1

Sur le graphe de base de la figure 4.4 les temps de passage sont posés entre parenthèse. Sur le graphe discréétisé ces temps sont représentés par un avancement dans le temps. Les arcs du graphe discréétisé forment la première classe d'arcs, soit les arcs de mouvement. Il est possible de représenter le mouvement dans le temps mais qu'en est-t-

il de l'immobilité? La figure 4.5 introduit la seconde classe d'arcs, soit les arcs de suivi, qui permettent d'attendre à un nœud.

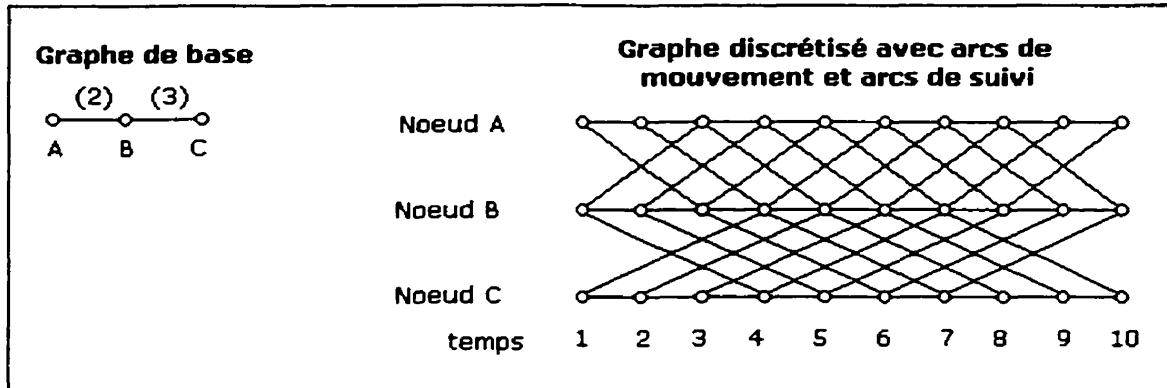


Figure 4.5 Discréétisation #2

La dernière classe d'arcs à ajouter au graphe est les arcs de fin. Ces arcs permettent de relier tous les nœuds de sortie du graphe à un nœud puits. Les nœuds de sortie sont les nœuds physiques où une route se termine. Les arcs de fin permettent de retracer le nœud destination ainsi que le moment où le véhicule y a circulé (voir figure 4.6). Seuls les nœuds de sortie qui forment la destination, dans le cas de la figure 4.6 c'est le nœud A, ont des arcs de fin.

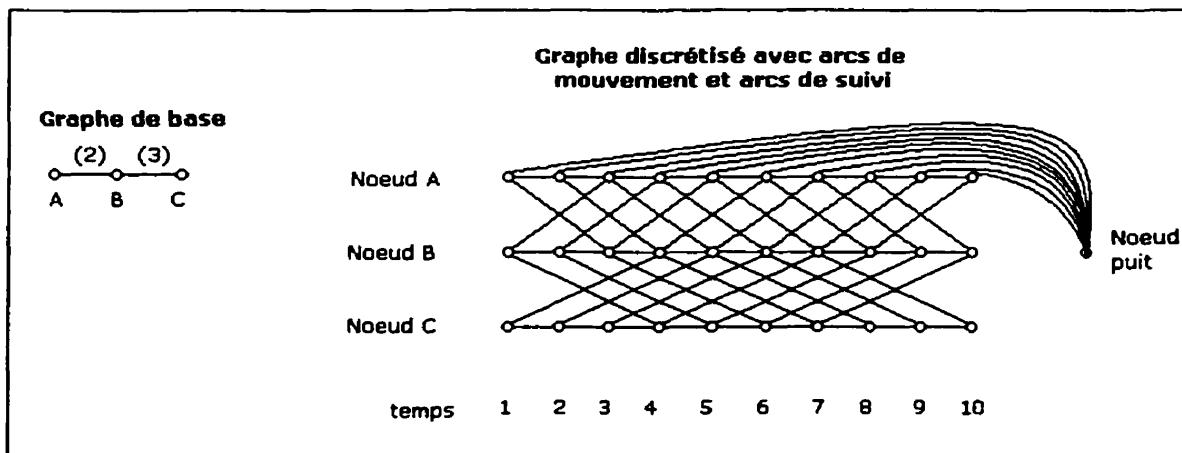


Figure 4.6 Discréétisation #3

#### 4.2.4 Fenêtre de temps

Jusqu'à présent, plusieurs spécificités du graphe ont été exposées permettant de représenter l'aspect dynamique du problème. Or, la raison pour laquelle le graphe est dynamique est la possibilité de conflits pouvant survenir entre les véhicules circulant sur le réseau. Sous le prochain thème, conflits, les détails de la méthode de prévention des conflits sont exposés mais avant de s'y rendre, la notion de fenêtre de temps doit être éclaircie.

Quand un véhicule demande une affectation, il reçoit une liste de fenêtres de temps permettant de retracer les moments d'occupation des nœuds, accompagnée de l'heure à laquelle cette affectation a été émise. Une fenêtre de temps envoyée correspond à l'arrivée d'un véhicule, autre que celui à affecter, à un nœud et de la sortie du véhicule de ce nœud. La fenêtre de temps est représentée par un intervalle  $a_i$  et  $b_i$ , où  $i$  correspond au numéro du nœud. Annexé au moment d'arrivée et de départ à un nœud visé, est indiqué le nœud précédent que le véhicule a emprunté avant de parvenir à l'endroit visé, ainsi que le numéro du véhicule. Ces données sont également importantes pour la détection des conflits. Pour le système, chacune des fenêtres de temps est mise à jour par rapport à l'heure de l'affectation, pour enregistrer de façon absolue les moments où le véhicule circule sur les différents nœuds du réseau. Au moment où un autre véhicule passe une demande d'affectation, le système consulte les fenêtres de temps pour éviter que ce véhicule entre en contact avec ceux déjà affectés. Voici comment les fenêtres de temps sont enregistrées dans le système (voir figure 4.7). Sur cette figure, les parcours de deux véhicules sont représentés, le premier en noir qui passe par les noeuds A – C – D – F – E – A et le second en gris, qui passe par les noeuds B – A – C – F.

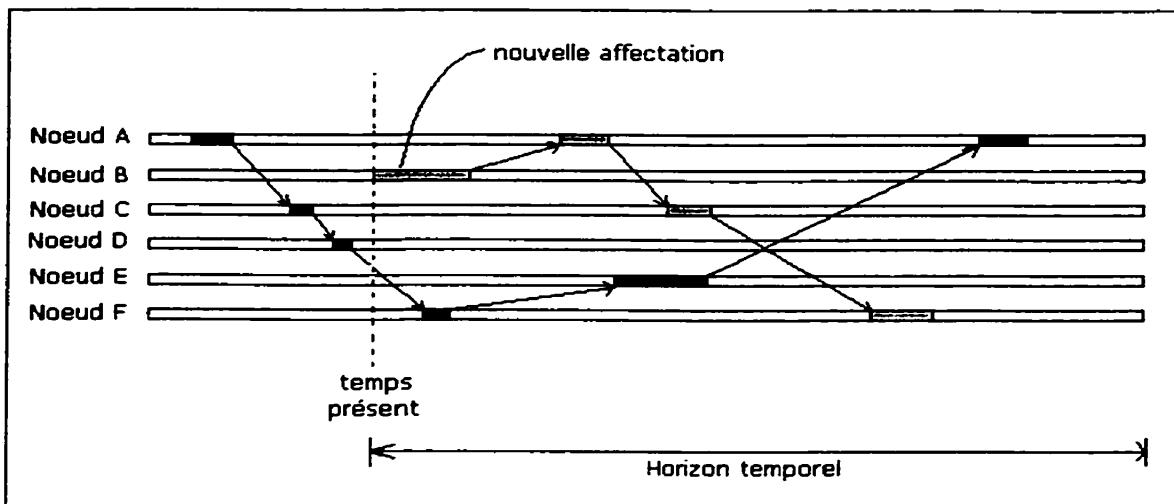


Figure 4.7 Représentation des fenêtres de temps

#### 4.2.5 Conflits

Dans la partie précédente du travail, la méthode de Kim et Tanchoco d'évitement des conflits a été expliquée sommairement. En ce qui concerne le système développé dans ce travail, la méthode a été implantée légèrement différemment que ce qui avait été fait par Kim et Tanchoco, compte tenue des différences entre leur graphe et le nôtre. Au lieu d'effectuer les vérifications de la disponibilité des fenêtres de temps lors du calcul du plus court chemin, le système enlève les arcs conflictuels avant d'effectuer le plus court chemin, soit lors de la construction du graphe. Mais quels arcs doit-il enlever? Pour répondre à cette question, les deux types de conflits, soit les conflits frontaux et les conflits de rattrapage, sont traités différemment. Il est important de noter que dans le cadre du système développé, les conflits de rattrapage ne peuvent pas survenir, étant donné que tous les véhicules vont à la même vitesse, c'est pourquoi seule la détection des conflits frontaux est expliquée, mais un tel système de vérification n'est pas difficile à instaurer.

Prenons deux exemples de conflit frontal illustrés dans la figure 4.8. Les situations sont représentées sur deux graphes, un qui n'est pas conçu pour les éviter et l'autre construit adéquatement. Les graphes sont représentés à l'aide de leurs fenêtres de temps afin d'améliorer la lisibilité.

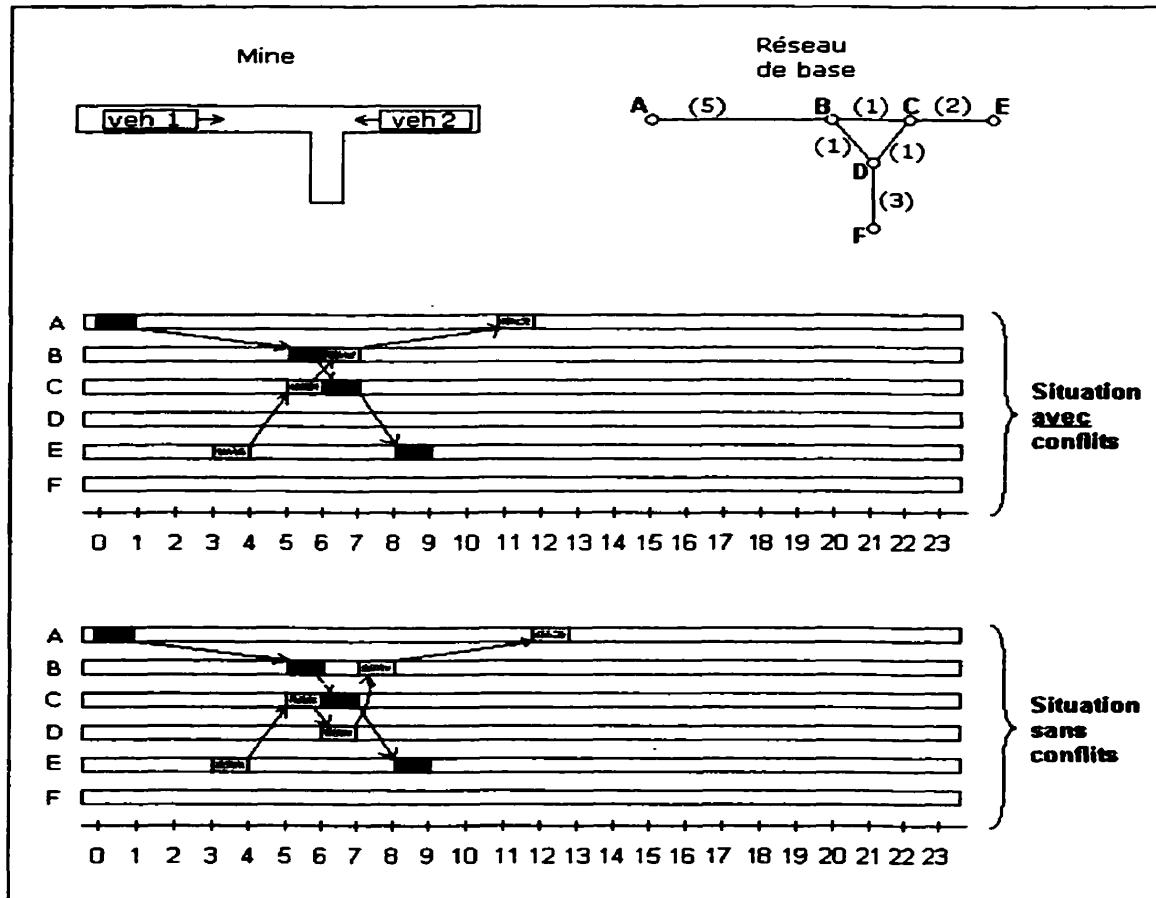


Figure 4.8 Situations avec et sans conflits

Lors de l'affectation du véhicule no.2, représenté par des cases grises, un conflit survient entre le nœud B et le nœud C, quand le véhicule no.2 emprunte ce segment. Dans la situation sans conflits de la figure 4.8, le véhicule n'emprunte pas ce segment et arrive une unité de temps plus tard. Si dans ce cas, le véhicule ne passe pas sur le segment CB au temps 6, c'est parce que ce segment n'existe pas dans le graphe du plus court chemin,

ce qui nous amène à décrire la façon dont le système construit le graphe d'affectation du véhicule no.2.

À la construction du graphe, le système inspecte toutes les fenêtres de temps des nœuds du réseau et détecte les endroits et les moments où il peut y avoir collision. Pour éviter la collision frontale entre les nœuds B et C, voici ce que le système fait et ce qu'il utilise comme fenêtres de temps pertinentes.

Tableau 4.1 Structure de données des fenêtres de temps

Nœud	ai	bi	Numéro véhicule	Prédécesseur
B	5	6	1	A
C	6	7	1	B

On veut poser un arc allant de C vers B.

1. On regarde les prochaines fenêtres de temps du nœud C et enregistre leurs prédécesseurs.
2. Si un des prédécesseurs du nœud C est B, alors il y a possibilité de conflit à un certain moment.
3. Pour chacune des unités de temps = t, vérifier que :  $t + \text{dist}(B-C) < (a_B)$
4. Si c'est le cas, poser un arc C-B, sinon poser  $t = b_C$

Au point 1 de la procédure expliquée, on mentionne, ‘les prochaines fenêtres de temps’. À prime abord seule la prochaine fenêtre de temps peut créer un conflit, comme c'est le cas pour notre exemple, or il arrive dans certaines situations, qu'un troisième véhicule s'insère entre les deux véhicules concernés sans que celui-ci ne crée de conflits mais créant toutefois un écran qui empêche la détection du conflit, c'est pourquoi la vérification est faite sur une plus grande plage de fenêtres de temps.

Finalement, il faut mentionner que cette procédure permet d'éviter les conflits frontaux pour des véhicules en mouvement, mais le principe pour les arcs de suivi ou d'attente est plus simple, il suffit de ne pas poser d'arcs de suivi aux moments occupés par des fenêtres de temps.

#### 4.2.6 Blocage total

Un blocage total survient quand un véhicule se trouve dans l'impossibilité de trouver une destination. Une des raisons pourquoi un blocage total survient est la courte durée sur laquelle un véhicule connaît les tâches qu'il doit effectuer.

Par exemple, si un réseau est constitué d'un point de chargement et d'un point de déchargement et de deux routes reliant ces points (voir figure 4.9).

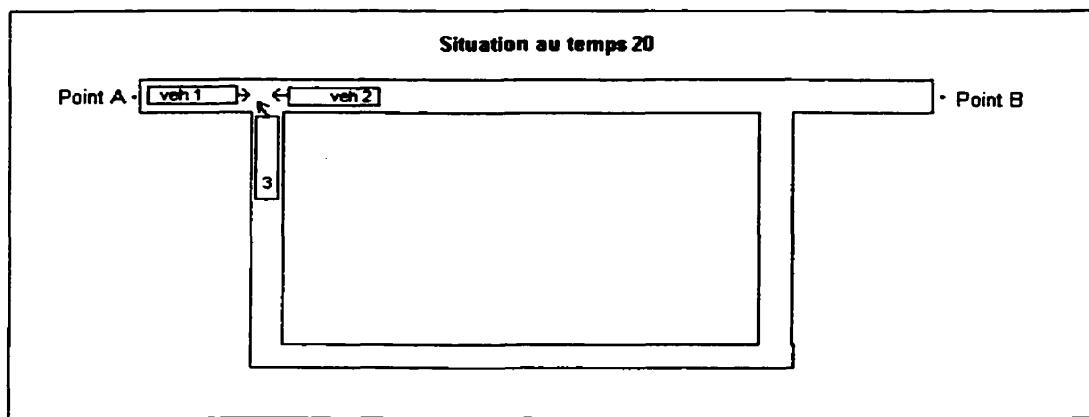


Figure 4.9 Exemple de blocage total

Au temps 0 le véhicule no.1 a été affecté du point B au point A et doit atteindre sa destination au temps 20. Entre le temps 0 et le temps 20 les véhicules no.2 et no.3 sont également affectés au point A et attendent à l'extérieur de la baie de chargement pour ne pas créer de conflits. Or, une fois le temps 20 atteint, le système n'est plus en mesure trouver de destination pour le véhicule no.1 car ce même système ne peut pas modifier

l'état des véhicules no.2 ou no.3 en les faisant reculer. Quand une telle situation survient on dit qu'il y a blocage total.

Pour éviter cette situation ou pour minimiser les chances que cette situation se produise, le système augmente son horizon de planification en assurant au véhicule un itinéraire (appelé itinéraire de sortie) pour qu'il sorte du point de service. Cet itinéraire de sortie n'est pas nécessairement suivi, c'est pourquoi il n'est pas envoyé au véhicule. En effet, un véhicule est affecté à une destination et reçoit un itinéraire pour s'y rendre. De son côté, le système enregistre cet itinéraire et y ajoute un itinéraire de sortie qui est à la suite du premier, qui consiste en une voie pour que le véhicule sorte de cette destination et se localise dans un endroit permettant de minimiser les risques de conflits. Ainsi des fenêtres de temps lui seront réservées. Reprenons l'exemple précédent avant de donner plus de détails.

Ajoutons à notre réseau un point C, noté point de sortie. Au temps 0 le véhicule no.1 reçoit comme affectation de se rendre du point B au point A, arrivant au temps 20. Le système enregistre cette information et y ajoute une affectation du point A au point C, suivant le chargement du véhicule no.1. Quand les véhicules no.2 et no.3 recevront leur affectation, entre les temps 0 et 20, ils ne pourront pas attendre entre le point A et le point C sans quoi un conflit surviendrait (voir figure 4.10). Au temps 20, arrivant au point A, le véhicule no.1 demandera une affectation et le système sera en mesure de le faire circuler sans être gêné par les autres véhicules.

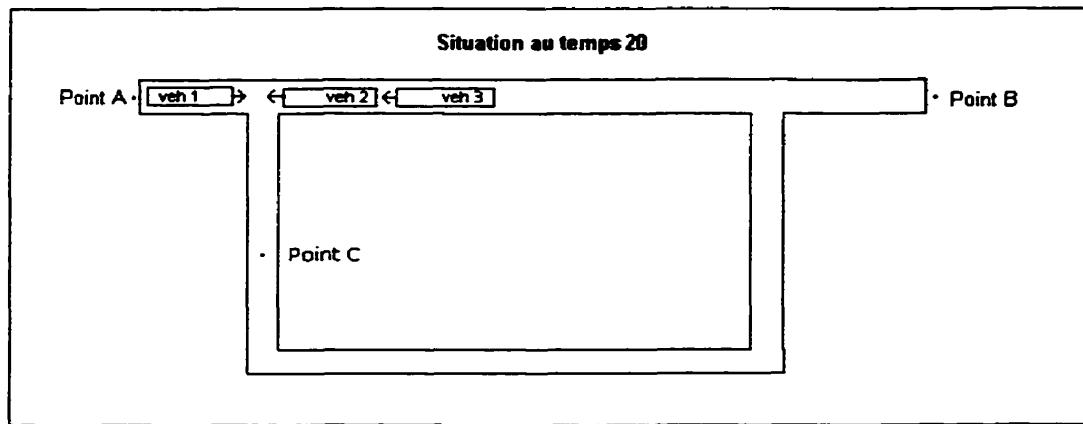


Figure 4.10 Organisation sans blocage total

Or pourquoi ne pas transmettre les deux itinéraires connus du système au véhicule? En fait la demi-affectation ou encore l'affectation de sortie ne doit pas être transmise au véhicule, étant donné que cette affectation permet seulement d'assurer un passage de sortie et peut ne pas être suivie par le véhicule, une fois que celui-ci redemandera une affectation. Autrement dit, la demi-affectation de sortie est un outil préventif du système pour faire en sorte qu'un véhicule ne se retrouve pas coincé par les autres véhicules du réseau. Dans certains cas, cette mesure peut affecter l'optimalité d'une solution comme par exemple, si une route de sortie est réservée et n'est pas utilisée, des véhicules peuvent attendre pour rien, toutefois, cette mesure assure la réalisabilité des solutions.

L'implantation de cette méthode de prévention des blocages totaux n'est pas facile compte tenu la structure de l'algorithme du plus court chemin qui permet d'enregistrer le passage d'un véhicule à un nœud que la première fois. Or pour éviter les blocages totaux, un véhicule peut passer deux fois sur le même nœud, avant et après son chargement ou déchargement.

Donc deux stratégies ont été étudiées et testées, soit la première qui consiste à considérer le problème comme deux plus courts chemins où la source du second plus court chemin serait la destination du premier et la deuxième stratégie qui consiste à dédoubler le

graphe dans son entier et ajouter des arcs entre les destinations des deux graphes de sorte qu'un seul plus court est effectué. La figure 4.11 permet de visualiser le modèle une fois la deuxième option implantée. On y voit les deux niveaux de graphes unis par les arcs de changement de graphe. À prime abord, les deux options semblent offrir le même niveau d'optimalité, et le choix devrait se faire en fonction de leur vitesse d'exécution or, après observation, il est devenu clair que la première option effectue une dominance qu'il faut éviter. L'exemple qui suit représente bien cette dominance.

Deux véhicules veulent se rendre au point de chargement no A. Le premier véhicule affecté, arrive au temps 20 et repart, après son chargement, au temps 25 pour en suite sortir du cul de sac de chargement au temps 28. Si on utilise la première option, le deuxième véhicule qui demande une affectation, est en mesure d'arriver au point A au temps 14, de se charger et de repartir au temps 19. Or, comme 3 unités de temps sont nécessaires pour sortir du cul de sac de chargement, le système ne trouve pas de destination de sortie pour ce véhicule, donc renvoie comme information qu'il est impossible de charger le véhicule no.2 au point A sans créer de conflits avec le véhicule no.1 qui arrive au point A. D'un autre côté, si le système utilise la deuxième option, le véhicule no 2 est affecté au point de chargement no A au temps  $28+3$ , après attente, charge jusqu'au temps 36 et ressort du cul de sac de chargement au temps 39, solution qui n'aurait pas pu être envisagée autrement.

Pour cette raison, l'option qui consiste à dédoubler le graphe est celle qui est retenue, ajoutant une dernière classe d'arcs. Cette dernière classe d'arcs du graphe est les arcs de changement de graphe. Ces arcs relient les deux graphes aux points de destination potentiels. La prochaine figure effectue un résumé de toutes les notions vues à l'intérieur de cette section. Pour comprendre le graphe dans son ensemble la figure 4.11 illustre un exemple de solution obtenue sur le graphe complet.

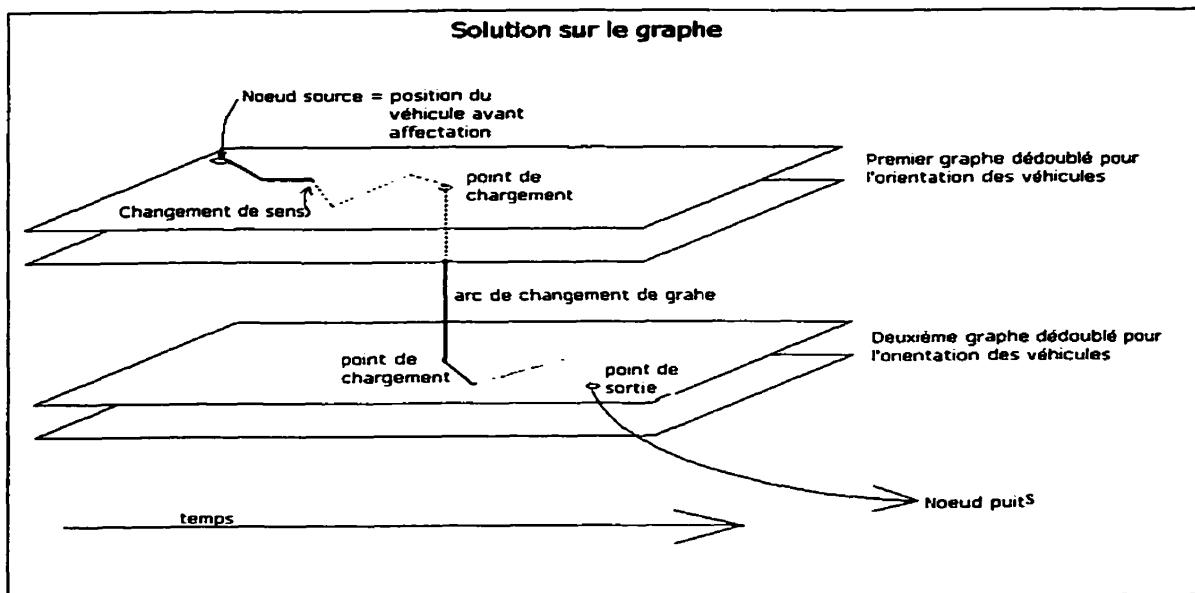


Figure 4.11 Modélisation du réseau pour éviter les blocages totaux

#### 4.2.7 Rappel :

Les éléments nécessaires à la construction du graphe permettant d'affecter des véhicules de façon dynamique sans créer de conflits ont été présentés dans cette section. En effectuant un retour sur la section 1.2 « Trois sous-problème », on constate que les deux premiers sous-problèmes soit le routage et l'ordonnancement, sont couverts à l'intérieur du graphe et des solutions qui en découlent. La section du travail qui suit porte sur le point manquant, soit la répartition.

### 4.3 Modélisation du problème : ajustement des coûts

Une fois que le routage et l'ordonnancement d'un véhicule sont faits à l'intérieur d'un graphe, il reste à déterminer vers quelle destination ce véhicule doit se rendre, autrement dit, il reste à effectuer la répartition du camion. Comme présenté dans la revue de la littérature, plusieurs facteurs entrent en jeu quand il est question de répartition : teneur du matériel transporté, temps de transport de ce matériel, temps d'attente des véhicules, et biens d'autres. Afin de gérer ces facteurs, deux principales approches peuvent être envisagée, l'utilisation d'un critère heuristique ou l'utilisation d'une méthode avec plan de production. Des méthodes propres à ces deux approches ont été programmées dans le système. Comme l'objectif du travail n'est pas de développer un plan de production proprement dit, le système ne calcule pas de plan, par contre, il est capable d'en suivre un, envoyé par fichier.

Dans la section qui suit, les différents critères heuristiques implantés ainsi que la méthode utilisée pour suivre un plan de production sont exposés. Dans chacune des explications, se trouve une description de la façon dont ces critères sont insérés à l'intérieur du graphe.

#### 4.3.1 Minimiser temps de demi-cycle

Comparativement aux heuristiques développées pour les mines à ciel ouvert, dans ce système, une affectation est donnée sur un demi-cycle de transport, c'est-à-dire d'un point A à un point B et non d'un point A à un point B à un point A, et ce, afin de permettre un choix de route plus équilibré entre les véhicules. Pour cette raison, il est plus clair de parler de minimisation de temps de demi-cycle et non de minimisation de temps de cycle, même si à ce demi-cycle est ajouté la portion « sortie », comme expliqué dans la section blocage total. Clarification faite, l'heuristique *minimiser temps de demi-cycle*, correspond à la minimisation du coût du parcours liant deux points, où le coût des

arcs constituant le parcours, est égale à la longueur de ces arcs. Autrement dit, il s'agit d'un plus court chemin sans ajout de coûts.

#### 4.3.2 Minimiser l'écart entre la production et un plan pré-établi

Toujours inspirée de différentes méthodes développées pour les mines à ciel ouvert, l'heuristique minimiser l'écart de production permet d'affecter des véhicules en tenant compte, non seulement de la distance entre deux points, mais également des besoins particuliers en stérile et mineraux, exprimés à travers un plan de production. Ce plan de production correspond à un tableau (tableau 4.2) indiquant le nombre de chargements voulu pour chacune des destinations accessibles, ainsi que le nombre accumulé au fur et à mesure que le quart de travail évolue.

**Tableau 4.2** Données de minimisation d'écart

No Point de chargement	Nombre de chargements accumulés	Nombre de chargements désirés
Ac_	2	8
Cc_	1	5
Dc_	3	10

Afin de prendre en considération la distance et l'écart de production dans le processus de choix d'une destination, le graphe est construit de la même façon que selon l'heuristique qui consiste à minimiser le temps de demi-cycle, sauf que les coûts sur les arcs de changements de graphes, sont modifiés proportionnellement à l'écart entre le nombre de chargements accumulés et le nombre de chargement désirés. Les arcs de changements de graphes sont les arcs reliant les différents points de chargement et de déchargement avant de passer à l'affectation de sortie. La formule utilisée pour calculer les coûts sur ces arcs est la suivante :

$$FP * [nbr\_acc(i) - (Heure(j) / Temps_Simul) * (nbr_prev(i))]$$

où : FP = facteur de précision

Heure(*j*) = Temps écoulé entre le début de la période de travail et la demande d'affectation *j*

Temps\_Simul = Durée de la période de travail

nbr\_acc(*i*) = Nombre de voyages accumulés au point de chargement *i*

nbr\_prev(*i*) = Nombre de voyages planifiés pour le point de chargement *i*

Le facteur de précision tel que défini, agit comme amplificateur et doit être ajusté selon l'importance que l'on veut donner à l'écart entre ce qui est planifié et ce qui survient. Un facteur de zéro signifie qu'aucune importance n'est portée à l'écart de production tandis qu'un facteur de 100 par exemple, néglige les distances et fait en sorte qu'aucun écart de production ne peut être toléré.

#### 4.3.3 Affectations fixes

Finalement, l'affectation fixe est instinctivement la méthode d'affectation la plus facile à comprendre. Ce critère consiste à désigner pour un véhicule un point de chargement et un de déchargement, entre lesquels le véhicule effectue le transport de matériel pour toute la période de travail. Ce critère est également implanté directement dans le graphe en bloquant les arcs qui passent par d'autres points de services que ceux désignés.

## 4.4 Fonctionnement général du système

Tout au long des deux sections précédentes, les différents éléments permettant d'affecter et de contrôler un véhicule à l'aide d'un graphe ont été décrits en détails. La section présentement abordée permet de rassembler tous ces éléments et d'établir le fonctionnement et l'enchaînement de toutes les opérations visant à affecter un véhicule. Pour cela, trois points sont décrits, soit le rôle du module d'affectation, le rôle du module de représentation de la mine et ensuite un troisième point qui consiste à établir les relations entre ces deux modules. Même si l'objectif premier du travail est de développer un module d'affectation, l'intérêt aurait été moindre s'il était demeuré un problème statique. C'est pourquoi quand il est question de module de représentation de la mine, il s'agit d'un simulateur déterministe, permettant d'appeler le module d'affectation et de s'adapter à ses décisions.

### 4.4.1 Rôle du module d'affectation

Comme mentionné dans l'introduction de cette section, le module d'affectation des véhicules est le cœur du système développé dans ce travail. Quand un véhicule arrive à destination, le module est appelé afin qu'il choisisse une nouvelle route pour le véhicule en demande. Les étapes suivies par le module pour générer une route sont exposées en détails.

Un véhicule demande une affectation → appel du module d'affectation :

1. Lecture du fichier contenant les parcours des véhicules en circulation.
2. Mise à jour des fenêtres de temps.
3. Calcul des coûts pour les arcs de changement de graphe, en fonction du critère d'affectation choisi.
4. Construction du graphe discrétilisé sans conflits.
5. Plus court chemin acyclique.

6. Division de la solution pour isoler la partie affectation de sortie.
7. Mise à jour du fichier contenant les parcours.
8. Retourne la solution au véhicule et au module de représentation de la mine.

À l'étape 1 et 7, il est question de fichier contenant les parcours des véhicules en circulation. Dans ce fichier, se trouvent deux affectations pour chacun des véhicules, la première étant la route que suit le véhicule et la seconde, la route de sortie que pourra prendre le véhicule à sa prochaine affectation. Cette route de sortie ne sera pas nécessairement suivie mais permet de réserver des fenêtres de temps au véhicule qui devra sortir de son point de service. Bien entendu, à chacune des routes est associé le numéro d'affectation, le numéro du véhicule ainsi que l'heure du début de l'affectation, pour permettre la mise à jour des fenêtres de temps en temps réel.

Une fois les fenêtres de temps calculées, les coûts associés au critère d'affectation sont calculés pour ensuite passer à la construction du graphe proprement dit. La construction du graphe est l'étape la plus longue compte tenu des multitudes de vérifications qui doivent être faites pour éviter les conflits. Comme mentionné plus tôt dans ce travail, seuls les arcs ne pouvant générer de conflits sont ajoutés au graphe. Suite à la construction du graphe, le plus court chemin peut être effectué pour obtenir un parcours d'un demi-cycle plus la portion sortie. L'algorithme choisi est le plus court chemin acyclique compte tenu de sa rapidité et du graphe qui s'y prête.

À partir du moment où le chemin est calculé, il reste à le diviser en deux parties, la première, destiné au fichier contenant les parcours et au module de représentation de la mine et la seconde, destinée exclusivement au fichier contenant les parcours.

#### 4.4.2 Rôle du module de représentation de la mine

Le module de représentation de la mine permet de suivre l'évolution des opérations tout au long d'un quart de travail. Pour suivre cette évolution, le module accumule l'information sur les parcours que doivent suivre chacun des véhicules et fait appel au module d'affectation quand un véhicule arrive à destination. Le rôle de ce module est d'agir comme simulateur or, comme les simulations se font de façon déterministe, il est préférable de s'y référer comme étant un module de représentation de la mine. L'information concernant la circulation des véhicules dans la mine est enregistrée dans des listes de prochains événements. Un prochain événement est constitué d'un arc sur lequel le véhicule circule, de l'heure à laquelle le véhicule est entré sur l'arc, de l'heure courante ainsi que du véhicule concerné. Voici un exemple d'une courte liste de prochains événements.

Tableau 4.3 Liste d'événements

Heure courante	No_véhicule	Heure d'entrée dans l'arc	Nœud initial de l'arc	Nœud final de l'arc
127	1	120	Sb1h	Ki2b
127	2	124	Milh	Sb2b
127	3	119	Ed b	inc
128	1	128	Ki2b	Kilh
128	2	124	Milh	Sb2b
128	3	119	Ed b	Inc
129	1	129	Kilh	Dc h
129	2	124	Milh	Sb2b
129	3	119	Edb	inc
130	1	129	Kilh	Dc h
130	2	124	Milh	Sb2b
130	3	119	Ed b	inc
131	1	129	Kilh	Dc h
131	2	124	Milh	Sb2b
131	3	119	Ed b	inc
132	1	129	Kilh	Dc h
132	2	132	Sb2b	Sb1h
132	3	119	Ed b	inc

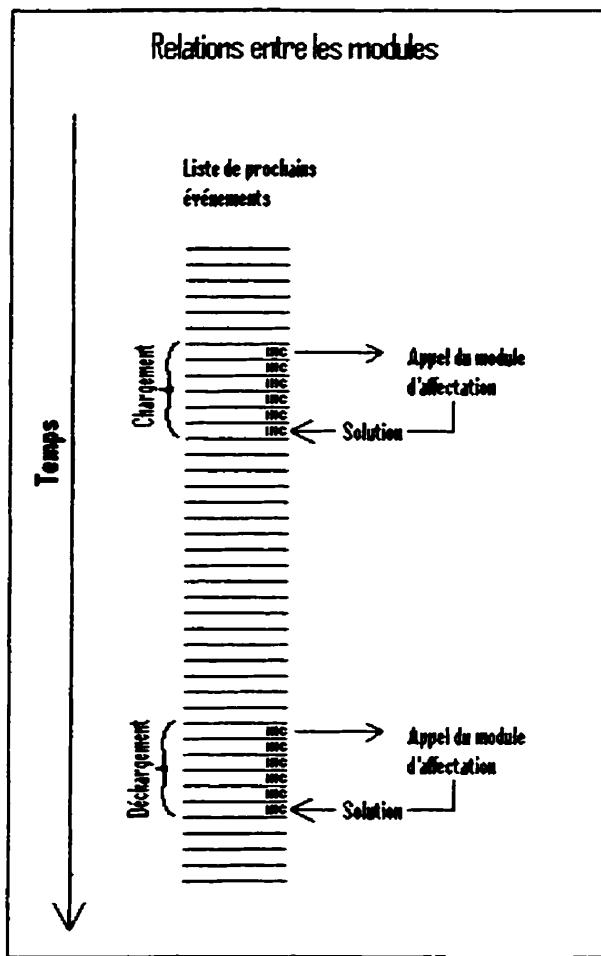
La liste représente les différents événements que doivent effectuer trois véhicules entre les moments 127 et 132. Par exemple à l'heure 127, le véhicule 1 sait qu'il se trouve

entre les nœuds Sb1h et Ki2b et ce, depuis l'heure 120. Au temps 128, ce même véhicule aura changé d'arcs et se situera entre les nœuds Ki2b et Kilh. Le nœud final du véhicule 3 au temps 127 est noté 'inc', pour inconnu, ce qui signifie que le véhicule ne connaît pas le prochain nœud qu'il doit traverser, par conséquent, il est au point de déchargement Ed\_b et est en attente d'une affectation.

#### 4.4.3 Relations entre les deux modules

La figure 4.12 permet d'illustrer les liens qui unissent le module de représentation de la mine et le module d'affectation des véhicules. Mais avant de s'attarder à cette figure, quelques points doivent être éclaircis. Tout d'abord il est important de rappeler que le déroulement des opérations se fait de façon déterministe, c'est-à-dire que les temps de passage sur les segments ainsi que le temps de chargement et de déchargement sont fixes et ne peuvent être modifiés. Deuxièmement, le module de représentation de la mine demande une affectation pour un véhicule, au moment où la liste des prochains événements du véhicule est vide et renvoie comme prochain nœud 'inc'. Troisièmement, comme les temps de chargement et de déchargement sont fixes, la mise en application de la solution choisie ne se fait pas au moment où le module d'affectation la renvoie, mais plutôt au temps = (heure de demande + temps de chargement), ce qui signifie que la mise en application de la solution est indépendante du temps de calcul. Cela signifie également que le temps de calcul doit être inférieur au temps de chargement et de déchargement ce qui est le cas de notre système (détails à la prochaine partie). Quatrièmement, plusieurs demandes peuvent être envoyées au module d'affectation, or, elles sont traitées une à la fois.

La figure 4.12 représente un système à un véhicule qui effectue deux demandes d'affectation à l'intérieur d'un intervalle de temps.



**Figure 4.12 Liens entre les deux modules**

Cette section termine la partie 4 du travail portant sur le modèle de résolution du problème de routage, d'ordonnancement et de répartition. Depuis le début du travail, la problématique et ses différentes caractéristiques ont été décrites, différentes approches ont été étudiées à travers des ouvrages pour finalement parvenir à notre modèle proprement dit. Dans la partie qui suit, les résultats de tests effectués sont exposés.

## CHAPITRE 5

### Résultats

La partie que nous abordons porte sur les performances du système développé tout au long du travail. En réfléchissant sur les approches à prendre pour évaluer un tel système, et en portant une attention particulière aux paramètres à évaluer, plusieurs questions ont été abordées, sans malheureusement trouver de réponses entièrement satisfaisantes. Par exemple, en examinant les caractéristiques propres du problème et en tentant d'y trouver une équivalence directe à travers les articles abordés tout au long de la revue de la littérature, on remarque que les comparaisons s'arrêtent à certains points précis et ne couvrent pas l'ensemble du travail.

Si le système ne peut être comparé dans son ensemble, il faut donc identifier les caractéristiques qui peuvent être comparées, les prendre une à une, et quantifier leur performances par rapport à celles de systèmes existants pour en évaluer le rendement. Mais comment une partie de problème peut-elle être isolée de son contexte et conserver toutes ses propriétés, quand cette même partie est faite pour répondre spécifiquement aux nécessités du problème? Par exemple, si les critères d'affectation des mines à ciel ouvert et ceux des mines souterraines sont isolés et comparés, comme la minimisation du temps de cycle ou la minimisation des écarts de production, les méthodes de routage sont par conséquent négligées, or le fait qu'un véhicule soit contrôlé par un opérateur ou qu'il soit automatique a possiblement une influence sur son comportement, ou encore le fait qu'un véhicule circule sur un réseau à segments bidirectionnels ou unidirectionnels amène des variations sur les temps de cycle des véhicules qui changent considérablement le rendement d'un critère.

Dans la conclusion, toutes ces ambiguïtés face à l'évaluation du système seront discutées, mais pour l'instant, l'objectif de cette mise en situation est de mettre en

contexte les résultats qui sont présentés dans cette partie. A la lumière de ces réflexions, l'approche utilisée est de tester à l'extrême le comportement du système afin d'en faire ressortir les forces et les faiblesses dans le but d'identifier les éléments qui valent la peine d'être conservés et surtout quels aspects de ces éléments doivent être améliorés.

Cette partie se divise trois sections, soit la première où les scénarios sont présentés, la seconde où les résultats sont exposés et finalement la troisième discutant des résultats.

## 5.1 Présentation des scénarios

La mine développée pour produire des résultats permet d'évaluer différents scénarios dépendamment des contraintes qui y sont imposées. Deux types de contraintes peuvent être ajoutées au problème de façon à rapprocher le modèle de la réalité. Premièrement, un point de chargement peut être associé à un point de déchargement particulier, et ainsi, il est possible de restreindre l'utilisation d'un point de déchargement à un type de minerai ou de stérile. L'application de cette contrainte est faite par l'entremise d'un fichier associant un point de chargement à un point de déchargement. La deuxième contrainte pouvant être imposée permet de fermer l'accès à certains points de service de la mine. Pour appliquer cette contrainte trois approches peuvent être prise, chacune d'elles correspondant à un critère d'affectation spécifique. Pour l'affectation fixe, il suffit de ne pas inclure dans le plan fixe le point de service qu'on veut isoler, tandis que pour le critère qui minimise le temps de demi-cycle, on peut tout simplement poser un coût très élevé sur l'arc se rendant au point à isoler. En ce qui concerne le critère qui tend à minimiser l'écart entre le plan de production et la production réelle il ne suffit que de mettre à zéro la quantité désirée du point de chargement à exclure.

Avant d'examiner la mine sur laquelle les tests sont effectués, il est important d'expliquer certaines caractéristiques de la notation utilisées pour différencier les nœuds. La notation utilisée qui consiste à utiliser sept caractères pour chaque nœud, permet de densifier l'information et ainsi réduire l'espace mémoire nécessaire à l'entreposage des nœuds. Les nœuds qui sont présentés sur le graphe de la figure 5.1 sont ceux du graphe de base. A la figure 5.1, les explications concernant la signification des caractères identifiant le nœud sont données.

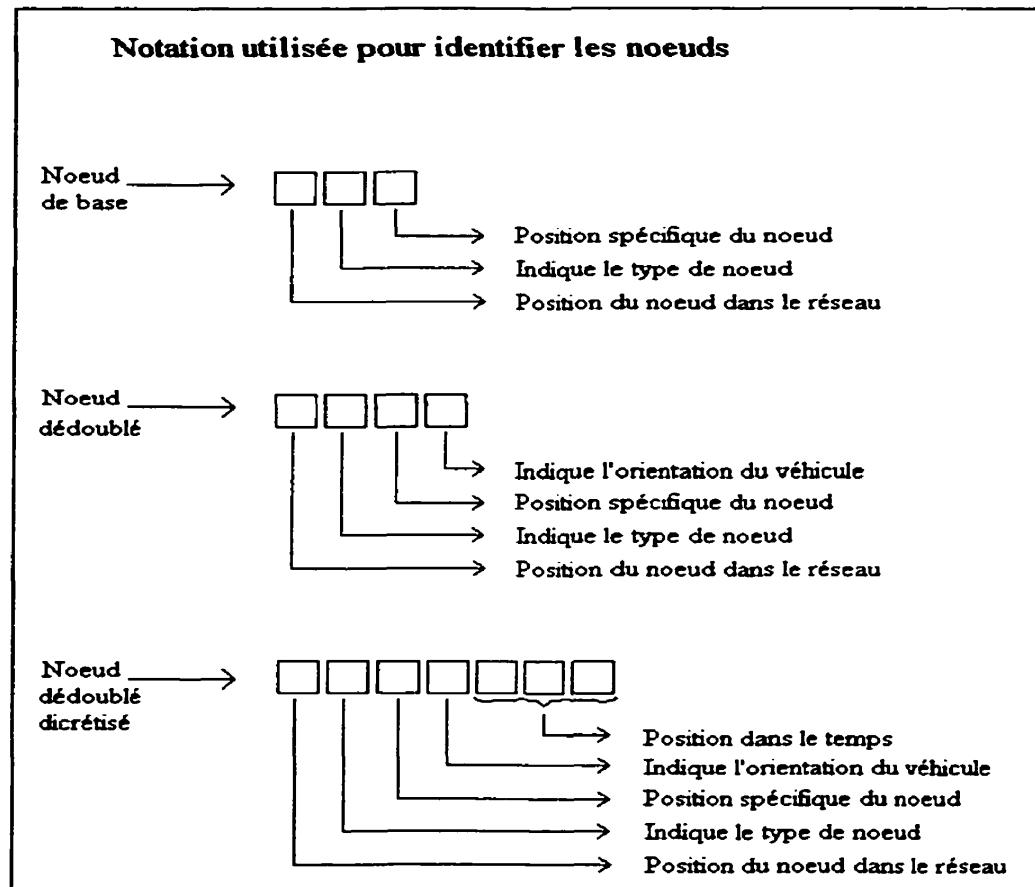


Figure 5.1 Signification des nœuds

- **Position du nœud dans le réseau** : Lettre qui identifie le numéro du point de service, de l'intersection, du point de sortie ou de tout autre regroupement de nœuds.
- **Indique le type de nœuds** : Il y a cinq types de nœuds, soit nœud de sortie ( s ), de chargement ( c ), de déchargement ( d ), d'intersection ( i ) ou encore des nœuds qui permettent l'attente mais qui n'ont de fonction particulière ( b ).
- **Position spécifique du nœud** : Quand un nœud est divisé en regroupement de nœuds, la position spécifique du nœud permet d'identifier le nœud à l'intérieur même de ce regroupement.
- **Indique l'orientation du véhicule** : Permet de différencier le nœud entre bas ( b ) et haut ( h ) pour l'orientation du véhicule.

- Position du nœud dans le temps : Comme le graphe est discrétisé dans le temps, un suffixe numérique y est ajouté.

Par exemple : le nœud Gi3b34 est le nœud G, de type intersection, dans le graphe du bas au temps 34.

Clarifications faites, il est maintenant temps de présenter la mine sur laquelle les tests sont faits ainsi que le graphe de base qui est associé.

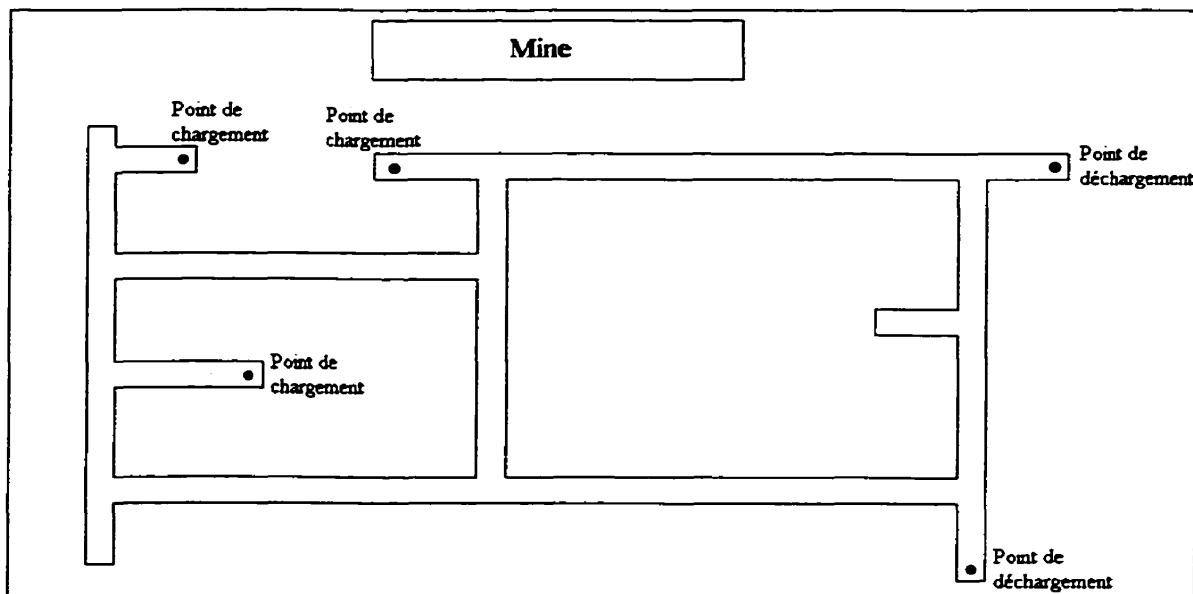


Figure 5.2 Modèle de mine

En examinant la figure 5.3, on remarque que cinq groupes de points de sortie ont été ajoutés au graphe (  ). Le choix de l'emplacement de ces points de sortie est fait manuellement, toutefois, une règle est suivie soit que ces points doivent être séparés par au moins une intersection de tout point de service. Ceci permet de minimiser les risques de blocage total.

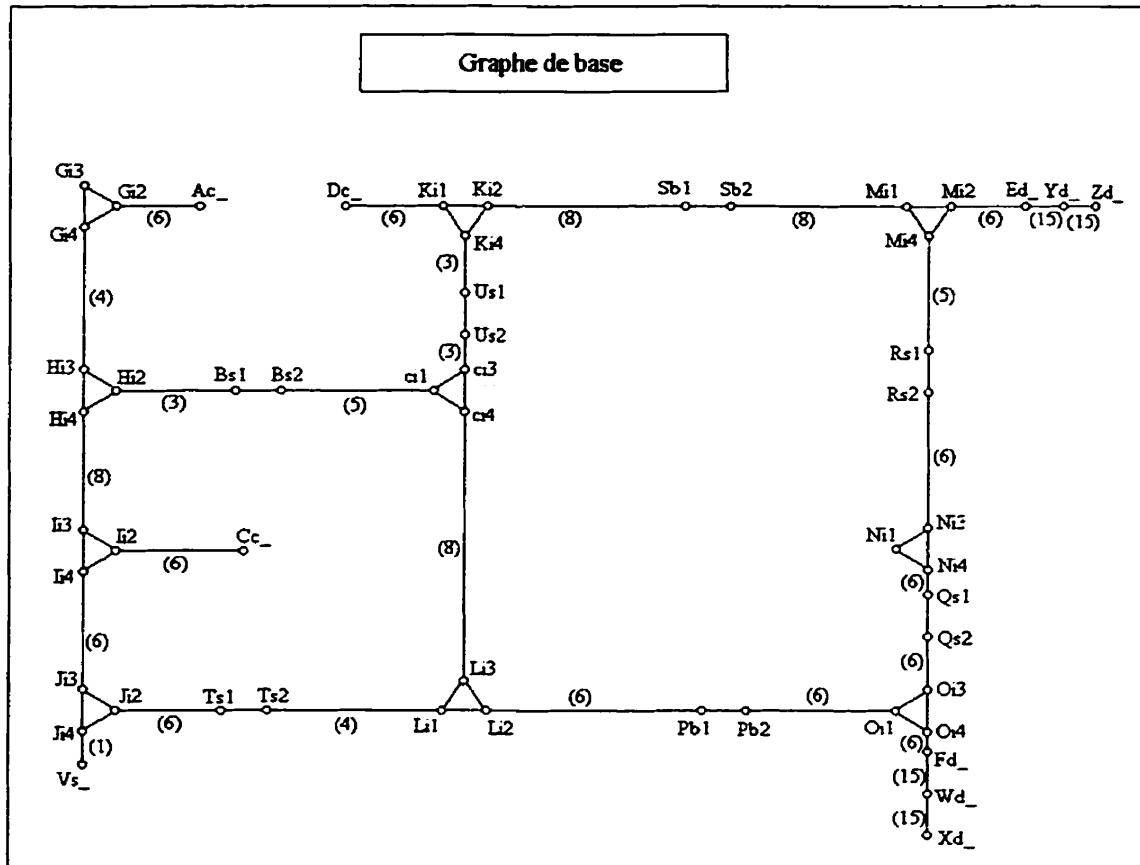


Figure 5.3 Graphe de base associé à la mine modèle

L'autre aspect qu'il est important de clarifier est la quantité de points de déchargement. En fait il n'existe que deux points de déchargement soit les points  $F_d_-$  et  $E_d_-$ . Les autres points de déchargement,  $W_d_-$ ,  $X_d_-$ ,  $Y_d_-$  et  $Z_d_-$  sont des points de stationnement, or comme le système a été conçu en faisant en sorte que les véhicules doivent débuter leur quart de travail à un point de déchargement, ces points ont été désignés comme point de déchargement mais sont rattachés au graphe par segments à sens unique, donc après l'affectation initiale, les véhicules ne peuvent plus s'y rendre. La quantité de ces points de 'stationnement' varie en fonction du nombre de véhicules nécessaires sur le réseau.

Toujours concernant les points de déchargement, ils ont été associés à différents points de chargement. Voici le tableau indiquant les associations :

Tableau 5.1 Associations des points de chargement aux points de déchargement

Point de Chargement	Point de Déchargement
Dc	Ed
Cc	Fd
Ac	Fd

L'ordinateur utilisé pour exécuter les simulations déterministes est équipé d'un processeur Pentium III 733 MHz avec 128 Mo de mémoire vive.

## 5.2 Quantification des résultats

A l'intérieur de cette section sont exposés les résultats numériques de simulations déterministes. Comme mentionné dans l'introduction de cette section, l'approche utilisée pour évaluer le système est la mise en évidence du comportement des véhicules par rapport à différents critères d'affectation, et ce, en générant des situations où le module d'affectation est mis à l'épreuve. La première série de résultats vise à ce que le système atteigne le stade de saturation du nombre de véhicules, tandis que la seconde série de résultats vise à accentuer l'effet des différents critères d'affectation sur le comportement des véhicules dans le but d'en faire ressortir les éléments les plus positifs.

### 5.2.1 Niveau de saturation

En effectuant un retour sur la littérature destinée aux systèmes de répartition des mines à ciel ouvert, on retrouve une notion qui, par son influence sur l'efficacité des critères d'affectation, peut être importante pour nous. Cette notion est la saturation de la mine par rapport au nombre de véhicules, mieux connue sous l'appellation « overtruck, undertruck ». Comme les réseaux de transport des mines à ciel ouvert et des mines souterraines sont différents, les résultats suivants visent à déterminer si le système à la capacité de fonctionner jusqu'au point de saturation, c'est-à-dire jusqu'au moment où l'ajout d'un véhicule ne fait plus augmenter la production. Pour ce, deux graphiques sont présentés pour ensuite être commentés. Les simulations que représentent ces graphiques ont été faites suivant les paramètres du tableau 5.2.

Tableau 5.2 Paramètres de base

Paramètres utilisés lors des simulations	
Temps de simulation	1500
Temps de chargement, temps de déchargement	22
Horizon de calcul	170

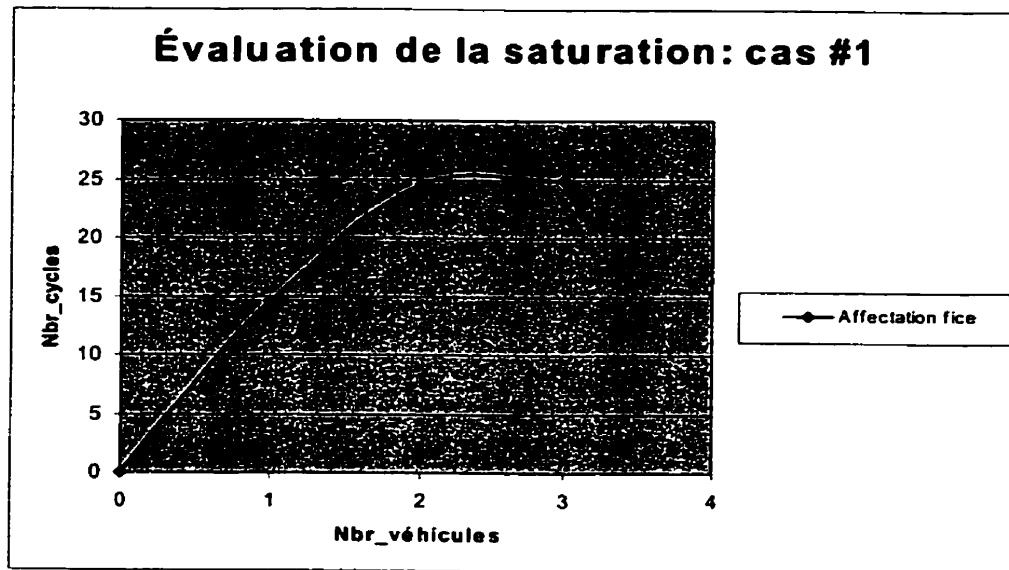


Figure 5.4 Point de saturation atteint

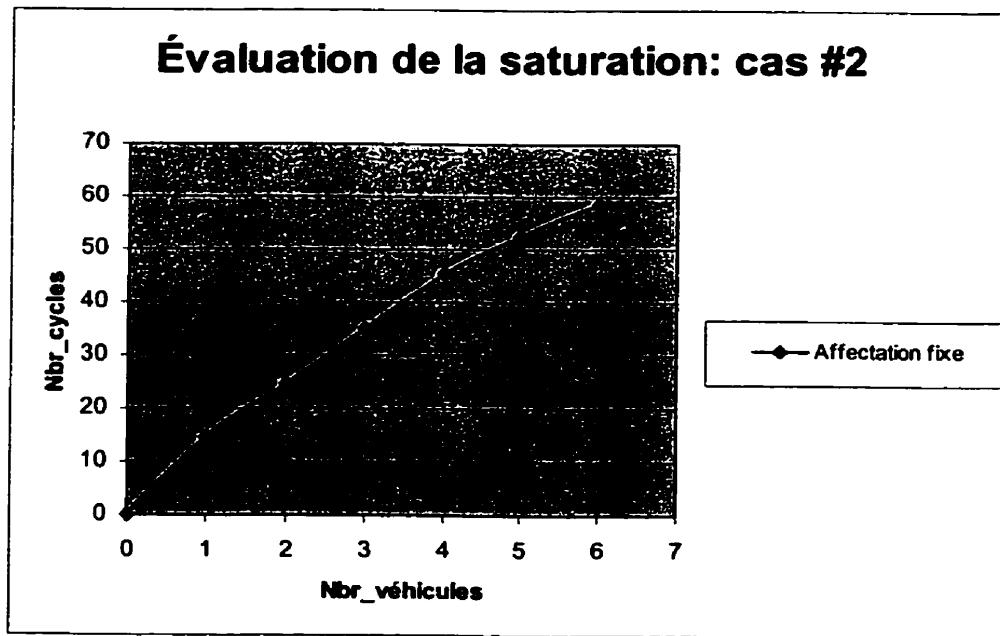


Figure 5.5 Point de saturation non atteint

Le graphique 5.4 représente les résultats obtenus lorsque seuls le point de chargement Dc\_ et le point de déchargement Ed\_ sont accessibles pour les véhicules, bien que tous les segments de la mine sont ouverts. Le système atteint son point de saturation à deux véhicules, donc le troisième est strictement inutile en terme de rendement de la flotte de transport. De son côté, le graphique 5.5 illustre la situation où tous les points de chargement et de déchargement sont accessibles, or dans ce cas le système n'est pas en mesure d'atteindre le point de saturation. Si un septième véhicule est ajouté, un blocage total survient dû à la trop grande congestion sur le réseau, ce qui signifie que même avec les affectations de sortie qui sont réservées pour les véhicules, le système n'est plus en mesure de trouver de routes pour les véhicules sans que ces derniers entrent en collision. Avec l'ordinateur décrit dans la section précédente la durée d'appel du module d'affectation est en moyenne 6.5 secondes pour le réseau étudié. C'est grâce à ce court temps de calcul que le système peut fonctionner en temps réel.

### 5.2.2 Comparaison des critères d'affectation

Trois critères d'affectation sont implantés dans le système : affectation fixe, minimisation de l'écart entre la production planifiée et réelle et minimisation du temps de demi-cycle. Or pour que les résultats de production entre ces critères soient comparables, la distribution de la production entre les types de minerai et de stériles doit, le plus possible, être faite également. Autrement dit, pour comparer l'efficacité de l'affectation fixe avec la minimisation de l'écart de production, il faut que les rapports entre les quantités de matériel transporté des différents points de chargement soient relativement semblables. Pour l'illustrer, voici un tableau de production de deux simulations, soit une où les situations peuvent être comparées et l'autre où la distribution de la production est trop différente pour comparer les simulations.

Tableau 5.3 Méthode de comparaison

Simulation #1 : les critères peuvent être comparés.				Simulation #2 : les critères ne peuvent pas être comparés.			
Point de chargement	Nombre de chargement			Point de chargement	Nombre de chargement		
	Affectation fixe	Minimisation temps demi-cycle.	Rapport		Affectation fixe	Minimisation temps demi-cycle	Rapport
Ac_	15	12	15/12	Ac_	10	17	10/17
Cc_	8	10	8/10	Cc_	9	22	9/22
Dc	20	21	20/21	Dc	22	6	22/6

Comme chacun des critères tend à se rapprocher de son objectif propre, il arrive qu'il soit difficile d'obtenir une similarité des rapports, particulièrement en ce qui concerne la minimisation des temps de demi-cycle, c'est pourquoi plusieurs simulations ont été effectuées et seules celles dont la distribution des résultats étaient les plus proches, ont été comparées.

Les premières simulations effectuées sont faites suivant le critère minimiser le temps de demi-cycle. A partir des résultats de ces simulations, d'autres simulations, basées sur le critère affectation fixe, sont faites en tentant d'obtenir le même type de distribution. Une fois les résultats obtenus, il ne reste plus qu'à générer un plan de production effectué selon la moyenne des résultats des deux autres critères. Cette démarche est illustrée dans la figure 5.6 qui suit.

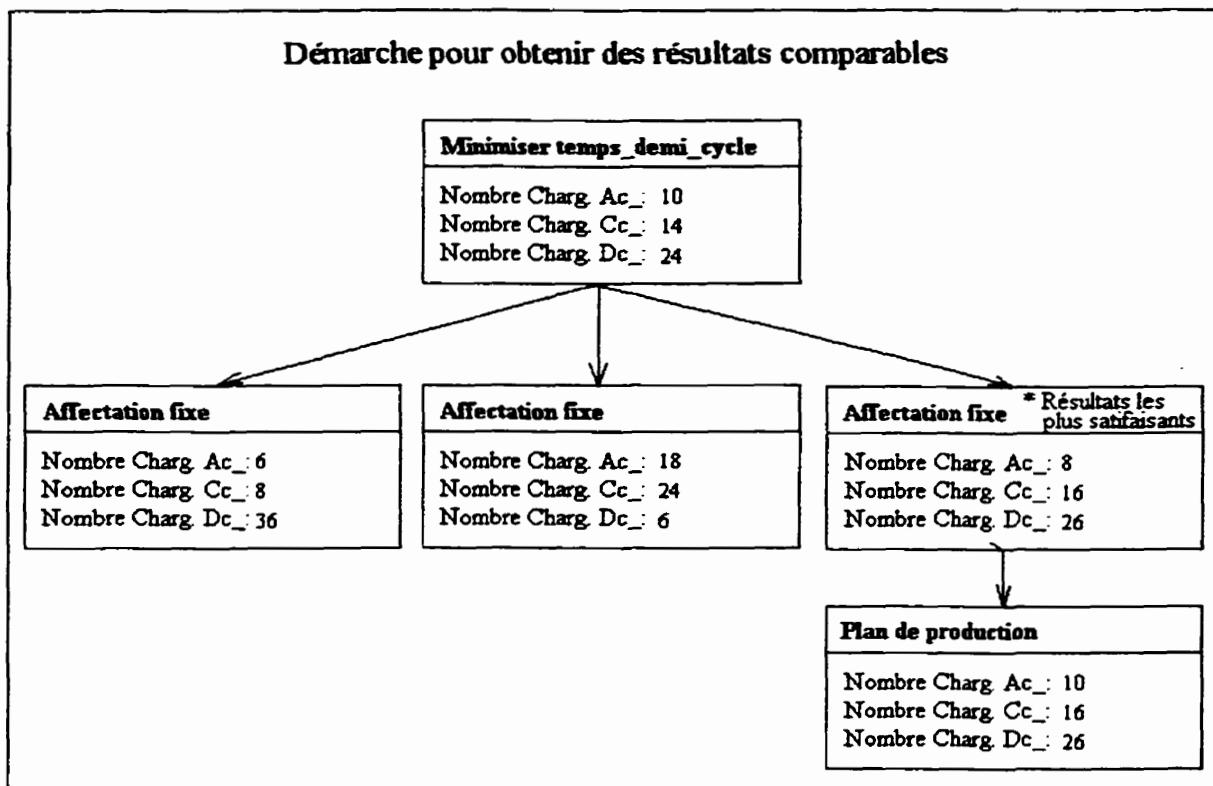


Figure 5.6 Arbre des résultats

Ayant révisé la procédure de comparaison des résultats, il reste à exposer les courbes de productivité, accompagnées du tableau de distribution de la production.

Tableau 5.4 Résultats des simulations

<b>Minimiser Temps de demi-cycle</b>						
Nbr véhicules	1	2	3	4	5	6
Nbr. Cycles	<b>14.5</b>	<b>24.5</b>	<b>35</b>	<b>45</b>	<b>52</b>	<b>51</b>
Charg A	0	0	0	2	8	9
Charg C	0	1	6	11	12	10
Charg D	14	23	28	31	31	31
<b>Affectations fixes</b>						
Nbr véhicules	1	2	3	4	5	6
Nbr. Cycles	<b>14.5</b>	<b>24.5</b>	<b>35</b>	<b>45</b>	<b>52.5</b>	<b>58.5</b>
Charg A	0	0	1	10	9	16
Charg C	0	0	10	10	18	17
Charg D	14	24	24	24	24	24
Affectations	(Ed_ - Dc_)	2*(Ed_ - Dc_)	2*(Ed_ - Dc_) 1*(Fd_ - Cc_)	2*(Ed_ - Dc_) 1*(Fd_ - Cc_)	2*(Ed_ - Dc_) 1*(Fd_ - Ac_)	2*(Ed_ - Dc_) 2*(Fd_ - Cc_)
<b>Minimiser écart entre le plan de production et la production réelle</b>						
Nbr véhicules	1	2	3	4	5	6
Nbr. Cycles	<b>14.5</b>	<b>24.5</b>	<b>35.5</b>	<b>44.5</b>	<b>51.5</b>	<b>57</b>
Charg A	0	0	1	10	9	16
Charg C	0	0	10	10	17	17
Charg D	14	24	24	24	24	22
Plan	Ac_ :0 Cc_ :0 Dc_ :14	Ac_ :0 Cc_ :0 Dc_ :24	Ac_ :1 Cc_ :10 Dc_ :24	Ac_ :10 Cc_ :10 Dc_ :24	Ac_ :9 Cc_ :18 Dc_ :24	Ac_ :16 Cc_ :17 Dc_ :24

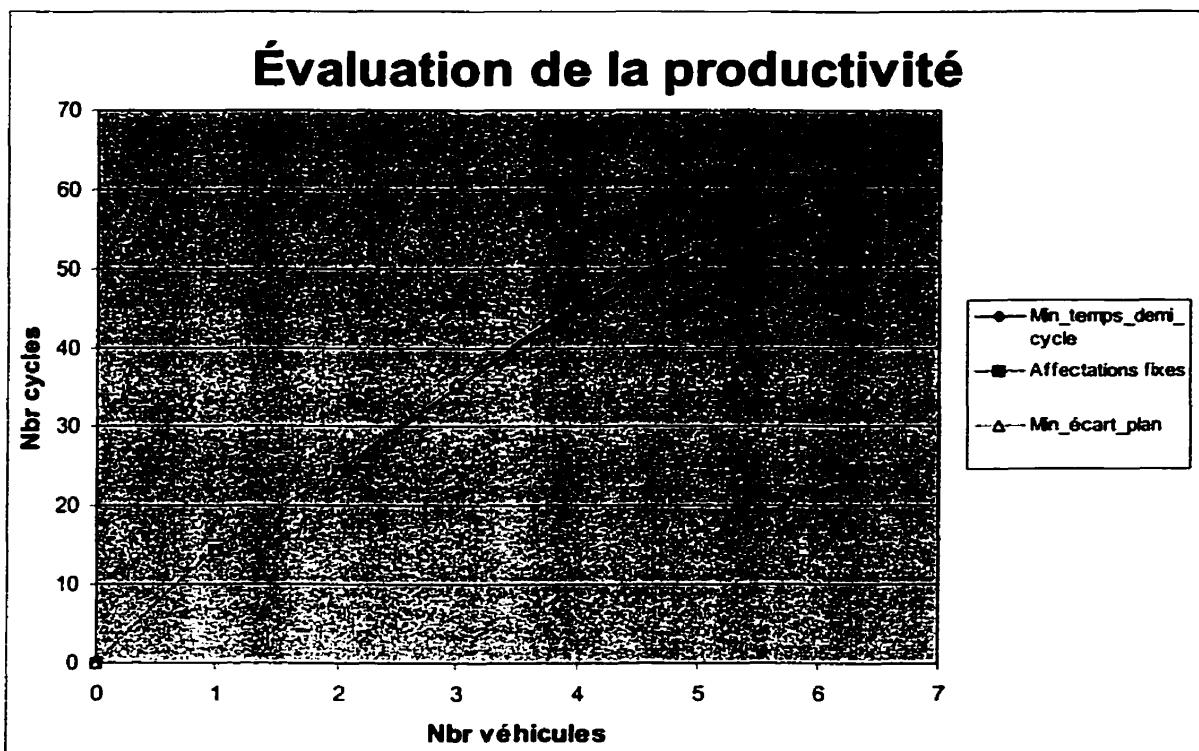


Figure 5.7 Performances selon les critères d'affectation

Les courbes du graphique 5.7 sont surprenantes car elles ne permettent pas de tirer les mêmes conclusions que celles obtenus pour les systèmes destinés aux mines à ciel ouvert. En observant, on remarque que le critère d'affectation fixe permet une productivité plus grande que les deux autres critères. Or pour les systèmes destinés aux mines à ciel ouvert, le critère d'affectation fixe est généralement le plus bas dénominateur commun. Cette étonnante observation conduit à des conclusions intéressante, conclusions qui sont présentées dans la partie 6.

### 5.3 Discussion

En observant le résultats obtenus lors des simulations de la section précédente, on remarque que certaines précisions doivent être apportées afin de bien comprendre quelles sont les forces et les faiblesses du système, particulièrement en ce qui concerne les relations à établir entre les étapes de répartition et de routage d'un véhicule. Comme beaucoup de facteurs entrent dans l'étude du comportement d'une flotte de véhicules, cette section est divisée en trois sous-sections afin d'améliorer la clarté de chacun des thèmes. La première aborde la notion de goulot d'étranglement en relation avec le point de saturation de la mine. Dans la seconde sous-section, le comportement des véhicules en rapport avec la méthode de routage est discuté et finalement le troisième point porte sur l'influence des critères d'affectation sur la productivité générale d'une opération.

#### 5.3.1 Point de saturation

Pour mesurer, supporter et enrichir la notion de point de saturation, il serait souhaitable d'effectuer un retour sur les graphiques 5.4 et 5.5. En effet, en portant une attention à la courbe de performance du graphique 5.5, on remarque que le point de saturation n'a pu être atteint comparativement au graphique 5.4 où la productivité cesse d'augmenter à deux véhicules. Si on revient sur la notion de point de saturation, on se souvient qu'elle a été définie comme étant le point où l'ajout d'un véhicule dans le réseau ne fait plus augmenter la productivité de la mine. Or cette définition implique que seuls les points de service de la mine sont considérés. Pourtant, dans une mine souterraine, les contraintes liées à la capacité de transport du réseau sont importantes. De plus, dans une opération souterraine, il n'est pas rare de retrouver plusieurs points de service pouvant être visités, surtout quand la flotte de transport est constituée de véhicules de type chargeuse navette, où il n'y a pas de coûts reliés à l'opération de pelles pour la mise en opération d'un point de chargement. Pour résumer ces propos, la figure 5.8 est présentée.

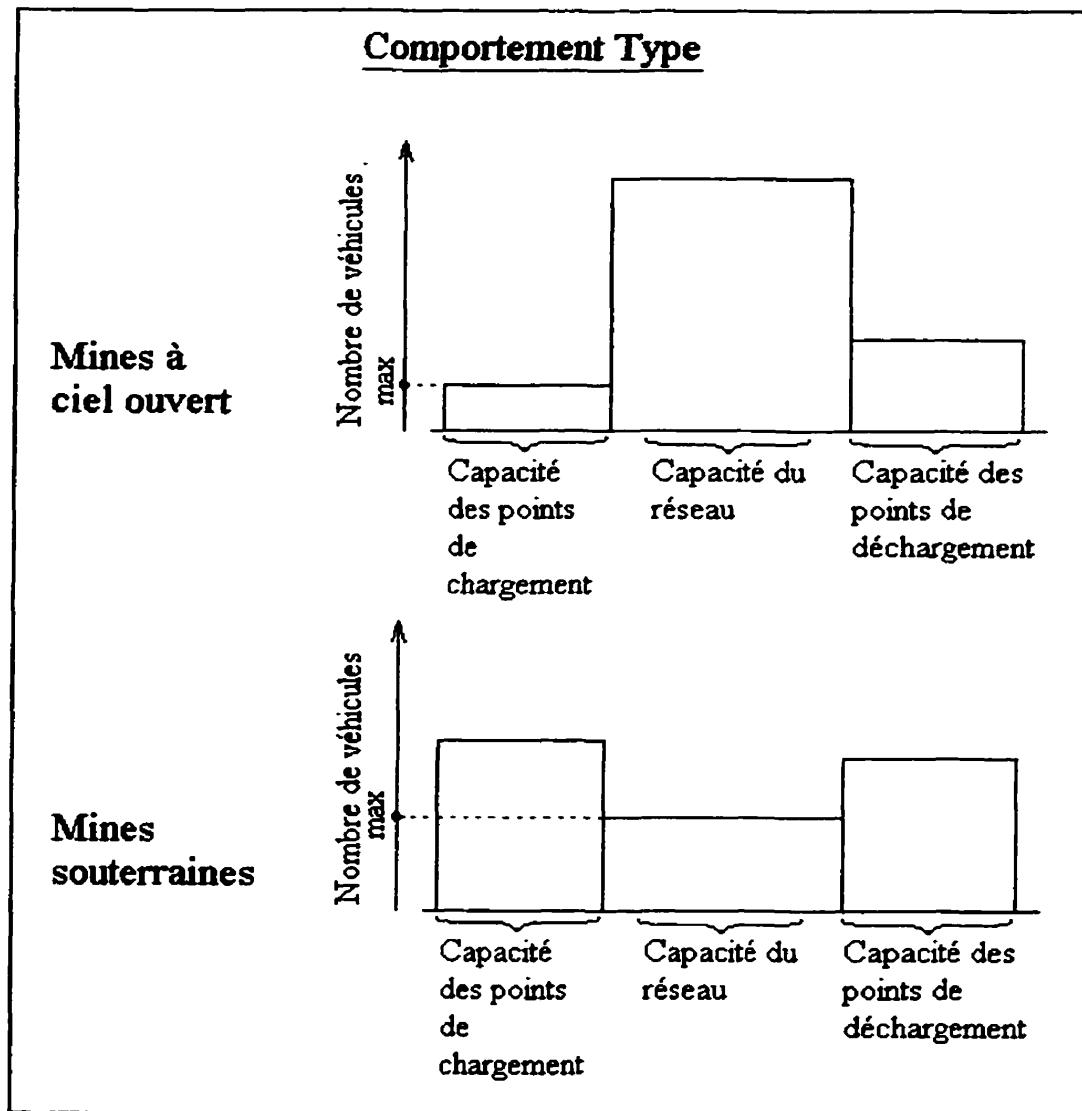


Figure 5.8 Goulot d'étranglement

Cette figure indique que les courbes de saturation, telles que présentées ne doivent plus atteindre un plateau pour fournir de l'information pertinente. En effet, si une courbe est interrompue pendant qu'elle est encore croissante, c'est que le système ne peut plus fonctionner sans que des blocages totaux surviennent. Quand c'est le cas, c'est que le nombre de véhicules est maximal pour la méthode de routage utilisée. La capacité

maximale des points de chargement et de déchargement signifie qu'à partir de cette quantité de véhicules la productivité cesse d'augmenter tandis que la capacité maximale du réseau indique qu'à partir de ce point les véhicules ne peuvent plus circuler sans être en conflit.

La figure 5.8 fait référence au premier comportement comme étant le comportement d'une mine à ciel ouvert et le second comme étant un comportement d'une mine souterraine, or, ce n'est que pour des fins de généralisation que ces termes sont utilisés et ce qui est important de retenir c'est que le système développé pour les mines souterraines a permis d'identifier l'effet limitatif du réseau de transport utilisé et permet de mieux évaluer les courbes de performances du systèmes même si ces dernières n'atteignent pas le niveau de saturation tel que défini pour les mines à ciel ouvert.

### 5.3.2 Effet de la méthode routage

Dans la sous-section précédente la notion de capacité du réseau de transport a été introduite. En décrivant l'interruption des courbes de performances, il a été question de quantité maximale de véhicules pouvant fonctionner sur un réseau de transport et ce, en fonction de la méthode de routage utilisée. La méthode utilisée par le système développé dans ce travail a été abondamment décrite faisant souvent référence au fait que le système peut affecter qu'un véhicule à la fois en fonction du comportement des autres véhicules déjà en circulation. Cette façon de faire contraint la quantité de véhicules sur réseau comparativement à une méthode qui permettrait de choisir des routes pour plusieurs véhicules à la fois. Le développement d'une telle méthode engendrerait une baisse des temps de cycle, permettant d'augmenter la capacité du réseau de transport.

Un des principaux regrets face à ce travail est de ne pas avoir été en mesure de comparer la méthode de routage avec d'autres méthodes car bien que nous savons qu'il est

possible de faire mieux, - quoi que ça n'a pas encore été fait -, il aurait été très intéressant d'évaluer le rendement de notre méthode face à d'autres méthodes on-line. Une telle opération aurait nécessité toutefois beaucoup de changements par rapport aux éléments de solutions déjà implantés.

### 5.3.3 Effet du critère d'affectation

Le critère d'affectation utilisé pour diriger les véhicules vers les points de chargement a également une grande influence sur les performances du système. Avant d'entamer toute discussion, il est important d'effectuer un retour sur le graphique 5.7 où les performances du système en fonction des différents critères sont exposées. La première surprise à la vue de ces courbes est le bon rendement obtenu par l'utilisation du critère d'affectation fixe. Pour être honnête, la raison pour laquelle ce critère a été implanté était de l'utiliser comme borne inférieure de comparaison, or voilà qu'il s'avère être le plus performant quand le nombre de véhicules augmente. La sous-section précédente introduit un début d'explication, en abordant la notion de congestion sur le réseau de transport. En effet, en utilisant un critère d'affectation heuristique dont la portée est relativement courte, différents effets sournois sont amplifiés. Voici un exemple de conséquences non désirées ainsi qu'une explication concernant le double effet qu'il a sur les mines souterraines comparativement aux mines à ciel ouvert.

La figure 5.9 illustre la mine sur laquelle l'exemple est illustré. La construction est très sommaire, mais permet de bien comprendre le problème.

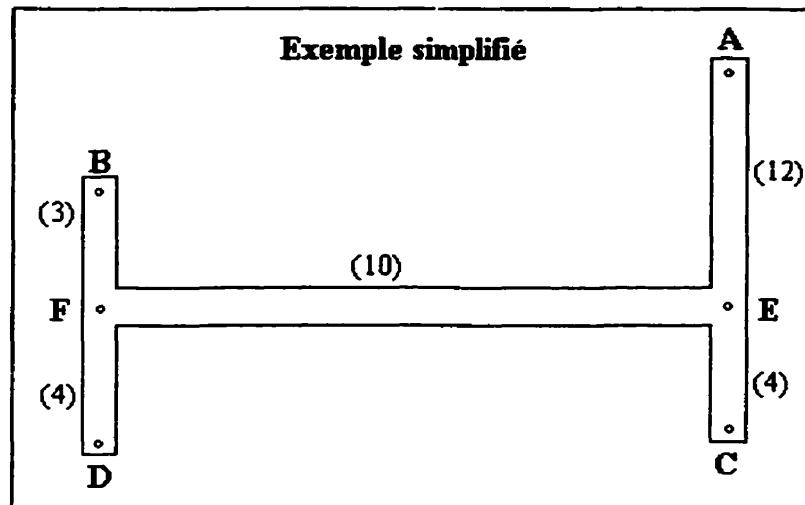


Figure 5.9 Exemple

Trois véhicules circulent sur le réseau, le véhicule #1 qui se trouve au point A au temps 0 prêt à être affecté, le véhicule #2 au point C également prêt à être affecté au temps 0 et finalement le troisième véhicule au point D et ce au temps 0. Tous ces véhicules demandent des affectations qui sont données suivant l'ordre des demandes, soit le véhicule #1 ensuite #2 et finalement #3. Le temps de service est de 15 unités de temps. Voici le tableau des affectations données par le système, s'il utilise le critère d'affectation, minimisation du temps de demi-cycle.

Tableau 5.5 Exemple, cas#1

Véhicule #1	Véhicule #2	Véhicule #3
A_0 -- E_12	C_0 -- E_4	D_0 -- F_4
E_12 -- C_16	E_4 -- F_14	F_4 -- F_15
C_16 -- C_31 (service)	F_14 -- B_17	F_15 -- E_25
	B_17 -- B_32 (service)	E_25 -- A_37
		A_37 -- A_52 (service)

Si d'un autre côté le système utilise le critère affectation fixe et que les affectations pré-déterminées sont A-D et B-C, les routes données sont les suivantes :

Tableau 5.6 Exemple, cas#2

Véhicule #1	Véhicule #2	Véhicule #3
A_0 -- E_12	C_0 -- E_4	D_0 --- F_4
E_12 --- C_16	E_4 -- E_13	F_4 --- B_7
C_16 -- C_31 (service)	E_13 -- A_25	B_7 --- B_22 (service)
	A_25 -- A_40 (service)	

La somme des temps de transport générés par l'utilisation du critère minimisation du temps de demi-cycle est de ( $31 + 32 + 52 = 115$ ) tandis qu'avec l'affectation fixe la somme des temps de transport est de ( $31 + 40 + 22 = 93$ ). Cette augmentation des temps de transport est le premier effet négatif de l'utilisation de l'heuristique minimisation du temps de demi-cycle. Or, pour les mines à ciel ouvert, elle s'est avérée malgré tout, plus efficace que l'affectation fixe, ce qui nous amène à se demander pourquoi n'est-ce pas le cas pour les mines souterraines. En fait, un second effet, plus sournois encore, intervient dans une situation comme celle-là si on utilise un critère dit myope comme la minimisation du temps de demi-cycle. La cause de cet effet est la même que dans le cas qui vient d'être illustré, c'est-à-dire l'attente et le transport inutile des véhicules. Au lieu de se concentrer uniquement sur les pertes de temps des véhicules, il faut regarder la perte de capacité du réseau de transport. En effet si des véhicules attendent à des intersections ou sur des segments, ils réduisent la capacité de transport du réseau et engendrent des blocages totaux. Les mêmes observations peuvent être faites pour la minimisation des écarts de production qui considère qu'un seul véhicule à la fois dans son processus de décision. Il est également très intéressant de constater qu'avec la minimisation du temps de demi-cycle, le point de saturation est atteint sur la figure 5.7. Ceci permet de conclure que l'augmentation des temps de cycle des véhicules a fait en sorte que la capacité maximale des points de chargement ou de déchargement a été plus rapidement atteinte.

Il faut également noter que l'affectation fixe s'est tout de même faite de façon intelligente, c'est-à-dire l'attribution du nombre de véhicules sur chaque boucle

« origine-destination » s'est effectuée de façon à réduire les blocages totaux ou la saturation. Finalement, il faut rappeler l'affectation fixe utilise la même méthode de routage que celle utilisée par les autres critères.

En résumé, il est particulièrement important dans les mines souterraines à segments bidirectionnels que le critère d'affectation puisse prendre en considération l'impact de ces décisions sur les pertes de temps totales du transport des véhicules, mais également l'impact de ces décisions sur la capacité de transport du réseau.

## CHAPITRE 6

### Conclusion

Au cours des dernières années, les mines à ciel ouvert ont amélioré le rendement de leurs flottes de véhicules par l'utilisation de systèmes de contrôle et de suivi qui permettent d'optimiser le transport des véhicules. De son côté, l'industrie manufacturière a su utiliser d'autres types de systèmes de gestion et de répartition des véhicules pour rendre plus performantes les opérations de transport sur les planchers de production. C'est à partir de ces deux constats, mais surtout compte tenu de la difficulté d'adapter ces systèmes pour les mines souterraines, que nous avons décidé d'aborder le problème touchant directement les mines souterraines. Bien entendu, les défis à relever pour en venir à développer des méthodes de contrôle et d'optimisation efficaces pour les environnements souterrains sont de taille, toutefois, loin de prétendre pouvoir tous les résoudre, nous avons tenté tout au long de ce travail, d'amener une approche générale du problème, pouvant considérer à la fois le problème de routage, d'ordonnancement et de répartition, afin d'en faire ressortir les éléments les plus prometteurs et d'en éliminer les aspects moins intéressants.

Pour effectuer un retour éclairé sur l'ensemble du travail la conclusion est divisée en deux sections, la première effectuant un retour sur l'ensemble des éléments soulevés dans ce travail et la seconde dressant un portrait des aspects à améliorer et des tendances à adopter pour pousser plus loin la portée d'un éventuel système de gestion et de répartition des véhicules dans les mines souterraines.

## 6.1 Retour sur le travail

Le travail qui vient d'être présenté est divisé en six principales parties. Dans la première partie, soit l'introduction, les objectifs et principales orientations du travail ont été présentées. En effet, à travers l'introduction a été exposé la nécessité de développer un système de gestion et de répartition des véhicules conçu en fonction et pour les mines souterraines. C'est en portant un regard global sur les systèmes existants dans les mines à ciel ouvert, ainsi que ceux utilisés dans les environnements manufacturiers qu'a été justifié le bien fondé de ce travail.

Dans la partie suivante, les particularités des mines souterraines ont été abordées dans le but de bien comprendre les problèmes auxquels il fallait faire face et spécifiquement les problèmes que d'autres systèmes ne peuvent résoudre. Cette partie a permis d'identifier les contraintes de circulation sur des segments bidirectionnels à une voie, d'orientation des véhicules, de points de services et de voies d'évitements, mais également de définir les trois principaux problèmes que le système doit inclure soit le routage l'ordonnancement et la répartition.

Une fois le problème défini, la revue de la littérature a été présentée. À travers cette troisième partie, trois thèmes ont été couverts : les mines à ciel ouvert, les mines souterraines et les environnements manufacturiers. Les travaux couvrant les mines à ciel ouvert ont permis de prendre conscience de l'importance des bons choix d'affectation des véhicules pour ainsi augmenter l'ensemble de la productivité d'une opération. Du côté des mines souterraines, le constat principal a été le faible nombre de travaux touchant directement notre problème. Toutefois, ceux effectués par Vagenas ont permis de mieux identifier les caractéristiques propres des mines souterraines comme la question des conflits sur les segments bidirectionnels. La section touchant les systèmes des environnements manufacturiers a été cruciale. C'est à travers l'article de Kim et Tanchoco datant de 1991, que la méthode que nous avons présentée a prise ses racines.

En effet Kim et Tanchoco ont étudié le comportement des véhicules sur des segments bidirectionnels et ont présenté une approche de résolution efficace, permettant ainsi de résoudre plusieurs aspects du routage des véhicules.

Après avoir décrit le problème et étudier les différentes approches de résolution, les conditions sont en place pour développer notre propre système. Le système proposé dans la quatrième partie de ce travail est un système effectuant le routage, l'ordonnancement et la répartition des véhicules en temps réel, en considérant les contraintes d'orientation des véhicules et de conflits frontaux sur les segments et ce, par l'entremise d'un plus court chemin acyclique, effectué sur un graphe discrétré. Le graphe en question est modélisé de façon à ce qu'il puisse éviter les blocages totaux. Il permet également d'inclure différents critères d'affectation heuristiques.

Par rapport aux autres systèmes exposés dans la revue de la littérature, le modèle présenté démontre deux innovations principales. Tout d'abord il permet d'identifier le sens des véhicules et de choisir de façon optimale l'endroit où un véhicule peut changer d'orientation avant de se présenter aux points de service. Deuxièmement le modèle est construit de façon à ce que les blocages totaux puissent être évités. Pour les systèmes destinés aux mines souterraines, ces facteurs ne pouvaient être négligés et devaient être résolus avant de penser introduire de la variabilité. Comme toutes les contraintes sont introduites à l'intérieur même du graphe, la résolution se fait très rapidement et permet d'affecter les véhicules en temps réel.

La quatrième partie présente les tests faits sur le système développé et propose une discussion sur les forces et les faiblesses d'un tel système. À titre de point positif, l'inclusion des contraintes des trois sous-problèmes à l'intérieur du même graphe, fait en sorte que le calcul d'une affectation par un algorithme de plus court chemin acyclique est très rapide. D'un autre côté, l'importance de l'impact des interactions entre les véhicules s'est avéré être un aspect à améliorer. Tout compte fait, nous avons rempli les

objectifs fixés au début du travail et exploré une avenue qui offre des éléments qui seront sûrement utiles à d'autres travaux, ce qui nous emmène à la dernière section du travail, soit les recommandations faites pour les travaux futurs.

## 6.2 Recommandations

Durant le développement d'un travail comme celui qui vient d'être présenté, certaines décisions contraignantes doivent être prises. En ce qui nous concerne, aucune variabilité n'a été introduite dans la modélisation du problème. Toutefois pour préparer le terrain à la mise en place d'éléments stochastiques, la modélisation du problème s'est faite selon une approche on-line, c'est-à-dire en prenant des décisions au fur et à mesure que des demandes sont transmises au module d'affectation. Or voilà que le problème de blocage total et la congestion sur le réseau outrepasse l'impact que nous croyions qu'ils devaient avoir. Une option peut être envisagée pour résoudre ces problèmes. La voici, sommairement présentée et accompagnée de commentaires personnels.

La modélisation du problème sans faire appel à la discréétisation peut faire en sorte que les temps de calcul du problème soient considérablement réduits. Si tel est le cas, un module de gestion de la variabilité peut être introduit pour vérifier en temps réel à ce que les décisions prises par le module d'affectation soient suivies par les véhicules en circulation. Si tout ne se passe pas comme il est prévu, alors le module de gestion de la variabilité doit évaluer l'impact des changements à l'horaire, sur les routes choisies pour tous les véhicules du réseau. Cette opération peut être lourde, c'est pourquoi le module d'affectation doit être très rapide, car, comme les décisions pour les affectations des véhicules sont prises en fonction des affectations antérieures, un simple changement d'une seconde pourrait chambarder l'ensemble des opérations de la mine.

D'autre part, il serait souhaitable d'acquérir des données sur le transport dans les mines pour évaluer la variabilité réelle des véhicules de type chargeuse navette.

## CHAPITRE 7

### Bibliographie

BATTA et KARWAN (1993), 'Developping conflict-free routes for automated guided vehicles' Operations Research Vol. 41, no.6, 1077-1090

BONATES et LIZOTTE, 'A combined approach to solve truck dispatching problems' Computer Applications in the mineral Industry, 1988 Balkema, Rotterdam, ISBN 90 6191 7603.

BONATES, (1992), 'The development of Assignment procedures for semi-automated truck/shovel system', Ph D thesis, McGill University, Montreal

BROUWER, 'Computer-Scheduled Preventive Maintenance System' Computer methods for the 80's in the mineral industry, Alfred Weiss, editor (1979)

EGBELU et TANCHOCO (1984), 'Characterization of automatic guided vehicle dispatching rules', Int. J. Prod. Res. vol 22. no 3. 359-374

EGBELU et TANCHOCO (1986), 'Potentials for bi-directionnal guide-path for automated guided vehicle based systems' Int. J. Prod. Res. vol 24. no 5 1075-1097

ELBROND et SOUMIS, 'Towards integrated production planning and truck dispatching in open pit mines' Internationnal Journal of Surface Mining 1 (1987) :1-6

FATANEH TAGHABONI-DUTTA (1997), 'A value-added approach for automated guided vehicle task assignment' Journal of manufacturing systems vol. 16 no. 1, 1997

HSIEH ET KANG (1998), 'Developping AGVs petri net control models from flowpath nets', Journal of manufacturing systems, Vol 17, No 4, 1998

HUANG, PALEKAR et KAPOOR (1993), 'A labelling algorithme for the navigation of automated guided vehicles' Journal of engineering for industry, august 1993, vol 115/ 315

KIM et TANCHOCO (1991), 'Conflict-free shortest-time bidirectional AGV routeing' Int. J. prod. Res. vol 29, no 12 2377-2391

LANGEVIN, LAUZON et RIOPEL (1994), 'Dispatching, routing and scheduling of two automated guided vehicles in a flexible manufacturing system' International Journal of Flexible Manufacturing Systems, 8(3), 247-262.

LEE (1995), 'Scheduling flexible manufacturing systems using petri nets and heuristic search' IEEE Transactions on robotics and automation, Vol 10, No 2, april 1994

MUNIRATHINAM et YINGLING, (1994), 'A review of computer-based truck dispatching strategies for surface mining opérations' Internationnal Journal of Surface Mining, Reclamation and environment 8.

NARASIMHAN, BATTA et KARWAN (1999), 'Routing automated guided vehicles in the presence of interruptions' Int. J. Prod. Res. vol 37, no 3, 653-681

OLIVIERI et MEILLER, 'The value of truck Dispatch' Mining Magazine, November 1992

RAJOTIA, SHANKER et BATRA (1998), 'A semi-dynamic time window constrained routeing strategy in an AGV system' Int. J. Prod. Res. vol 36, no 1, 35-50

SABUNCUOGLU et HOMMERTZHEIM (1992), 'Dynamic dispatching algorithm for scheduling machines and automated guided vehicles in a flexible manufacturing system'  
Int. J. Prod. Res. vol 30, no 5, 1059-1079

SEIFERT, KAY et WILSON (1998), 'Evaluation of AGVs routeing strategies using hierarchical simulation' Int. J. Prod. Res. vol 36, no 7, 1961-1976

SOUMIS, ETHEIER, MCINNINS et ELBROND, 'Algorithmes d'optimisation pour la gestion d'une flotte de camions dans une mine à ciel ouvert' Computer Applications in the mineral Industry, 1988 Balkema, Rotterdam ISBN 90 6191 7603

TAGHABONI et TANCHOCO (1988) , 'A Lisp-based controller for free-ranging automated guided vehicle systems' Int. J. Prod. Res. vol 26. no 2 173-188

VAGENAS (1991), 'Dispatch control of a fleet of remote-controlled/automatic load-haul-dump vehicles in underground mines' Int. J. Prod. Res. vol 29, no 11, 2347-2363

WHITE, OLSON et VOHNOUT, 'On improving truck/shovel productivity in open pit mines' CIM Bulletin, september 1993

YIM et LINN (1993), 'Push rules pull for dispatching automated guided vehicles in a flexible manufacturing system' Int. J. Prod. Res. vol 31, no 1, 43-57

ZENG, WANG et JIN (1991), 'Conflict detection of automated guided vehicles: a petri net approach' Int. J. Prod. Res. vol 29, no 5, 865-879

ZOSCHKE et WHITE, (1997), 'Mine management Systems : The next Millenium', Presentation at the CIM Annual Meeting, Modular Mining Systems, Inc., Tucson, Arizona