

**Comparaison d'approches de
modélisation de problèmes tests
pour le pilotage du transport :
application aux mines à ciel ouvert**

A. Jaoua, M. Gamache,
D. Riopel

G-2007-102

Décembre 2007

Les textes publiés dans la série des rapports de recherche HEC n'engagent que la responsabilité de leurs auteurs. La publication de ces rapports de recherche bénéficie d'une subvention du Fonds québécois de la recherche sur la nature et les technologies.

**Comparaison d'approches de modélisation de
problèmes tests pour le pilotage du transport :
application aux mines à ciel ouvert**

**Amel Jaoua
Michel Gamache
Diane Riopel**

*GERAD, CIRRELT
École Polytechnique de Montréal
C.P. 6079, Succ. Centre-ville
Montréal (Québec) Canada, H3C 3A7
{amel.jaoua, michel.gamache, diane.riopel}@polymtl.ca*

Décembre 2007

Les Cahiers du GERAD

G-2007-102

Copyright © 2007 GERAD

Résumé

Cet article vise l'analyse du type de modélisation des problèmes tests utilisés par les chercheurs pour valider leurs stratégies de pilotage des systèmes de transport. Pour la gestion du trafic, deux principaux types de modélisation sont utilisés : macroscopique et microscopique. Tandis que pour la gestion dynamique des flottes de véhicules, la majorité des problèmes tests sont modélisés uniquement selon une composante macroscopique. Nous démontrons que la modélisation macroscopique peut biaiser les résultats obtenus par simulation et causer ainsi un large écart de performance entre les résultats simulés et réels. Cet écart est aujourd'hui critiqué par les responsables dans les entreprises du transport qui pensent que les chercheurs avancent des résultats utopiques. Nous montrons l'écart de performance entre ces deux types de modélisation sur un problème test typique des systèmes de transport minier. Ce problème test est utilisé dans la validation des algorithmes de gestion dynamique de flotte de camions. Nous décrivons aussi le modèle orienté objet que nous avons développé afin d'implanter un simulateur microscopique de pilotage de système de transport minier. Cette approche objet permet la réutilisabilité de ce simulateur microscopique pour d'autres problèmes tests.

Mots clés : pilotage du transport, répartition, camions, modélisation microscopique, modélisation macroscopique.

Abstract

This article aims to analyse the modelling concept used by researchers, in the benchmark-problems, for performance evaluation of control strategies in transport systems. For traffic management, two modelling approaches are used : macroscopic and microscopic models. However, for the dynamic fleet management, the majority of the benchmark-problem instances are modelled macroscopically. We prove that the macroscopic modelling can lead to biasing the simulation results, and thus cause a wide performance gap between the simulated and the real world. This gap is nowadays criticized by the managers of transport companies whom think that the researchers advance utopian results. We show the gap of performance between these two types of modelling on typical benchmark-problem instances of mining transport system. These instances are used to validate dynamic trucks dispatching algorithms. We also describe the object-oriented model which we developed to implement a microscopic simulator for mining transport system control. This object modelling approach allows the reusability of the microscopic simulator for further benchmark-problems.

Key Words : Transport control, Dispatching, Trucks, Microscopic modelling, Macroscopic modelling.

1 Introduction

Il existe plusieurs variantes du pilotage des systèmes de transport qui dépendent du domaine d'application : transport aérien, transport ferroviaire, transport routier, transport minier, etc. Dans le présent travail, on s'intéresse au pilotage des systèmes de transport routier et du transport minier.

Pour le transport routier, on distingue principalement deux catégories de problématiques largement étudiées dans la littérature. La première porte sur la gestion du trafic et la seconde sur la gestion de flottes de véhicules. Bien que ces deux volets aient suscité l'intérêt de plusieurs chercheurs depuis des décennies, rares sont les travaux qui les étudient conjointement. Pour la problématique reliée à la gestion du trafic, qui est de nature dynamique, on trouve dans la littérature différentes approches de modélisation pour la reconstitution des états du réseau de trafic routier. Ces modèles permettent principalement de tester et d'évaluer les stratégies de régulation. Bourrel (2003) scinde ces modèles en deux grandes catégories : les modèles macroscopiques et les modèles microscopiques. Les modèles macroscopiques consistent à décrire le trafic comme un flux continu et unidimensionnel, par analogie avec la mécanique des fluides. Alors que les modèles microscopiques s'intéressent à une description détaillée des trajectoires et de la dynamique des véhicules individualisés.

Quant à la problématique reliée à la gestion de flottes de véhicules, on discerne dans la littérature plusieurs stratégies de répartition en temps réel basées sur des algorithmes d'optimisation (Laporte et Osman, 1995 ; Gendreau et al., 1999). Bien que l'application de ces algorithmes sur des problèmes tests semble performante, Burckert et al. (2000) critiquent le large écart entre les résultats attendus (simulés sur des problèmes tests) et ceux générés par l'implantation réelle de ces algorithmes. Ils concluent à l'inadéquation de ces méthodes pour un pilotage en temps réel robuste des systèmes de transport actuels. Pour comprendre les raisons de ce large écart de performance, nous avons étudié les modèles des problèmes tests utilisés pour la validation de ces algorithmes. Nous avons ainsi décelé que la majorité des problèmes tests utilisés pour la validation de ces stratégies dynamiques de pilotage (Godfrey et Powell, 2002 ; Rousseau, 2003 ; Larsen et al., 2004 et Ichoua et al., 2006) sont modélisés uniquement selon une composante macroscopique. Les performances de ces algorithmes stochastiques de pilotage sont ainsi testées sur des graphes dans lesquels des temps de parcours sont associés aux arcs en ignorant alors la dynamique engendrée par les interactions sur le réseau physique.

L'idée du présent article est de mesurer, sur un problème test typique de pilotage des systèmes de transport minier, l'éventuelle différence de performance entre une modélisation macroscopique et une modélisation microscopique. Cette différence pourrait expliquer le large écart entre les résultats théoriques (simulés) et réels de ces algorithmes.

Dans cet article on s'intéresse au pilotage en temps réel d'une flotte de camions évoluant dans un système de transport minier. Cette application s'apparente avec la problématique de gestion en temps réel d'une flotte de camions routiers. En effet, dans une mine à ciel ouvert, il faut piloter une flotte constituée de camions et de pelles. Sur un réseau de trans-

port minier, les camions transportent soit le minerai détaché du front de taille par les pelles (points de collecte) vers le lieu de traitement soit le stérile vers un lieu d'entreposage (points de livraison). Une fois que le camion a déversé sa charge, il faut l'affecter à une pelle (génération d'une requête) de façon à satisfaire plusieurs contraintes dynamiques (état de la pelle, niveau du mélange du minerai acheminé au concasseur, plan de production, etc.). Comme pour les algorithmes de pilotage d'une flotte de véhicules routiers, plusieurs travaux critiquent l'écart entre les résultats simulés et réels de l'implantation des algorithmes stochastiques de répartition de flotte de camions miniers (Dunbar et al., 2003 ; Chung et al., 2005). Dans le domaine minier, la modélisation des problèmes tests utilisés se base uniquement sur l'approche macroscopique. Ces modèles ne reproduisent pas l'aspect dynamique engendré par les interactions physiques sur le réseau de transport d'une mine.

Afin de pouvoir mener une analyse comparative sur les types de modélisation des problèmes tests, nous proposons, dans un premier temps, un modèle générique orienté objet que nous avons développé afin d'implanter un modèle microscopique de simulation de pilotage de système de transport minier. Nous présentons, en second lieu, les résultats comparatifs entre la modélisation macroscopique et notre modélisation microscopique des systèmes de transport minier. Cette évaluation porte sur un problème test largement utilisé dans l'évaluation des algorithmes d'optimisation de routage et d'ordonnancement de la flotte de camions miniers.

2 Revue de littérature

2.1 Modélisation des problèmes tests pour le pilotage des systèmes de transport routier

En s'intéressant au pilotage des systèmes de transport routier, on trouve que les travaux dans ce domaine sont scindés selon deux axes de recherche. Le premier axe traite des problèmes de gestion de trafic routier, tandis que le deuxième concerne la gestion de flottes de véhicules de transport.

2.1.1 Problèmes de gestion de trafic routier

Les objectifs de gestion de trafic routier sont présentés par Bourrel (2003) comme regroupant :

- la définition des stratégies d'action pour répartir et contrôler les flux de trafic et éviter l'apparition des perturbations ou d'en atténuer les effets ;
- la mise en place d'actions préventives comme la proposition des itinéraires non congestionnés ;
- le traitement en temps réel des flux de trafic pour la réduction des effets des perturbations à travers des stratégies de gestion des zones de goulot et des intersections comme les barrières de péage, les feux, etc.

Afin d'évaluer et de valider les performances des méthodes de gestion de trafic à implanter, les chercheurs ont recours à la modélisation de problèmes tests leur permettant de reproduire les états du trafic. Dans la littérature, on discerne principalement deux grandes catégories de modélisation en vue d'implantation des problèmes tests pour l'évaluation des stratégies de gestion de trafic routier : la modélisation macroscopique et la modélisation microscopique. Avec la modélisation suivant une composante macroscopique le déplacement de l'entité unique n'est pas représenté mais seul compte le fonctionnement à un niveau agrégé. La propagation des véhicules est décrite à travers des variables globales : le débit, la concentration (nombre de véhicules par unité d'espace) ou bien la vitesse du flot (vitesse moyenne des véhicules). À l'opposé, la modélisation microscopique tente de s'approcher le plus possible du comportement réel des véhicules en définissant selon l'application le niveau de granularité désiré : il peut s'agir du comportement du conducteur et de celui de son véhicule ou bien encore du comportement du couple conducteur-véhicule. Cette approche microscopique vise l'analyse des composants du réseau de transport. Elle s'appuie sur des notions d'entités (tronçon, intersection, conducteur, véhicule, signalisation, etc.), chacune caractérisée par des attributs, pour modéliser leurs interactions.

Plusieurs travaux proposent une synthèse et une revue détaillée sur ces modèles, le lecteur pourra se reporter à la thèse de Bourrel (2003). De même, Hervieu (2006) présente une revue détaillée dans laquelle il rajoute la définition de modèles hybrides appelés modèles mésoscopiques. Lebacque et Khoshyaran (1998) précisent que chaque type de modélisation est orienté vers des applications qui correspondent à une taille de réseau donné. Les modèles macroscopiques sont mieux adaptés pour la régulation, la prévision et la planification du trafic sur les grands réseaux routiers caractérisés par des phénomènes d'écoulement homogène, par exemple une autoroute à quatre voies. Hervieu (2006) définit l'approche microscopique comme étant la mieux adaptée pour la prise en compte et l'analyse robuste du trafic et des phénomènes d'interaction principalement présents dans un système de transport routier urbain. Cependant, étant donné la complexité du développement des modèles microscopiques et les quantités importantes de calcul qui peuvent en résulter, il faudra choisir le niveau de description du comportement que l'on souhaite simuler en fonction de l'application.

2.1.2 Problèmes de gestion de flottes de véhicules

Les problèmes de gestion de flottes de véhicules peuvent être de nature statique ou dynamique. Dans le cas statique, plusieurs algorithmes ont été proposés pour identifier, dans un cadre invariant, un ensemble de routes minimisant une fonction de coût prédéfinie. Mais ces algorithmes ne peuvent pas gérer l'aspect dynamique du monde réel comme l'arrivée de requêtes inattendues (Laporte et Osman, 1995). En s'intéressant alors à l'aspect dynamique de la gestion de la flotte, on discerne dans la littérature de nombreux modèles de répartition en temps réel de la flotte de véhicules (Laporte et Osman, 1995 ; Gendreau et al., 1999). Ichoua (2001) classe, selon le type de l'application et le degré de dynamisme, les problèmes de répartition des véhicules en temps réel. Parmi ces applications, on dis-

tingue entre autres les problèmes de camionnage, les problèmes de transport sur demande, les problèmes de service de courrier rapide, les problèmes de réparateur, les problèmes de services d'urgence. Pour chaque type de problèmes, on trouve dans la littérature plusieurs modèles, certains étant basés sur la programmation linéaire en nombres entiers d'autres, plus récents, sont basés sur la programmation stochastique. Bien que l'application de ces algorithmes sur des problèmes tests semble performante, Burckert et al. (2000) critiquent le large écart entre les résultats attendus (simulés sur des problèmes tests) et ceux générés par l'implantation réelle de ces algorithmes.

Ainsi, en analysant les modèles des problèmes tests utilisés pour la validation des méthodes dynamiques de gestion de flottes de véhicules dans les travaux de (Laporte et Osman, 1995 ; Gendreau et al., 1999 ; Godfrey et Powell, 2002 ; Rousseau, 2003 ; Larsen, 2004 et Ichoua et al., 2006) nous avons décelé un recours commun à la modélisation macroscopique des problèmes tests. En effet, ces travaux ont principalement recours à des variantes des problèmes tests euclidiens créés par (Solomon, 1987). Les performances de ces méthodes dynamiques de pilotage sont alors testées sur des graphes pour lesquels des poids (dépendant principalement des distances) sont associés aux arcs, en ignorant ainsi la dynamique engendrée par les interactions du trafic routier sur le réseau physique. Ce recours à la modélisation macroscopique peut s'expliquer par la simplicité et rapidité du développement de ces modèles. La complexité de l'approche microscopique réside dans la spécification des intervenants et dans la délimitation du niveau de granularité.

2.2 Modélisation des problèmes tests pour le pilotage des systèmes de transport minier

2.2.1 Pilotage des systèmes de transport minier

Les systèmes de transport des mines à ciel ouvert ont largement suscité l'intérêt de plusieurs travaux de recherche et ils représentent jusqu'à l'heure actuelle une problématique pour les responsables miniers (Chung et al., 2005). En effet, les chercheurs estiment que l'optimisation de ce processus de transport minier peut affecter jusqu'à 50% des coûts opératoires (Alarie et Gamache, 2002 ; Wang et al., 2006).

Ce problème de pilotage d'une flotte de camions peut être classé comme étant un problème de camionnage routier (selon la classification d'Ichoua (2001)) où les points de collecte sont les pelles et ceux de livraison sont les sites de culbutage. La différence est que dans les problèmes de camionnage routier, le degré de dynamisme est plus faible que dans une mine où les délais des requêtes se quantifient en minutes et les attributs du problème (temps de parcours, qualité du mélange, etc.) sont confrontés à plusieurs variations stochastiques. La répartition des camions dans une mine présente aussi des ressemblances avec la classe des problèmes de services d'urgence, caractérisée par la fréquence de l'apparition de nouvelles requêtes (il faut atteindre un niveau de production donné pour chaque pelle), mais la différence principale avec cette classe se situe dans la connaissance du point de déclenchement

des requêtes (les camions sont envoyés à des pelles placées dans des endroits fixes durant le quart de travail).

Ainsi, le problème de gestion de flotte de camions dans une mine présente un degré plus élevé de dynamisme rattaché à la plus grande fréquence d'apparition de requêtes (par rapport aux problèmes de camionnage routier) et à la forte composante stochastique des attributs de chaque nouvelle requête (temps de début de service, temps de parcours, etc.). L'approche la plus commune pour la résolution de ce type de problème consiste à implanter un module de pilotage multiniveau (voir figure 1).

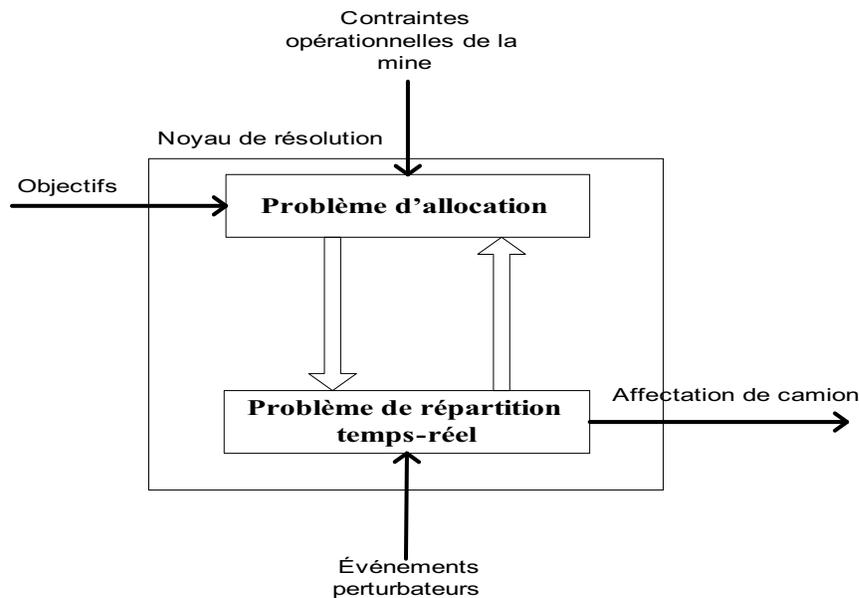


Figure 1 – Module de pilotage multiniveau

Ce module se base sur un noyau de résolution qui propose de résoudre au niveau supérieur le problème d'allocation par des modèles de programmation mathématique. Quand au niveau inférieur, il s'agit de résoudre le problème de répartition en temps réel via des heuristiques.

Pour le niveau supérieur, plusieurs chercheurs proposent des programmes linéaires, (Gamache, 2007 ; Bissiri, 2002 ; White et al., 1993). Chung et al. (2005) ont recours à la programmation stochastique, Temeng et al. (1997) proposent la résolution d'un modèle de programmation par objectifs (goal programming) et Elbrond et Soumis (1987) résolvent un modèle de programmation non linéaire. Au niveau inférieur, on cherche à minimiser les déviations par rapport aux cibles de production des pelles obtenues au niveau supérieur. Munirathinam et al. (1994) présentent une revue de littérature sur les heuristiques de type glouton utilisées pour cette étape de résolution. Plus récemment, Dunbar et al. (2003) proposent une méthode basée sur l'optimisation par colonie de fourmis.

2.2.2 Modélisation des problèmes tests

Bien que Chung et al. (2005), Bissiri (2000), Temeng et al. (1997), White et al. (1991) et Elbrond et Soumis (1987) prouvent par simulation sur des problèmes tests que leurs algorithmes de pilotage sont performants.

Clayton (2005) rapporte l'insatisfaction des responsables miniers des modules de répartition qui sont très peu robustes et sont affectés par un simple retard d'un camion. De même, Wang et al. (2006) critiquent le large écart entre les performances simulées de ces modules et leurs performances réelles en mine. Ainsi comme pour les systèmes de transport routier, notre intérêt se concentre sur l'étude de la modélisation des problèmes tests utilisés pour la validation de ces algorithmes de pilotage du transport minier. Nous constatons que les modèles utilisés sont des modèles macroscopiques. Ces modèles considèrent la propagation des camions à travers des variables globales (la densité du trafic, la vitesse du flux) et définissent ainsi le temps moyen de parcours.

Ces modèles des problèmes tests (voir figure 2) considèrent que la mine est constituée d'une flotte de N camions, d'un ensemble de sites de culbutage (C_i), et d'un ensemble de sites d'extraction (E_j). Les camions attendent leur affectation dans les sites C_i . À partir d'un site C_i , il est généralement possible d'envoyer un camion vers tous les sites E_j . Tandis qu'à partir d'un site E_j il faut le diriger vers des sites C_i spécifiques (c'est-à-dire si le site E_1 extrait du stérile, il faut le diriger vers un site de culbutage C_i de stérile et non pas le diriger vers un concasseur). Suite à la définition des parcours admissibles, un coût noté \hat{C}_{C_i, E_j} est associé à chaque vecteur. Ce coût dépend principalement du temps moyen de parcours entre le couple (C_i, E_j) en tenant compte du sens du vecteur correspondant. En effet, la charge d'un camion minier peut atteindre 360 tonnes et cette charge exerce une influence sur sa vitesse, il faut alors distinguer entre le coût d'un parcours en charge et le coût d'un parcours à vide. À chaque site de culbutage C_i et d'extraction E_j est associé un temps t_s de service dépendant des paramètres techniques de la ressource. Une file d'attente est ainsi créée en amont des sites.

Ce type de modélisation ignore alors les phénomènes d'interaction dans le circuit fermé du réseau de transport minier. Il est vrai que le recours aux modèles macroscopiques peut s'expliquer par la simplicité de leur développement, mais ce manque de réalisme dans la reproduction de l'environnement réel de l'application pourrait être un des facteurs élargissant l'écart entre les résultats réels et ceux simulés par ces modèles. Ainsi, tout comme pour la gestion dynamique de flottes en transport routier, les modules de répartition de flottes dans les mines sont validés sur des modèles macroscopiques. Afin de mener une étude comparative de l'impact de ce choix de modélisation macroscopique des problèmes tests, nous proposons dans la section suivante de développer un modèle générique pour l'implantation d'un modèle microscopique de simulation de pilotage de systèmes de transport minier.

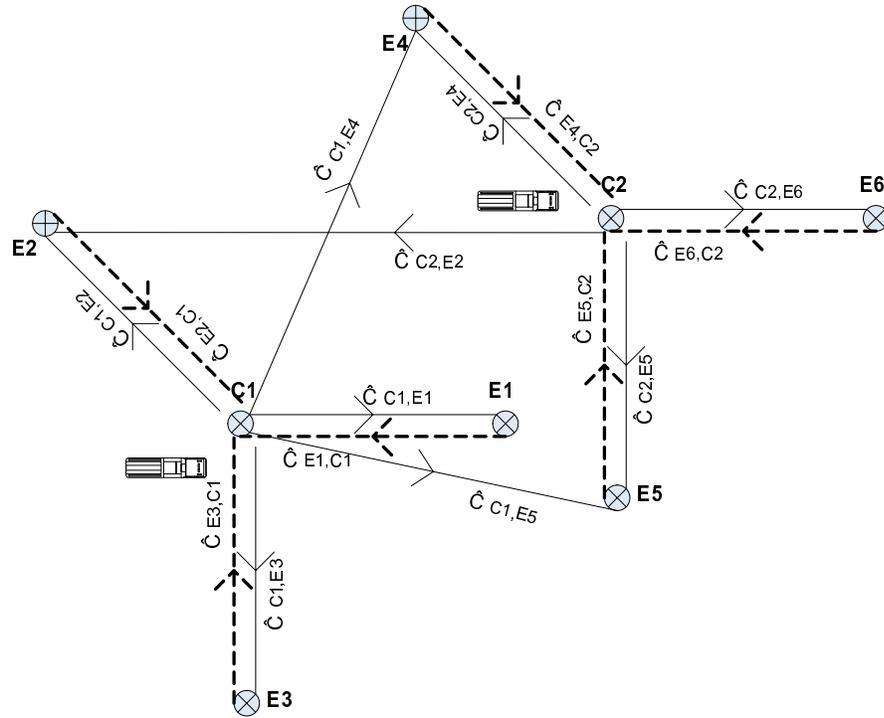


Figure 2 – Exemple typique d’une représentation macroscopique de système de transport minier

3 Méthodologie

Afin que notre simulateur puisse répondre aux besoins de réutilisabilité et d’extensibilité, nous avons opté lors de sa conception pour une approche orientée-objet. En effet, Perret (Perret, 2003) définit la structuration objet comme une réponse adaptée aux besoins d’extensibilité, de réutilisabilité et de qualité logicielle. Grâce à cette approche, nous offrons une plateforme de simulation microscopique permettant une implantation simplifiée de problèmes tests de pilotage des systèmes de transport minier.

Ainsi, à l’aide du digramme de classe UML (Unified Modeling Language), nous formalisons les classes impliquées dans le système. En effet, le langage UML est considéré comme un standard de modélisation objet (Muller et Gaertner, 2000). La seconde étape consiste à implanter ce modèle avec le langage de simulation à événements discrets SIMAN développé par SYSTEM MODELING (Pedgan, 1995) et largement utilisé dans les travaux de recherche actuels (Cardin et Castagna, 2006).

3.1 Modélisation UML

Le diagramme de classe UML représente l'architecture conceptuelle du système. Il décrit les classes que le système utilise en spécifiant les intervenants, ainsi que leurs liens. Dans ce diagramme, les différents types d'association permettent de représenter les relations structurelles qui existent entre les objets de différentes classes, pour plus de détails concernant ces diagrammes le lecteur peut se référer aux travaux de Muller et Gaertner (2000).

Le diagramme de classe UML (voir figure 3) représente les classes qui sont implémentées dans notre système.

Classe *Site d'extraction* : admet deux classes dérivées, *Extraction de stérile* et *Extraction de minéral*. Dans une mine à ciel ouvert, on retrouve généralement ces deux types de site d'extraction, mais il est possible que pour un quart de travail un seul type soit fonctionnel.

Classe *Equipement* : est associée par une relation de contenance (agrégation forte) avec deux classes composites, *Pelle* et *Camion*. Le processus de transport dans une mine à ciel ouvert est basé principalement sur ces deux types d'équipements.

Classe *Site de culbutage* : de même que pour la classe *Site d'extraction*, admet deux classes dérivées, *Concasseur* et *Halde de stérile*.

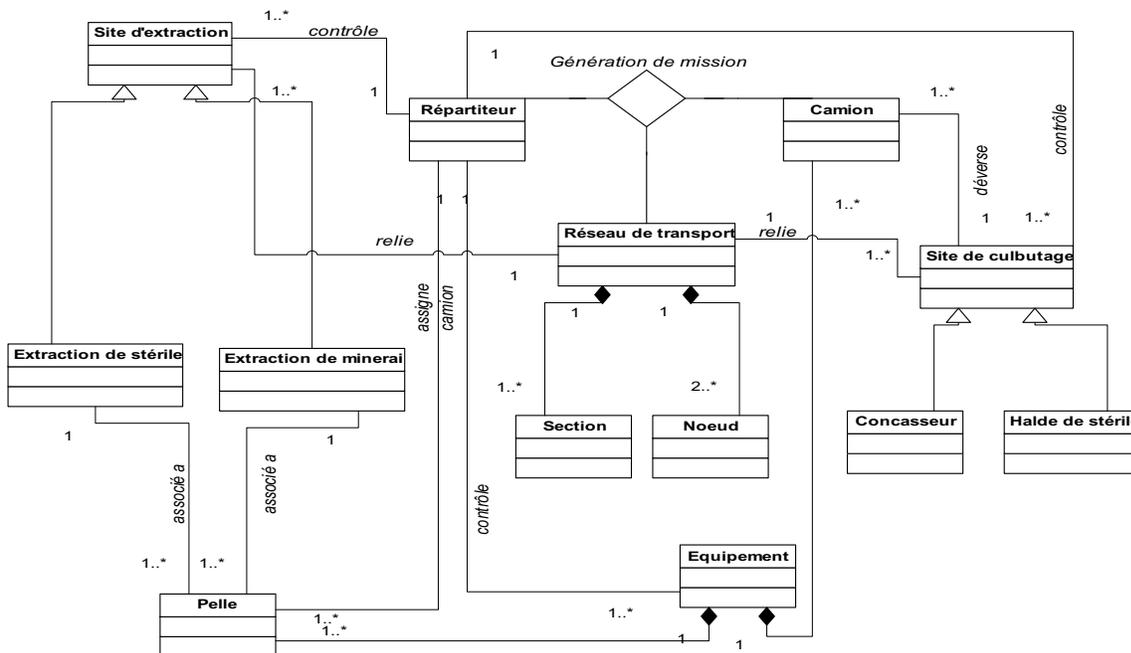


Figure 3 – Diagramme de classes

Classe *Réseau de transport* : associée par une relation de contenance (agrégation forte) avec deux classes composites *Section* et *Nœud*. Ces classes permettent de décrire la topologie du circuit. Ainsi, la définition précise des tronçons permet de modéliser de façon microscopique les phénomènes d'interaction sur le réseau physique de transport minier.

Classe *Répartiteur* : est le noyau décideur dans notre système de pilotage.

Les classes sont principalement reliées par des associations binaires, sauf pour la génération de missions qui nécessite une relation ternaire faisant intervenir les classes *Répartiteur*, *Réseau de transport* et *Camion*.

3.2 Implantation du modèle avec SIMAN

Le système de pilotage que nous modélisons est complexe, de plus la difficulté s'amplifie lorsqu'on cherche à le modéliser de façon microscopique. Ainsi, l'utilisation des composants de haut niveau d'ARENA ne permet pas de reproduire finement le comportement des camions sur le réseau de trafic minier. Le recours au langage SIMAN est nécessaire pour ce type de modélisation. L'utilisation d'ARENA se limite à la couche supérieure d'environnement d'édition et de visualisation graphique.

On a implanté sur SIMAN le modèle de classe présenté précédemment en trois principales étapes. La première étape consiste en l'implantation de la classe Réseau de transport. Cette classe permet de définir la topographie du circuit dans la mine à travers les objets 'Intersections', 'Links' et 'Networks' du langage SIMAN. La deuxième étape est d'introduire les classes : Site d'extraction, Site de culbutage et Équipement. Ces trois classes correspondent aux ressources de notre système. Les ressources comme les pelles et les concasseurs sont supposées fixes pour un quart de travail, mais les camions sont des ressources mobiles. On a représenté les camions par analogie aux transporteurs autoguidés définis par SIMAN ; ceci a permis de travailler avec les algorithmes de graphes pour la résolution des problèmes du plus court chemin. La dernière étape est d'implanter le module logique du pilotage de la classe *Répartiteur*.

La figure 4 montre l'implantation du réseau de transport minier, où :

- i_i et l_j représentent, respectivement les nœuds et sections du réseau,
- n_{C_i} capacité de la pelle i ,
- n_{E_j} capacité du centre de culbutage j ,
- d_{C_i, E_j} distance entre le site de culbutage C_i et le site d'extraction E_j .

4 Simulation du problème test

4.1 Implantation du modèle macroscopique du problème test

Le problème test étudié se caractérise par un site unique de culbutage (C_1) et deux sites d'extraction (E_1 et E_2). Cette configuration est utilisée pour la validation des modèles

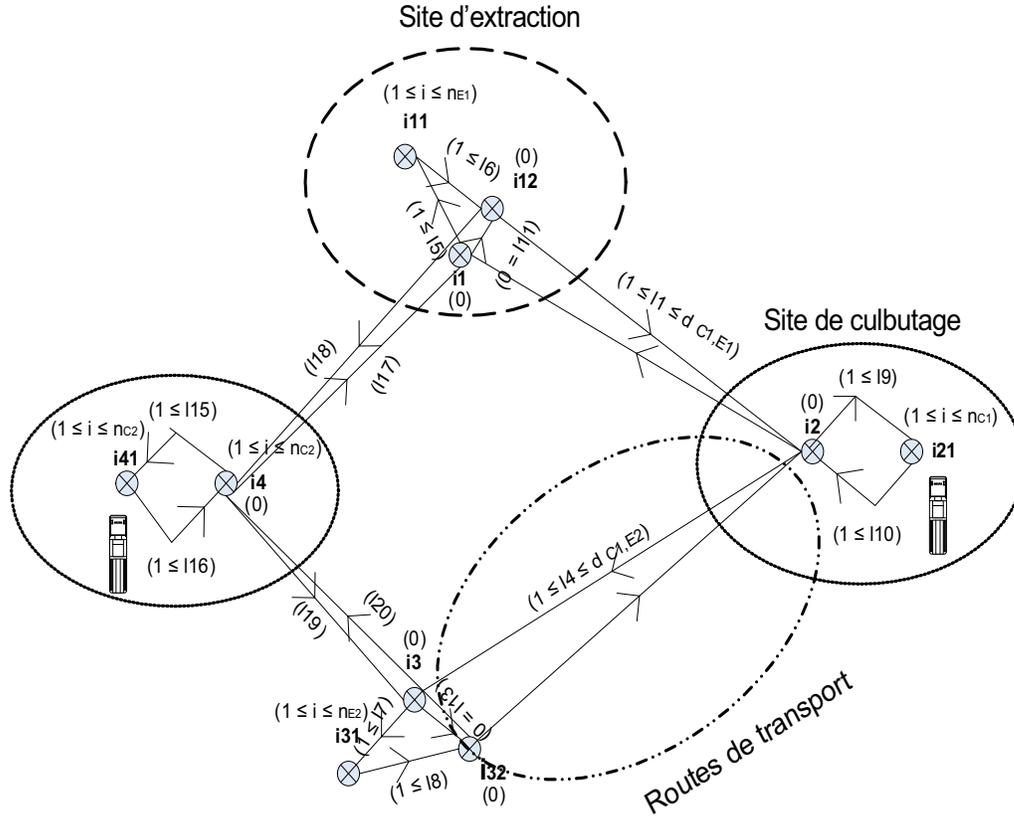


Figure 4 – Configuration de base sur SIMAN d'un réseau de transport minier

stochastiques de répartition en temps réel proposés par Chung et al. (2005), ainsi que pour la validation du modèle agent présenté par Dunbar et al. (2003).

Dans le problème test utilisé par Dunbar, le coût associé aux différents parcours est un temps moyen exprimé en minutes et distribué selon une loi triangulaire alors que les temps de service dans les sites sont supposés constants (tableau 1).

L'objectif du plan de production est d'avoir un nombre égal de camions chargés à partir de chaque pelle au bout d'une période de 12 heures de travail. En se basant sur les temps moyens du tableau 1, Dunbar et al. définissent les temps de cycle à partir de chaque site d'extraction : $T_{cyc}E_1 = 26$ min et $T_{cyc}E_2 = 16$ min. Ces temps de cycle permettent aux décideurs de déterminer le nombre de camions qu'il faut affecter à chaque pelle pour satisfaire le niveau de production désiré. Étant donné que le temps de production d'une pelle est de 3 minutes l'objectif est de 20 chargements/heure. Le nombre de camions nécessaire est de 8 pour la pelle au centre d'extraction E_1 et 5 camions pour la pelle au centre E_2 .

Tableau 1 – Valeurs des paramètres du modèle macroscopique

Paramètres physiques	Valeurs en minutes
Coût des parcours	
$\hat{C}_{C1,E1}$	Tri(9,10,11)
$\hat{C}_{C1,E2}$	Tri(4,5,6)
$\hat{C}_{E1,C1}$	Tri(10,11,12)
$\hat{C}_{E2,C1}$	Tri(5,6,7)
Temps de service	
t_{E1}	Constant : 3 min
t_{E2}	Constant : 3 min
t_{C1}	Constant : 2 min

Le niveau de production voulu est alors calculé en terme de nombre de camions chargés, il est égal à 446 camions soit 221 camions à partir de E_1 et 225 camions à partir de E_2 .

En implantant avec ARENA le modèle macroscopique correspondant à ce problème test on retrouve les résultats du modèle de Dunbar et al. La figure 6 montre l'évolution du nombre de chargements de camion en fonction du temps. En effet, le nombre de camions chargés est retenu comme mesure de performance du système étudié. Un léger décalage de nombre de chargements existe entre la valeur calculée théoriquement et celle retrouvée par simulation, ce décalage est dû à la file d'attente en amont du site de culbutage. Le temps moyen d'attente dans cette file est de 4,5 minutes.

4.2 Implantation du modèle microscopique du problème test

Afin de comparer les deux approches de modélisation des problèmes tests (macroscopique et microscopique) nous avons implanté le problème test de Dunbar et al. (2003) dans notre simulateur microscopique. Le tableau 2 présente les différents paramètres utilisés.

Tableau 2 – Valeurs des paramètres du modèle microscopique

Paramètres physiques	Valeurs en minutes
Distances	
$d_{C1,E1}$	6000 m
$d_{C1,E2}$	3000 m
Temps de service	
t_{E1}	Constant : 3 min
t_{E2}	Constant : 3 min
t_{C1}	Constant : 2 min

La figure 5 montre l'implantation topographique du réseau de transport minier de ce problème test. Avec cette première configuration, pour déverser la charge extraite à partir des sites E_1 et E_2 , les camions utilisent des tronçons de routes disjointes (l'angle $\Phi > 0$).

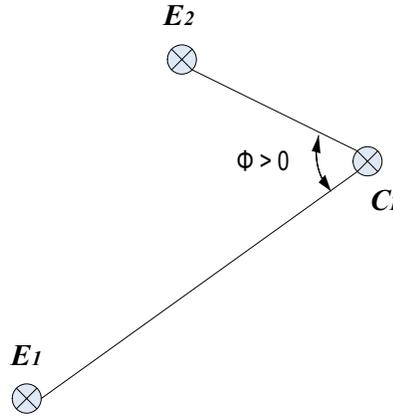


Figure 5 – Implantation topographique

En posant comme hypothèse que la flotte de camions est homogène (même caractéristiques techniques), le comportement sur chaque section de réseau, du couple camion-conducteur est décrit comme suivant une loi gaussienne. Pour plus de clarifications sur ce type d'hypothèses ; les lecteurs peuvent consulter les travaux de Liu et al. (2005). Ainsi, les vitesses suivent une des distributions normales suivantes (Tableau 3) :

Tableau 3 – Lois de distribution des vitesses

Tronçons	Loi de distribution de la vitesse
$\overrightarrow{C_1E_1}$ et $\overrightarrow{C_1E_2}$	Normale (7,1)
$\overrightarrow{E_1C_1}$ et $\overrightarrow{E_2C_1}$	Normale (6,0.8)

Pour la validation de notre modèle de simulation, nous estimons le nombre de répliques nécessaires à $n=10$ garantissant ainsi un intervalle de confiance de 95%. Ainsi, les résultats de simulation du modèle microscopique sont présentés à la figure 6.

La figure 6 montre l'évolution du nombre de camions chargés en fonction du temps. On peut dès lors remarquer un léger écart entre les résultats générés par le modèle macroscopique et ceux générés par le modèle microscopique. Une analyse plus pointue de cet écart est présentée à la section suivante.

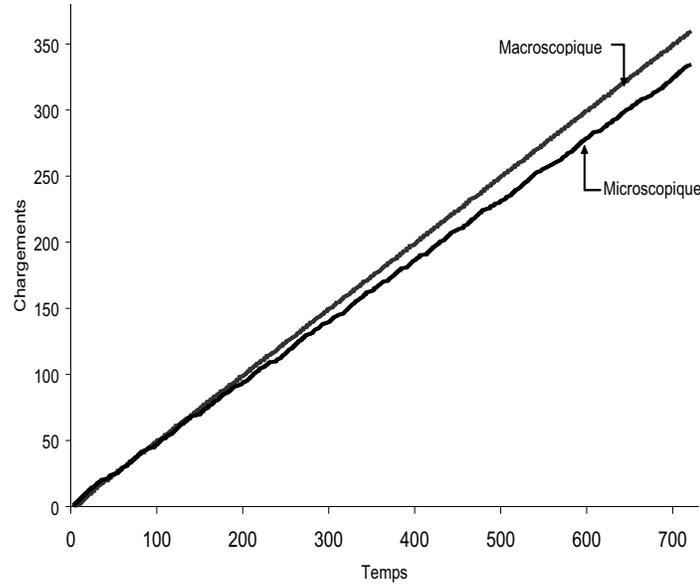


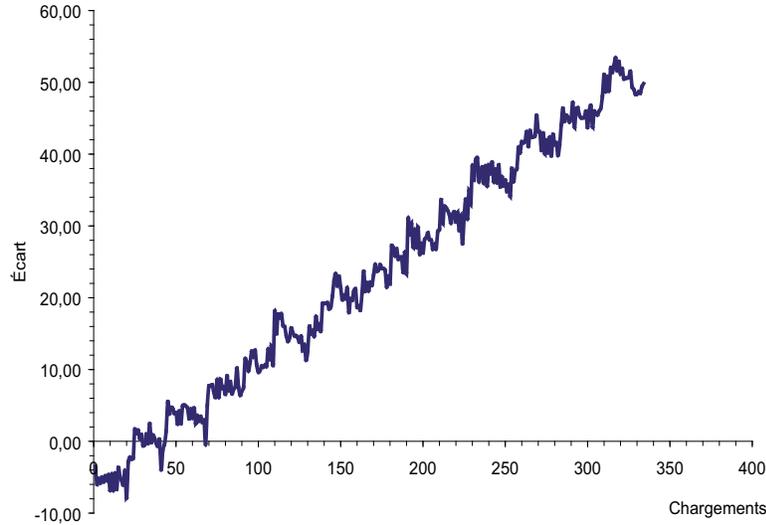
Figure 6 – Évolution du nombre de chargements

5 Simulation du problème test

5.1 Évaluation de l'écart de performance

Pour évaluer l'écart entre le modèle macroscopique et le modèle microscopique du problème test étudié dans la section précédente, nous avons introduit une variable (*écart*) qui représente l'évolution de la différence des temps en fonction du nombre de chargements effectués. Ainsi, pour un nombre (nt) de chargements on associe la valeur : écart (n_t) = $t_{\text{Micro}}(n_t) - t_{\text{Macro}}(n_t)$ (c'est-à-dire pour $n_t = 107$ chargements, on a $t_{\text{Micro}}(107) = 227,10$ minutes et $t_{\text{Macro}}(107) = 215,69$ minutes). La figure suivante (figure 7) présente l'évolution de cette variable écart en fonction du nombre de chargements.

La pente positive de la courbe indique un élargissement de l'écart. Ainsi plus on avance dans le temps plus le résultat généré par la modélisation macroscopique diffère de celui généré par la modélisation microscopique. En calculant le pourcentage de cet écart, pour cette configuration du problème test, on trouve qu'il ne dépasse pas 7%. Dans la partie suivante l'effet d'un changement topographique sur la valeur de l'écart est comparé entre une modélisation macroscopique et une modélisation microscopique.

Figure 7 – Évolution de la variable *écart*

5.2 Effet d'un changement topographique de la mine

Dans la partie précédente, le réseau de transport minier est constitué de deux tronçons indépendants (figure 5). On suppose maintenant que la configuration de la mine change et que les pelles deviennent placées de sorte que le tronçon entre le site de culbutage C_1 et le site d'extraction E_2 devient un tronçon commun à tous les camions (angle $\Phi = 0$ dans la configuration de la figure 5). Nous avons alors implanté cette nouvelle topographie du réseau de transport minier dans notre simulateur microscopique. Comme pour le cas précédent nous avons calculé l'écart entre le modèle macroscopique et cette nouvelle implantation du modèle microscopique. La figure 8 regroupe les deux représentations de l'évolution de la variable *écart* en fonction du nombre de chargements.

On remarque qu'avec ce changement topographique l'écart s'élargit considérablement. Cet écart s'explique par le fait que la congestion créée sur le tronçon commun ainsi que les interactions qui en découlent (décélération et accélérations) ont été ignorées par le modèle macroscopique. Ainsi, on constate que l'existence d'un tronçon commun peut affecter jusqu'à 13% les résultats générés par la modélisation macroscopique.

5.3 Évaluation des heuristiques d'assignation

Dans la littérature, plusieurs travaux de recherche ont recours à la modélisation microscopique des systèmes de transport des mines à ciel ouvert pour la détermination de la meilleure heuristique à implanter au niveau inférieur de leur noyau de résolution. Ainsi, ces

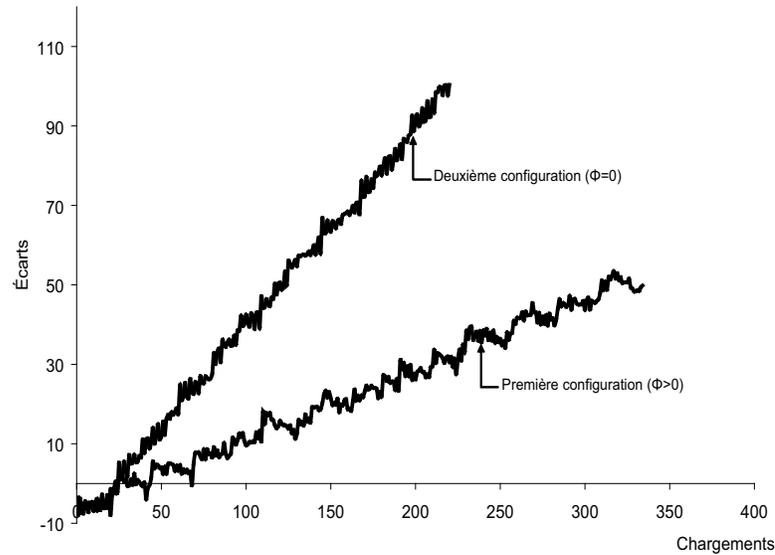


Figure 8 – Comparaison des écarts

travaux ne considèrent pas que dans une mine, la flotte de camions est généralement hétérogène ce qui engendre une variabilité élevée des vitesses dépendantes des caractéristiques techniques des camions. Pour évaluer l'effet de l'hétérogénéité de la flotte sur les performances du système de pilotage, on a rajouté un autre site de culbutage d'où un autre point de répartition où on implante une heuristique d'assignation. Le modèle comporte alors un nouveau site de culbutage C_2 , en supposant que du site d'extraction E_1 on ne déverse que dans C_1 et du site E_2 on ne déverse que dans C_2 (E_1 est site d'extraction de minerai et C_1 est un concasseur, alors que E_2 est un site d'extraction de stérile et C_2 est une halde de stérile). À partir des sites de culbutages il est possible d'envoyer les camions vers E_1 ou E_2 . Pour comparer l'effet d'une flotte hétérogène, on considère deux règles d'assignation : assignation fixe (FA, *fixed truck assignment*) et assignation tournante (RA, *Rounding truck assignment*). En assignation fixe, on suppose que pour le parcours entre C_1 et E_1 des camions identiques sont affectés de même entre C_2 et E_2 . La deuxième règle consiste à envoyer le camion vers le prochain site d'extraction et non pas vers le site qu'il vient de quitter, ainsi des camions hétérogènes vont se croiser sur les tronçons du réseau. Les résultats sont reproduits à la figure 9.

On constate alors que lorsque la flotte de camions est considérée homogène, les deux règles de répartition résultent en moyenne à un nombre de chargements identique. Cependant quand l'hétérogénéité de la flotte est prise en compte, on voit qu'en optant pour l'assignation fixe la réponse de notre système est améliorée jusqu'à 8%. En effet, avec l'assignation tournante étant donné que les voies de circulation dans une mine sont étroites (c'est-à-dire

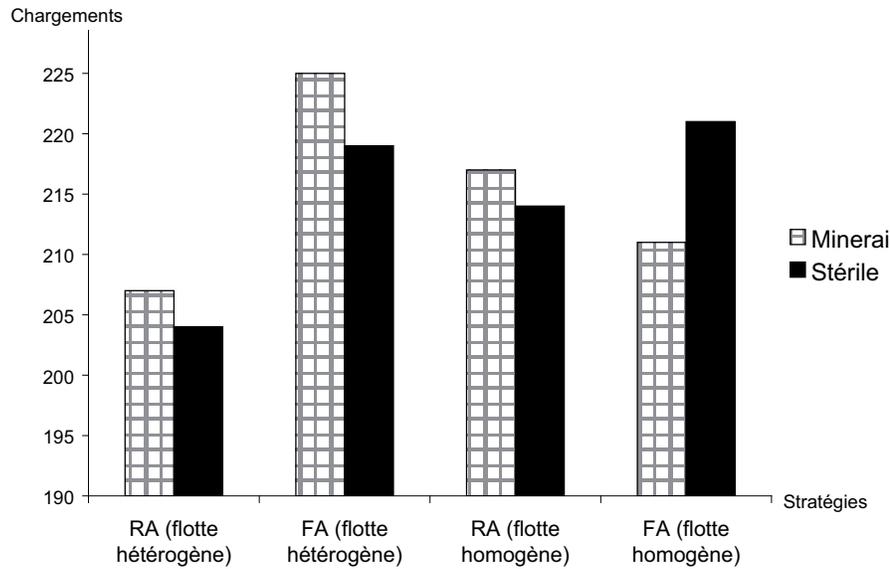


Figure 9 – Évaluation des stratégies

sans possibilité de dépassement) les camions lents vont alors gêner les camions rapides ce qui conduit à la formation de pelotons. Ce phénomène est ignoré lorsqu'on considère que la flotte est homogène. En conclusion, l'utilisation d'un modèle macroscopique pour l'évaluation des performances des heuristiques d'assignation a induit des résultats erronés. Ces résultats montrent que les deux règles d'assignation sont équivalentes lorsque la flotte est considérée homogène, alors que lorsqu'on a pris en compte les interactions résultantes de l'hétérogénéité de la flotte nous avons trouvé un écart significatif de performance entre ces deux règles d'assignation.

6 Conclusion

Cet article montre que, dans le contexte fortement dynamique des systèmes de transport, le recours à la modélisation macroscopique des problèmes tests pour la validation des stratégies de gestion de flotte peut biaiser significativement les résultats générés par les simulations. Nous avons montré que cet écart entre la modélisation macroscopique et la modélisation microscopique augmente considérablement avec l'augmentation dans le réseau du nombre de tronçons communs. En effet, le recours à la modélisation microscopique du système de transport minier a permis de tenir compte de la dynamique engendrée par les interactions des différentes entités dans le réseau. Ce travail présente le modèle générique orienté objet que nous avons développé afin d'implanter un modèle microscopique

de simulation de pilotage de système de transport minier. Ce modèle générique extensible et réutilisable permet alors de faciliter l'implantation de simulateur microscopique des problèmes tests de transport minier. Étant donné que plusieurs travaux de recherches récents traitent la potentialité de la simulation proactive (Bensaoud et al., 2005 ; Cardin, 2006), l'une des perspectives de ce travail sera d'utiliser ce simulateur pour la conduite en ligne des systèmes de transport minier.

Références

- Alarie, S. et M. Gamache, 2002. Overview of Solution Strategies Used in Truck Dispatching Systems for Open Pit Mines. *International Journal of Surface Mining Reclamation and Environment*, 16, 59.
- Bensaoud S., A. Jaoua and N.Bensaoud, 2005. Efficient Simulator Based on Metaheuristic for FMS and AGV Systems Design and Control. *Journal of Computer Science*, 8-14.
- Bissiri Y., 2002. *Application of Agent-Based modelling to truck-shovel dispatching systems in open pit mines*. Thèse de Doctorat, University of British Columbia, Canada.
- Bourrel, E., 2003. *Modélisation dynamique de l'écoulement du trafic routier : du macroscopique au microscopique*. Thèse de Doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, France.
- Burckert, H.J., K. Fischer and G. Vierke, 2000. Holonic transport scheduling with TELETRUCK. *Applied Artificial Intelligence*, 697-726.
- Cardin O., P. Castagna, 2006, Utilisation de la simulation proactive une aide au pilotage des systèmes de production. *Proceedings of the 6^e Conférence Francophone de Modélisation et SIMulation, MOSIM'06*, Rabat, Maroc.
- Chung, T., J.V. Kresta, J.F. Forbes and H.J. Marquez, metricconverterProductID2005. A2005. A stochastic optimization approach to mine truck allocation. *Journal of Surface Mining Reclamation and Environment*, 19(3), 162-175.
- Clayton C., 2005. More clearer faster : it's all about information technology. *CIM Bulletin*, 98, 1085.
- Dunbar, W.S., Y. Bissiri and J.V. Kresta, 2003. Let the Ants do the Dispatching. *CAMI*, Calgary, Canada.
- Elbrond J. and F. Soumis, 1987. Towards Integrated Production Planning and Truck Dispatching in Open Pit Mines. *International Journal of Surface Mining*, 1, 1-6.
- Gamache, M., 2007. *Overview of Dispatching Systems and Challenges for the Future*. Laurentian University, Canada.
- Gendreau, M., F. Guertin, J.-Y. Potvin, and E. Taillard, 1999. Parallel Tabu Search for Real-Time Vehicle Routing and Dispatching. *Transportation Science*, 33, 381-390.
- Godfrey, G.A. and W.B. Powell, 2002. An adaptive dynamic programming algorithm for dynamic fleet management, II : Multiperiod travel times. *Transportation Science*, 36, 40-54.

- Hervieu, D., 2006. *La perception visuelle des entités autonomes en réalité virtuelle : Application à la simulation de trafic routier*. Thèse de Doctorat, Université de Bretagne Occidentale.
- Ichoua, S., 2001. *Problèmes de gestion flottes de véhicules en temps réel*. Thèse de Doctorat, Université de Montréal, Canada.
- Ichoua, S., M. Gendreau and J.-Y. Potvin, 2006. Exploiting knowledge about future demands for real-time vehicle dispatching. *Transportation Science*, 40, 211–225.
- Laporte, G. and I. H. Osman, 1995. *Routing problems : A bibliography. Freight transportation – Annals of Operations Research*. Amsterdam : Baltzer Science Publishers, 227–262.
- Larsen, A., B.G. Madsen and M. Solomon, 2004. The A priori dynamic traveling salesman problem with time windows. *Transportation Science*, 38, 459–472.
- Lebacque, J.P. et M.M. Khoshyaran, 1998. First order macroscopic traffic flow models for networks in the context of dynamic assignment. *EURO, WGT*.
- Muller P.A, N. Gaertner, 2000. *Modélisation objet avec UML*. 2^e éd. Paris : Eyrolles.
- Munirathinam, M. and J.C. Yingling, 1994 : A Review of Computer-Based Truck Dispatching Strategies for Surface Mining Operations. *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environments*, 8, 1–15.
- Pegden C., R. Shannon, and R. Sadowski, 1995. *Introduction to Simulation Using SIMAN*. 2nd edition. McGraw-Hill.
- Perret J., 2003. *Intégration des Réseaux de Petri Différentiels à Objets dans une plateforme de simulation dynamique hybride : application aux procédés industriels*. Thèse de Doctorat, INP, Toulouse, France.
- Rousseau, L.M, 2002. *Gestion de flotte avec fenêtres horaires : approches de résolution mixtes utilisant la programmation par contraintes*. Thèse de Doctorat, Université de Montréal, Canada.
- Solomon M.M., 1987. Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problems with Time Window Constraints. *Operations Research*, 35, 254–265.
- Temeng V.A., F.O. Otuonye and J.O. Friendewey, 1997. Real-Time Truck Dispatching Using a Transportation Algorithm. *Int. J. of Surface Mining, Reclamation and Environment*, 11, 203–207.
- Wang, Q., Y. Zhang, C.Chen and W.Xu, 2006. Open-Pit Mine Truck Real-time Dispatching Principle under Macroscopic Control. *Proceedings of the First International Conference on Innovative Computing, Information and Control*, 1, 702–706.
- White,J.W., J.P., Olson and S.I. Vohnout, 1993. On Improving Truck/Shovels Productivity in Open Pit Mines. *CIM Bull*, 86, 43–49.