

:

## HABILITATION A DIRIGER DES RECHERCHES

Présentée par

Philippe Lacomme

# Méthodes exactes et approchées pour l'optimisation des systèmes à moyen de transport

Tome 1

Soutenue le 6 juillet 2005 à Clermont-Ferrand devant le jury composé de :

**Jury :**

Monsieur J-P. Campagne	Professeur	INSA de Lyon
Monsieur S. Dauzère-Perès	Professeur	Ecole des Mines de Saint-Etienne
Monsieur G. Fleury	MCF (HdR)	Université de Clermont-Ferrand
Monsieur M. Gourgand	Professeur	Université de Clermont-Ferrand
Mademoiselle M-C. Portmann	Professeur	Ecole des Mines de Nancy
Monsieur C. Prins	Professeur	Université de Troyes
Monsieur A. Quilliot	Professeur	Université de Clermont-Ferrand
Monsieur M. Widmer	Professeur	Université de Fribourg



## Remerciements

Ce manuscrit est l'aboutissement de plusieurs années de travail et n'aurait pas pu être réalisé sans l'aide de nombreuses personnes (il est impossible de les citer toutes !).

Avant tout je remercie les rapporteurs, Jean-Pierre Campagne, Marie-Claude Portmann, Stéphane Dauzère-Pérès ainsi que Marino Widmer qui ont accepté de relire ce document malgré les délais très courts liés à cette période de l'année. Je remercie aussi les autres membres du jury : Michel Gourgand, Gérard Fleury, Alain Quilliot et Christian Prins.

Un mot particulier à Christian Prins avec qui nous avons noué des liens durables basés sur une grande amitié. Qu'il trouve ici l'expression de toute ma gratitude pour les heures, les jours et les semaines de discussions acharnées que nous avons eu sur de nombreux sujets de recherche. Un mot aussi à Gérard Fleury avec qui nous avons noué une collaboration fructueuse qui dure depuis de nombreuses années. Bien qu'il le sache déjà je voudrais lui exprimer toute mon amitié. Michel Gourgand mon directeur de thèse m'a donné le goût de la recherche depuis 1994, a survécu à la première thèse et vient de survivre à mon habilitation.... Alain Quilliot m'a accueilli au LIMOS depuis de nombreuses années où il joue un rôle important de "facilitateur" des différentes initiatives de recherche. Toutes mes excuses pour les dimanches matins où il a dû (à des heures très matinales) ouvrir les locaux alors que l'électronique des portes d'entrée nous avait lâchement abandonnée.

Ces remerciements ne seraient pas complets si je n'y associais pas tous les membres du Laboratoire d'Informatique que j'ai côtoyé durant ma thèse. Je remercie tous les membres de l'équipe "Modélisation et Aide à la Décision" (Michelle Chabrol, Alain Tanguy, Nikolay Tchernev, Eric Soutera, Anthony Caumont, Sylvie Norre...) et les membres de l'équipe OSI de l'ISTIT (que j'ai côtoyé pendant presque 3 ans) pour leur soutien amical.

D'autres personnes devraient aussi être remerciées car aux cours de ces années des collaborations fructueuses et pérennes ont été développées à travers des manifestations scientifiques que nous avons organisées et des thèmes de recherche que nous avons développés. Merci à Alexandre, Jean-Yves, Aziz, Marc.... et tous les autres. N'oublions pas nos deux secrétaires du LIMOS (Rose et Béatrice) qui font un travail parfois ingrat mais ... qui le font bien... et avec dévouement.

Enfin je tiens à terminer, en remerciant les personnes qui me sont les plus proches pour leur patience et leur compréhension pendant mes absences (week-ends, jours fériés, vacances...) et pendant mes soirées studieuses devant mon ordinateur portable.



## Sommaire

<b>1</b>	<b>CURRICULUM VITAE</b>	<b>9</b>
1.1	ETAT CIVIL	9
1.2	FORMATION ET FONCTION UNIVERSITAIRE	10
1.2.1	<i>Formation</i>	10
1.2.2	<i>Fonctions occupées</i>	10
1.2.3	<i>Fonction actuelle</i>	10
1.3	ACTIVITES DE RECHERCHE	11
1.4	PUBLICATIONS	13
1.4.1	<i>Résumé</i>	14
1.4.2	<i>Livre</i>	14
1.4.3	<i>Publications dans des revues</i>	15
1.4.4	<i>Publications dans la série Lecture Notes in Computer Science (Ed. Springer).</i>	16
1.4.5	<i>Publications dans des conférences en langue anglaise</i>	16
1.4.6	<i>Publications dans des conférences en langue française</i>	20
1.4.7	<i>Autres publications</i>	21
1.5	ANIMATION DE LA RECHERCHE	22
1.5.1	<i>Evaluation de la recherche</i>	22
1.5.2	<i>Collaborations avec d'autres laboratoires</i>	23
1.5.3	<i>Participation à des projets de recherche</i>	23
1.5.4	<i>Encadrements de thèse</i>	24
1.6	ACTIVITES PEDAGOGIQUES	24
1.6.1	<i>Résumé</i>	24
1.6.2	<i>Encadrements pédagogiques</i>	26
1.6.3	<i>Encadrements d'étudiants sur des projets liés à la recherche (3 dernières années)</i>	27
1.6.4	<i>Participation à des voyages d'étude</i>	28
1.6.5	<i>Supports de cours</i>	28
1.6.6	<i>Participation à des projets internationaux de coopération</i>	28
1.6.7	<i>Autres activités pédagogiques</i>	28
<b>2</b>	<b>SYNTHESE DES TRAVAUX DE RECHERCHE</b>	<b>31</b>
2.1	PROBLEMATIQUE GENERALE	32
2.1.1	<i>Démarche de modélisation/optimisation pour l'aide à la décision</i>	35
2.1.2	<i>Notre contribution</i>	36
2.2	DEMARCHE SCIENTIFIQUE	36
2.2.1	<i>Réaliser plusieurs modèles du même problème</i>	36
2.2.2	<i>Décomposer le problème</i>	37
2.2.3	<i>Prendre en compte les différents contextes</i>	44
2.2.4	<i>Comparer et évaluer des solutions</i>	46
<b>3</b>	<b>LES PROBLEMES DE TOURNEES</b>	<b>49</b>
3.1	LA PROBLEMATIQUE	49
3.2	PROBLEMES DE TOURNEES SUR NŒUDS ET SUR ARCS	50
3.3	CADRE DES PROBLEMES DE TOURNEES SUR ARCS	50
3.3.1	<i>Exemples d'application</i>	50
3.3.2	<i>Les travaux concernant les problèmes de tournées sur arcs</i>	51
3.3.3	<i>Les modèles théoriques</i>	53
3.3.4	<i>Les extensions du CARP pour des solutions plus réalistes</i>	53
3.4	TRAVAUX REALISES	56
3.4.1	<i>Proposition pour le CARP de "base"</i>	57
3.4.2	<i>Proposition pour le CARP Stochastique (SCARP)</i>	60
3.4.3	<i>Deuxième proposition pour le CARP stochastique (SCARP)</i>	62

3.4.4	<i>Proposition pour le CARP de base bi-objectifs</i>	64
3.4.5	<i>Difficultés de résolution des problèmes de tournées dans le cas hétérogène</i>	64
3.4.6	<i>Les autres extensions du CARP</i>	66
3.4.7	<i>Bilan des travaux réalisés sur les problèmes de tournées</i>	66
<b>4</b>	<b>ATELIERS A RESSOURCES DE TRANSPORT</b>	<b>69</b>
4.1	LE PROBLEME DU HSP (HOIST SCHEDULING PROBLEM)	69
4.1.1	<i>Les spécificités des HSP</i>	69
4.1.2	<i>Proposition pour les ateliers de traitement de surfaces</i>	70
4.1.3	<i>Bilan des travaux réalisés sur les HSP</i>	74
4.2	LE PROBLEME DES SFP (SYSTEMES FLEXIBLES DE PRODUCTION)	74
4.2.1	<i>Les spécificités des SFP avec chariots</i>	75
4.2.2	<i>Les travaux réalisés</i>	78
4.2.3	<i>Proposition d'un modèle linéaire du problème</i>	79
4.2.4	<i>Proposition d'un modèle de simulation réflexif</i>	82
4.2.5	<i>Proposition d'un schéma d'optimisation basé sur un couplage branch-and-bound/simulation</i>	84
4.2.6	<i>Proposition d'un schéma d'optimisation basé sur un algorithme stochastique/simulation pour les instances de grande taille</i>	86
4.2.7	<i>Analyse détaillée des règles de priorité pour la gestion d'un chariot [CAU, 05b]</i>	86
4.2.8	<i>Bilan des travaux réalisés sur les SFP</i>	87
4.3	LE PROBLEME DU JOB-SHOP ET DE SES EXTENSIONS	88
4.3.1	<i>Introduction</i>	88
4.3.2	<i>Proposition d'un schéma d'optimisation étendant le schéma d'optimisation de Nowicki et Smutnicki [CAU, 04]</i>	89
4.3.3	<i>Proposition d'un schéma d'optimisation pour l'exploration de solutions "irréalisables" [CAU, 05c]</i>	92
4.3.4	<i>Proposition d'un schéma d'optimisation basé sur des règles de priorité [CAU, 05b]</i>	95
4.3.5	<i>Conclusion sur les travaux réalisés pour le job-shop</i>	96
4.4	BILAN DES TRAVAUX SUR LES ATELIERS A RESSOURCES DE TRANSPORT	96
<b>5</b>	<b>LES PROBLEMES DE L'OPTIMISATION STOCHASTIQUE</b>	<b>98</b>
5.1	INTRODUCTION	98
5.2	DIFFICULTES DE L'OPTIMISATION STOCHASTIQUE AVEC DES ALGORITHMES ITERATIFS	101
5.3	PROPOSITION DE SCHEMAS D'OPTIMISATION	103
5.4	CONCLUSION	106
<b>6</b>	<b>DEVELOPPEMENT DE SYSTEMES D'AIDE A LA DECISION</b>	<b>109</b>
6.1	INTRODUCTION	109
6.2	NOTION D'ENVIRONNEMENT DE MODELISATION	109
6.3	NOTRE CONTRIBUTION	111
6.4	PROPOSITION D'UN SYSTEME D'AIDE A LA DECISION INTEGRE A UN SYSTEME DE GESTION	112
6.5	PROPOSITION D'UN SYSTEME D'AIDE A LA CONCEPTION DE TOURNEES	115
6.6	BILAN SUR LES SYSTEMES D'AIDE A LA DECISION	117
<b>7</b>	<b>CONCLUSION</b>	<b>119</b>
<b>8</b>	<b>PERSPECTIVES A MOYEN ET LONG TERME</b>	<b>123</b>
<b>9</b>	<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES</b>	<b>125</b>
<b>10</b>	<b>SELECTION DE CINQ PUBLICATIONS</b>	<b>135</b>
10.1	DESCRIPTION DES PUBLICATIONS	135
10.2	LES PUBLICATIONS PRESENTEES EN ANNEXES	143

## Liste des illustrations

### Liste des tableaux

Tableau 1-1. Résumé des publications .....	14
Tableau 1-2. Résumé des interventions à Troyes .....	25
Tableau 1-3. Résumé des interventions à Clermont-Ferrand .....	25
Tableau 1-4. Résumé des interventions à Clermont-Ferrand en tant que thésard .....	26
Tableau 2-1. Contexte d'étude des différents problèmes .....	32
Tableau 3-1. Performance des deux approches .....	62
Tableau 3-2. Les approches de résolution du SCARP [FLE, 05b] .....	63
Tableau 3-3. Exemples de résultats obtenus [FLE, 05b] .....	64
Tableau 3-4. Exemples de résultats sur le VRP hétérogène .....	66
Tableau 4-1. Gamme des pièces pour le Job-Set 1 de Bilge et Ulusoy (L/U désigne la station d'entrée/sortie du système) .....	78
Tableau 4-2. Comparaison des modèles linéaires .....	79
Tableau 4-3. Résolution exacte avec le MILP1 de l'instance Job-Set 1, Layout 1 des jeux de données fournis dans [BIL, 95]. .....	80
Tableau 4-4. Exemple de résultats fournis par la simulation réflexive et comparés au MILP2 en utilisant l'ordre d'entrée fourni par le MILP2 (Job-Set 1, Layout 1) .....	83
Tableau 4-5. Exemples de résultats sur des instances de petite taille (Job-Set 1, Layout 1) .....	85
Tableau 4-6. Exemples de résultats avec la règle FIFO comme politique de gestion du chariot [LAC, 05a] .....	86
Tableau 4-7. Exemple de tableau de résultats permettant d'analyser la performance des règles de gestion par rapport à la gestion optimale du chariot (Job-Set 1, Layout 1) .....	87
Tableau 4-8. Les différentes approches .....	87
Tableau 4-9. Liens entre le HSP, les SFP et le problème théorique du job-shop .....	88
Tableau 4-10. Exemple de job-shop .....	90
Tableau 4-11. Les time-lags associés au problème .....	90
Tableau 4-12. Exemple de résultats .....	94
Tableau 4-13. Evaluation de l'algorithme génétique sur des instances de no-wait job-shop .....	94
Tableau 4-14. Mise en évidence de la difficulté d'obtention de solutions réalisables de "bonne qualité" (nf : No Feasible solution) sur les instances de Laurence .....	96
Tableau 5-1. Les différents états possibles .....	100

### Liste des figures

Figure 2-1. Problèmes et outils abordés .....	32
Figure 2-2. Exemple de chaîne logistique .....	33
Figure 2-3. Cycle de vie d'un système [PRO, 92] .....	34
Figure 2-4. Démarche globale de modélisation / optimisation .....	35
Figure 2-5. Réalisation de deux modèles du même problème .....	37
Figure 2-6. Le Triple Couplage [FLE, 97] [FLE, 99a] .....	38
Figure 2-7. Principe de décomposition .....	39
Figure 2-8. Schéma d'optimisation mis en place pour la résolution du CARP .....	40
Figure 2-9. Schéma d'optimisation mis en place pour la résolution du HSP .....	41
Figure 2-10. Schéma d'optimisation Branch and Bound/Simulation mis en place pour la résolution dans les SFP .....	42
Figure 2-11. Schéma d'optimisation mis en place pour la résolution du job-shop avec time-lags .....	43
Figure 2-12. Une méthode d'ordonnancement par liste .....	44

Figure 2-13. Différents cas possibles pour les modèles du système et de son environnement.....	44
Figure 2-14. Les différents modèles du système.....	45
Figure 2-15. Les deux étapes de l'optimisation dans un contexte stochastique.....	46
Figure 3-1. Chaîne logistique pour la collecte de déchets.....	51
Figure 3-2. Les problèmes de tournées sur arcs ([RAM, 02]).....	53
Figure 3-3. Les études réalisées sur les problèmes de tournées (détails de la figure 2-1). .....	56
Figure 3-4. Modélisation d'un graphe routier [RAM, 02].....	57
Figure 3-5. Principe de résolution du CARP.....	58
Figure 3-6. Modélisation du problème de découpage sous la forme d'un graphe et obtention du découpage optimal [RAM, 02].....	59
Figure 3-7. Exemples de résultats obtenus [LAC, 04b].....	60
Figure 3-8. Exemple de solution avec 3 tournées.....	61
Figure 3-9. Un exemple de solution avec un aller/retour supplémentaire au dépôt.....	61
Figure 3-10. Schéma de simplification retenu.....	61
Figure 3-11. Pourcentage de solutions irréalisables dans la population.....	65
Figure 4-1. Un atelier de traitement de surfaces.....	70
Figure 4-2. Schéma d'optimisation du HSP.....	71
Figure 4-3. Solution cyclique obtenue avec des pièces de gamme 12.....	73
Figure 4-4. La recherche en France sur les SFP [BRA, 04].....	75
Figure 4-5. Modèle objet simplifié des SFP (hors réseau de guidage) [LAC, 04c].....	75
Figure 4-6. Une station dans un SFP.....	76
Figure 4-7. Eléments du réseau de guidage.....	76
Figure 4-8. Un SFP en situation de blocage.....	77
Figure 4-9. Diagramme de Gantt pour $n = 4$ et $N = 2$ .....	81
Figure 4-10. Diagramme de Gantt pour $n = 4$ et $N = 3$ .....	81
Figure 4-11. Principe de la simulation réflexive.....	82
Figure 4-12. Principe de résolution : couplage Branch-and-bound/règle de priorité/simulation [LAC, 05a].....	84
Figure 4-13. Principe du branch-and-bound proposé.....	85
Figure 4-14. Schéma d'optimisation de type tabou.....	90
Figure 4-15. Modélisation sous la forme d'un graphe d'un problème de job-shop avec des time-lags maximaux.....	91
Figure 4-16. Schéma d'optimisation de type algorithme génétique.....	92
Figure 4-17. Un chromosome et la modélisation de la solution sous la forme d'un graphe disjonctif orienté.....	92
Figure 5-1. Principe général d'un algorithme de minimisation d'une variable aléatoire.....	102
Figure 5-2. Algorithme pour l'optimisation stochastique d'une variable aléatoire [FLE, 93] [FLE, 99b].....	104
Figure 6-1. Analyse du domaine et étude d'un système particulier selon la méthodologie ASCI.....	110
Figure 6-2. Environnement de modélisation pour l'évaluation de performance.....	111
Figure 6-3. Intégration d'un outil d'Aide à la Décision dans un système de gestion.....	112
Figure 6-4. Vue fonctionnelle.....	113
Figure 6-5. Modèle simplifié de la dynamique des modules.....	114
Figure 6-6. Vision fonctionnelle d'un système d'aide à la conception de tournées.....	116
Figure 6-7. Copie d'écran du système d'aide à la conception de tournées.....	117



## 1 Curriculum Vitae

### 1.1 Etat civil

Nom patronymique : LACOMME  
Prénom(s) : Philippe Laurent  
Date et lieu de naissance : 6 mai 1970 à Paimboeuf (44)  
Nationalité : Française  
Adresse personnelle : 1 Boulevard Claude Bernard  
Appartement : 32  
63000 Clermont-Ferrand

Fonction actuelle : Maître de Conférences à l'Université Blaise Pascal  
Titre universitaire : Doctorat d'Université : "Optimisation des systèmes de production : méthodes stochastiques et approche multi-agents", obtenu le 16 janvier 1998 à Clermont-Ferrand. Mention : Très Honorable

Adresse professionnelle (1): Université Blaise Pascal  
LIMOS CNRS UMR 6158  
Laboratoire d'Informatique, de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes  
Campus des Cézeaux, BP 10125  
63173 Aubière Cedex

Adresse professionnelle (2): IUT de Montluçon  
Département GLT  
Avenue Aristide Briand  
03100 Montluçon

Téléphone professionnel : 04 73 40 75 85  
Adresse électronique : [placomme@sp.isima.fr](mailto:placomme@sp.isima.fr)  
Page personnelle : <http://www.isima.fr/~lacomme>

## 1.2 Formation et fonction universitaire

### 1.2.1 Formation

- 1998        **Doctorat d'Université** obtenu à l'Université Blaise Pascal (Clermont-Ferrand II).  
Titre : "Optimisation des systèmes de production : méthodes stochastiques et approche multi-agents"  
Mention : Très Honorable  
Directeur de thèse : Michel Gourgand (Professeur)  
Co-Directeur de thèse : Gérard Fleury (Maître de Conférences)  
Equipe : "Modélisation et Aide à la Décision" du LIMOS
- 1993        **DEA Informatique des Systèmes Industriels** (mention Assez Bien)  
Université Blaise-Pascal  
**Ingénieur** en Informatique (mention Très Bien, major de promotion) en  
Génie Informatique, CUST - Clermont-Ferrand
- 1990        **Deug Sciences (A - SSM)**  
Filière : Méthodes Mathématiques, Physique et Informatique  
Université de Pau (64).

### 1.2.2 Fonctions occupées

**Maître de Conférences**, Université de Technologie de Troyes, de février 1999 à Septembre 2001.  
**Attaché Temporaire d'Enseignement et de Recherche (ATER)** à l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand II, du mois de septembre 1997 au mois de Janvier 1999.

### 1.2.3 Fonction actuelle

**Maître de Conférences** à l'IUT de Montluçon (département GLT).  
Laboratoire : LIMOS  
Titulaire de la prime d'encadrement doctoral et de recherche (**PEDR**) depuis 2003.

### 1.3 Activités de recherche

Cette section présente une synthèse des activités de recherche.

#### Thèmes principaux :

- Les problèmes de tournées (TSP : Traveling Salesman Problem, ARP : Arc Routing Problem).
- Les problèmes d'évaluation de performances et d'ordonnancement dans les systèmes de production à ressources de transport limitantes (HSP : Hoist Scheduling Problem, FMS : Flexible Manufacturing System).
- Optimisation de systèmes discrets soumis à des aléas.

La **première partie** de nos recherches concerne l'étude des tournées sur arcs, laquelle s'inscrit dans la suite logique de nos travaux sur le TSP (Traveling Salesman Problem) menés en 1998 au Laboratoire d'Informatique de Clermont-Ferrand (LIMOS). Ces activités de recherche sont réalisées en collaboration :

- d'une part avec une équipe espagnole (comprenant notamment José-Manuel Belenguer et Enrique Benavent) dans le cadre d'un projet Picasso (Egide) ;
- d'autre part avec une équipe de Troyes animée par Christian Prins dans le cadre d'un projet stratégique de l'UTT (Université de Technologie de Troyes).

Sont également associés à ces travaux des collègues du Laboratoire de Mathématiques de Clermont-Ferrand, du LAMIH de Valenciennes et du LORIA de Nancy.

Le problème théorique sous-jacent est le CARP (Capacitated Arc Routing Problem). Cette activité a donné lieu à la publication d'un article à la conférence EURO-GP 2001 nommé meilleur article pour EVOSTIM (Second European Workshop on Scheduling and Timetabling). Cet article synthétise l'approche basée sur un algorithme génétique et décrit le schéma d'optimisation proposé. Cette méthode est la plus performante publiée pour le CARP.

#### Notre recherche s'oriente maintenant vers :

- les problèmes d'optimisation multi-objectifs appliqués aux tournées sur arcs ;
- les problèmes d'optimisation relatifs aux tournées stochastiques.

Pour les problèmes d'optimisation multi-objectifs nous nous sommes intéressés à l'application d'un schéma d'optimisation de type Algorithme Génétique (NSGA-II) aux tournées sur arcs. Les recherches menées dans ce domaine ont abouti à la proposition d'un schéma d'optimisation performant puisque l'approche multi-objectifs permet de retrouver les

solutions déjà obtenues par l'algorithme génétique proposé pour le CARP. Nos recherches ont donné lieu à une publication parue dans LNCS (Lecture Notes in Computer Science).

P. Lacomme, C. Prins, M. Sevaux, "A genetic algorithm for a bi-objective capacitated arc routing problem ", in C.M. Fonseca, P.J. Fleming, E. Zitzler, K. Deb and L. Thiele (Eds.), Evolutionary multi-criterion optimization (Proceedings of EMO 2003), LNCS 2632, p. 550-564, Springer, ISBN 3-540-01869-7, 2003.

Pour les problèmes de tournées stochastiques un schéma d'optimisation a été défini pour obtenir des solutions robustes aux événements aléatoires (variations des quantités à collecter sur les arcs).

Les recherches menées dans ce domaine ont abouti à la détermination de solutions robustes en diminuant de quelques pourcents la capacité des camions. Cette approche a permis la rédaction d'un article accepté pour publication dans la revue JORS (Journal of Operational Research Society).

G. Fleury, P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Cherif, "Improving robustness of solutions to arc routing problems". Journal of the Operational Research Society (JORS). Accepté pour publication. 2005.

G. Fleury, P. Lacomme, C. Prins, W. Ramdane-Chérif, "Robustness evaluation of solutions for the Capacitated Arc Routing Problem", Conference, 2002 AI, Simulation and Planning in High Autonomy Systems, p. 290-295, Lisbon (Portugal), 7-10 April 2002, Fernando J. Barros and Norbert Gambiasi (Ed.), Conference AIS, ISBN 1-56555-242-3, 2002.

Nous développons actuellement une approche basée sur une analyse mathématique des solutions qui devrait aboutir à un schéma d'optimisation complet et à la proposition d'un schéma d'optimisation stochastique et multi-objectifs. Le but est d'optimiser simultanément plusieurs critères de manière stochastique.

Dans le cadre de l'encadrement de l'année à temps plein d'Eric Soutera (étudiant au CNAM), nous nous intéressons au VRP et plus particulièrement au cas hétérogène.

La **deuxième** partie concerne l'ordonnancement dans les ateliers à ressources de transport limitantes. Le but de l'étude est de déterminer l'ordre d'entrée des pièces qui minimise un critère (taux d'inactivité du chariot, temps de production). Ces travaux concernent les ateliers de traitement de surfaces ainsi que les systèmes flexibles de production. Nous collaborons sur ce thème avec l'HeuDiaSyc. Des étudiants de l'Université Blaise Pascal ont été associés à cette recherche : Anthony Caumont, Olivier Duval et Noura Ould Aklouche notamment.

Dans le cadre de l'Action Spécifique CNRS Recherche Opérationnelle, une collaboration a été développée sur le thème des systèmes flexibles de production. La première réunion a eu

lieu à Paris le 21 mars 2003. Un article de synthèse présentant la recherche réalisée en France est soumis pour publication à la revue JESA.

Nous développons actuellement plusieurs voies de recherche :

*Le développement d'un modèle linéaire* prenant en compte toutes les contraintes de fonctionnement de ce type de système (capacité limitée des stocks d'entrée/sortie des machines...).

Ce travail a conduit à la présentation d'un article à la conférence INOC ainsi qu'à l'Ecole de Recherche Opérationnelle de Tours.

M. Bécart, P. Lacomme, A. Moukrim and N. Tchernev, "Mixed Integer Linear Model for FMS scheduling based on AGVs : Job-Shop with a Single Transport Robot", INOC'03, 27-29 Octobre 2003, p. 55-60, Evry/Paris, France, ISSN : 1762-5734, 2003.

M. Bécart, P. Lacomme, A. moukrim and N. Tchernev, "Modélisation des systèmes flexibles de production avec un seul chariot sous la forme d'un Job-Shop avec transport : un modèle linéaire mixte". École d'Automne de Recherche Opérationnelle EARO 2003, 28, 29, 30 et 31 octobre 2003 à Tours.

Des approches pour la *résolution d'instances de grande taille* basées, soit sur des couplages avec des modèles de simulation et des métaheuristiques, soit sur des méthodes évoluées d'optimisation.

La résolution directe du modèle est limitée à des instances de taille modeste. Le modèle initial a été simplifié et les résultats ont été comparés à ceux obtenus par d'autres approches dont un modèle de simulation récursif et le couplage branch-and-bound / modèle de simulation (un article est en cours de rédaction). La recherche de méthodes évoluées d'optimisation de type Cutting-Plane ou bien de type relaxation Lagrangienne pour la résolution d'instances de plus grande taille sera indispensable. Ce travail est aujourd'hui préliminaire.

*L'étude des modèles théoriques issus du job-shop avec transport.*

Ce travail a commencé au travers de la thèse d'Anthony Caumond que nous co-encadrons avec N. Tchernev et M. Gourgand. Les premiers résultats sont encourageants :

- extension de la notion de graphe disjonctif pour les time-lags maximaux ;
- proposition d'un schéma d'optimisation issu de celui de Nowicki E. and C. Smutnicki
- proposition d'un algorithme génétique.

## 1.4 Publications

Dans ce paragraphe nous présentons nos publications en conférences, en distinguant les publications en langue Anglaise et les publications en Français afin d'éviter un délicat classement en conférences sur résumé, sur papier complet, avec ou sans comité de lecture.

Nous distinguons dans le tableau 1-1 les publications effectuées pendant la thèse et celles effectuées en tant que Maître de Conférences. Nous avons précisé lorsque nous avons l'information, les articles acceptés sur résumé, résumé étendu et les articles invités.

### 1.4.1 Résumé

	Livres	Revue à paraître	Revue parues	LNCS	Publications en Anglais	Publications en Français	
2005		JORS, IJPR CAOR(2)	EJOR			ROADEF'05 (2)	Publications effectuées après ma nomination comme Maître de Conférences
2004			AOR	ANTS'04 EVOSTOC	PMS'04 ESMc'04	MOSIM'04(2)	
2003	Eyrolles		IJCIM	EMO'03	CORAL'03 (2), OSYSSEUS'03, INOC'03, ESMc'03	MOSIM'03, EARO'03	
2002					MOMH, IFORS'02, IFAC (2), IPMU'02, CO'02, AIS'02, PMS'02	ROADEF'02	
2001			IJPR	Euro-GP'01	ESS'01 (2)	MOSIM'01 (2)	
2000					IMACS, ESM, MCPL	ROADEF'00	
1999			JESA, JIM		ACS'99, CARs&COF, ETFA'99, EPM'99		
<b>Total</b>	1	4	6	4	24	10	
1998					OR'98	INFORSID'98	Publications effectuées en tant que Thésard
1997			JESA		IMACS'97	INFORSID'96	
1996			JESA		PAAM'96, CIMAT'96, ESM'96, ESA'96, ESS'96, PPC'96		
1995						FRANCOSIM	
<b>Total</b>			2		8	3	

\* : l'article paru à Euro-GP'01 a reçu le prix du meilleur article du WorkShop EVOSTIM.

**Tableau 1-1. Résumé des publications**

### 1.4.2 Livre

P. Lacomme, C. Prins, M. Sevaux, "Algorithmes de graphes – 2ème Edition avec programmes en Pascal/Delphi", Editeur : Eyrolles. ISBN : 2-212-11385-4, **2003**.

### 1.4.3 Publications dans des revues

G. Fleury, P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Cherif. "Improving robustness of solutions to arc routing problems". Journal of the Operational Research Society (JORS). Accepté pour publication. **2005**.

- P. Lacomme, C. Prins and M. Sevaux. "A genetic algorithm for a bi-objective capacitated arc routing problem". *Computers and Operations Research*. Accepté pour publication. **2005**.
- P. Lacomme, A. Moukrim and N. Tchernev. "Simultaneous job input sequencing and vehicle dispatching in a single-vehicle automated guided vehicle system: a heuristic branch and bound approach coupled with a discrete event simulation model". *International Journal of Production Research*. Accepté pour publication. **2005**.
- J-M. Belenguer, E. Benavent, P. Lacomme and C. Prins, "Lower and upper bounds for the mixed capacitated arc routing problem". *Computers and Operations Research*. Accepté pour publication. **2005**.
- P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Cherif. "Evolutionary algorithms for periodic arc routing problems". *European Journal of Operational Research*, Vol 165. p. 535-553. **2005**.
- P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Cherif. "Competitive Memetic Algorithms for Arc Routing Problems". *Annals of Operations Research*. Vol 131. p. 159-185. **2004**.
- M. Gourgand, P. Lacomme and M. K. Traoré. "Design of a monitoring environment for manufacturing systems management and optimization" *International Journal of Integrated Manufacturing* (IJCIM), Vol 16(1), p. 61-80. **2003**.
- G. Fleury, M. Gourgand and P. Lacomme. "Meta-Heuristics for the Stochastic Hoist Scheduling Problem". *International Journal of Production Research (IJPR)*, Vol 39(15), p. 3419-3457. **2001**.
- G. Fleury, M. Gourgand et P. Lacomme. "Le Couplage-Triple Stochastique pour la prise en compte des événements aléatoires dans les systèmes industriels de production". *RAIRO-JESA-APII*. Vol. 33(1-2), p. 9-42. **1999**.
- G. Fleury, J-Y. Goujon, M. Gourgand and P. Lacomme. "Multi-Agents Approach and Stochastic Optimization: Random Events in Manufacturing Systems". *Journal of Intelligent Manufacturing*. Vol. 10(1), p. 81-101. Mars **1999**.
- G. Fleury, J-Y Goujon, M. Gourgand et P. Lacomme. "Une contribution à l'optimisation des systèmes de production : le Couplage-Triple". *RAIRO-JESA-APII*. Vol 31(9-10), p. 1411-1445. **1997**.
- J-Y Goujon et P. Lacomme, "Planification pour les fonderies de type sable : une approche combinant optimisation stochastique et simulation". *RAIRO-APII-JESA*, Vol 30(7), p. 963-987. **1996**.



#### **1.4.4 Publications dans la série Lecture Notes in Computer Science (Ed. Springer).**

- P. Lacomme, C. Prins and A. Tanguy. "First Competitive Ant Colony Scheme for the CARP", Lecture Notes in Computer Science, Publisher: Springer-Verlag Heidelberg, ISSN: 0302-9743, ISBN 3-540-22672-9, Volume 3005 / 2004, Title: Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence : 4th International Workshop, ANTS 2004,, Brussels, Belgium, September 5-8, p. 426 – 427, Springer, **2004**
- G. Fleury, P. Lacomme and C. Prins. "Evolutionary Algorithms for Stochastic Arc Routing Problems", Lecture Notes in Computer Science, Publisher: Springer-Verlag Heidelberg, ISSN: 0302-9743, Volume 3005 / 2004, Title: Applications of Evolutionary Computing: EvoWorkshops 2004: EvoBIO, EvoCOMNET, EvoHOT, EvoISAP, EvoMUSART, and EVOSTOC, Coimbra, Portugal, April 5-7, 2004. Proceedings, ISBN: 3-540-21378-3, p. 501-512. **2004**
- P. Lacomme, C. Prins and M. Sevaux. "Multiobjective Capacitated Arc Routing Problem", in C.M. Fonseca, P.J. Fleming, E. Zitzler, K. Deb and L. Thiele (eds.), Evolutionary multi-criterion optimization (Proceedings of EMO 2003), LNCS 2632, p. 550-564, Springer, ISBN 3-540-01869-7, **2003**.
- P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Cherif. "A Genetic Algorithm for the Capacitated Arc Routing Problem and Its Extensions". EURO-GP 2001 (4th European Conference on Genetic Programming), Côme, Italie, 18-20 avril 2001. Actes parus dans la série Lecture Notes in Computer Science, E.J.W. Boers et al. (Eds), EvoWorkshop 2001, LNCS 2037, p. 473-483, Springer-Verlag Berlin Heidelberg **2001**.

#### **1.4.5 Publications dans des conférences en langue anglaise**

##### **Conférences réalisées en 2004**

- P. Lacomme, E. Kindler, I. Křivý, A. Tanguy. "Reflective simulation model for optimization of FMS", October 25-27, European Simulation and Modelling Conference, ESMC'04, Unesco, Paris, p. 94-98, ISBN 90-77381-14-7, **2004**.
- G. Fleury, P. Lacomme and M. Sevaux. "Stochastic Maintenance Scheduling Problem", Ninth International WorkShop on Project Management and Scheduling, PMS'04, April 26-27-28 2004, Nancy (France), p. 405-409, **2004**.

### Conférences réalisées en 2003

- M. Bécart, P. Lacomme, A. Moukrim and N. Tchernev. "Mixed Integer Linear Model for FMS scheduling based on AGVs : Job-Shop with a Single Transport Robot", INOC'03, 27-29 Octobre 2003, p. 55-60, Evry/Paris, France, ISSN 1762-5734, **2003**.
- E. Kindler, I. Krivy., P. Lacomme and A. Tanguy. "Simulation of FMS Including Automated Guided Vehicle", Proceedings of the 2003 European Simulation and Modelling Conference, "Modelling and Simulation'2003", ESMc 2003, Naples, 2003. Editors: Di Martino, B., Yang, L.T., Bobeanu C., p. 122 - 126, ISBN: 90-77381-04-X, **2003**.
- G. Fleury, P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Chérif. "Computing Robust Solutions for the Stochastic CARP", ODYSSEUS 2003, Second International Workshop on Freight Transportation and Logistics, **2003**. (*acceptation sur résumé étendu*)
- P. Lacomme, C. Prins, W. Ramdane-Chérif. "Evolutionary Algorithms for Arc Routing Problems". Conference on Routing and Location (CORAL 2003) 24-26/02/2003, Puerto de la Cruz (Ténérife), Espagne. **2003**. (*papier invité*)
- J-M Belenguer, A. Benavent, P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Chérif. "Heuristics and Lower Bound for the Mixed Capacitated Arc Routing Problem". Conference on Routing and Location, (CORAL 2003), 24-26/02/2003, Puerto de la Cruz (Ténérife), Espagne, **2003**.

### Conférences réalisées en 2002

- P. Lacomme, C. Prins and M. Sevaux. "Multi-Objective Capacitated Arc Routing Problem", MOMH, (Workshop Multiple Objective Metaheuristics) Carré des Sciences, Paris-France, November, 4-5 Nov., **2002**. (*Conférence sans acte*)
- P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Chérif. "Fast algorithms for general arc routing problems". Juillet 2002, IFORS'2002. Edimbourg Royaume Uni, **2002**. (*Conférence sans acte*)
- P. Lacomme, A. Moukrim and N. Tchernev. "A New Lower Bound for scheduling of FMS based on AGV Material Handling", IFAC'2002, (15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control) Barcelona, 21-26 July **2002**.
- P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Chérif. "General Arc Routing Problems Solved by a Cutting Plane Algorithm and a Genetic Algorithm", IFAC'2002, (15th Triennial World Congress of the International Federation of Automatic Control), Barcelona, 21-26 July **2002**.
- P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Chérif. "Evolutionary Algorithms for Multiperiods Arc Routing Problems", IPMU'2002 (Ninth International Conference IPMU, Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based System), ISBN 2-95166453-2-5, p. 845-852, Vol II, July 1-5, 2002, Annecy (France), **2002**.

- P. Lacomme, C. Prins, W. Ramdane-Chérif. "Realistic arc routing problems: fast heuristics and instance generator", actes de CO2002 (International Symposium on Combinatorial Optimization), p. 112, Paris, France, 08-10/04/2002. (*acceptation sur résumé*)
- G. Fleury, P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Chérif. "Robustness evaluation of solutions for the Capacitated Arc Routing Problem", Conference, 2002 AI, Simulation and Planning in High Autonomy Systems, p. 290-295, Libon (Portugal), 7-10 April 2002, Fernando J. Barros and Norbert Gambiasi (Ed.), Conference AIS, ISBN 1-56555-242-3, 2002.
- P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Chérif. "Planning problems in arc routing", Actes de PMS 2002 (EURO Working Group on Project Management and Scheduling), p. 232-235, Valencia, Espagne, 03-05/04/2002. Actes coordonnés par V. Valls et al., édités par Fundacion Universidad-Empresa de Valencia, Conference, ISBN 84-921190-5-5, 2002. (*acceptation sur résumé*)

### **Conférences réalisées en 2001**

- P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Chérif. "An integer linear model for general arc routing problems", 13th European Simulation Symposium, Simulation in Industry, Marseille, France, p. 427-431, October 18-20, ISBN 90-77039-02-3 2001.
- A. Dolgui, P. Lacomme, and D. Bekhouche. "Discrete Event Simulation Model for Performances Analysis in an Industrial Case Study", 13th European Simulation Symposium, Simulation in Industry, Marseille, France, p. 270-271, October 18-20, ISBN 90-77039-02-3, 2001.

### **Conférences réalisées en 2000**

- P. Lacomme and N. Tchernev. "A Mean Tardiness Minimization Approach to Simultaneous Job Input Sequencing and Vehicles Dispatching in as FMS". 16th Imacs World Congress 2000, on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation in Lausanne, Switzerland August 21-25, 2000.
- M. Gourgand, P. Lacomme and N. Tchernev. "Simulation Based Scheduling with WIP Consideration for FMS using Trip-Based Material Handling Systems", p. 481-488, International European Simulation Multi-Conference (ESM'2000), Gent, Belgium, 23-26 May, 2000.
- M-L Espinouse, P. Lacomme, A. Moukrim and N. Tchernev. "A Branch and bound approach for the job input sequencing and devices dispatching in FMS based on AGVs". Congrès IFAC/IFIP/IEEE Management & Conduite en Production & Logistique (MCPL'2000), p. 67-72, 5-8 juillet 2000.

### **Conférences réalisées en 1999**

- G. Fleury, M. Gourgand and P. Lacomme. "Coupling meta-heuristics-discrete event simulation models for the stochastic Hoist Scheduling Problem". The Sixth International Conference on Advanced of Computer Systems (ACS'99), p. 423-430, Poland, November 18-19, **1999**.
- P. Lacomme, N. Tchernev and M. K. Traoré. "A Generic Framework for Studying Surface Treatment Systems Based on Multimodeling: Object-Oriented Design, Multi-Agent Approach and Operational Research Tools", In Proceedings of the 15th IEE International conference on CAD/CAM, Robotics and Factories of the Future Automation, (CARs&COF), August 18-20, 1999, Aguas de Lindoia, Brazil, **1999**.
- P. Lacomme, N. Tchernev and C. Chu (pas d'ordre alphabétique des auteurs). "An Efficient Framework for Job Input Sequencing and Vehicle Dispatching in a Flexible Manufacturing System based on AGV transport", 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'99), p. 653-662, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) Barcelona, Catalonia, Spain October 18-22<sup>nd</sup>, **1999**
- M. Gourgand, P. Lacomme and N. Tchernev, "Job Input Sequencing and Device Dispatching in a Single Device Automated Guided Vehicle Systems", International Conference on Industrial Engineering and Production Management (IEPM'99), p. 438-447, Glasgow, July 12-15, **1999**.

### **Conférences réalisées en 1998**

- L. Deroussi, G. Fleury, M. Gourgand and P. Lacomme. "Coupling Heuristics and Stochastic Algorithms for the Traveling Salesman Problem". International Conference on Operations Research. Zurich. 31 Aout-3 Septembre **1998**.

### **Conférences réalisées en 1997**

- G. Fleury, J-Y. Goujon, M. Gourgand and P. Lacomme. "Stochastic Optimization for Manufacturing Systems with Randoms Events". 15 IMACS World Congress on Scientific Computation, Modelling and Applied Mathematics. p. 427-432, Berlin. 24-29 Aout **1997**.

### **Conférences réalisées en 1996**

- G. Fleury, J-Y. Goujon, M. Gourgand and P. Lacomme. "Multi-Agents Approach for Manufacturing Systems Optimization". Proceedings of the Practical Application of Intelligent Agents and Multi-Agent Technology (PAAM'96). p. 225-244. Londres. 24-26 Avril. **1996**.

- G. Fleury, J-Y. Goujon, M. Gourgand and P. Lacomme. "Multi-Agent Simulation for Planification of Manufacturing Systems". Proceedings of the Computer Integrated Manufacturing and Automation Technology (CIMAT'96). p. 148-153. Grenoble. 29-31 mai. **1996**.
- J-Y. Goujon, P. Lacomme and M. K. Traoré. "A Multi-Agent Simulation Methodology for Manufacturing Systems". Proceedings of the Modelling and Simulation Conference (ESM'96). p. 183-187. Budapest. 3-6 juin. **1996**.
- G. Fleury, J-Y. Goujon, M. Gourgand and P. Lacomme. "A Hoist-Scheduling Problem Solved with an Opportunistic Approach". Symposium on Discrete Events and Manufacturing Systems. CESA'96 IMACS MultiConference on Computational Engineering in Systems Applications. p. 473-478. Lille. 9-12 juillet. **1996**.
- J-Y. Goujon, P. Lacomme, S. Norre and M. K. Traoré. "Computerized Industrial Surface Treatment Line Control: Resolution of a Hoist Scheduling Problem". Simulation in Industry, 8th European Simulation Symposium (ESS'96). p. 377-382. Genoa (Italie). 24-26 Octobre. **1996**.
- G. Fleury, M. Gourgand and P. Lacomme. "Stochastic Algorithms to Solve Problems in Transport Systems". Proceedings of the Workshop on Production Planning and Control. p. 360-363. Mons (Belgique). Septembre **1996**.

#### **1.4.6 Publications dans des conférences en langue française**

- A. Caumont, P. Lacomme, N. Tchernev. "Proposition d'un algorithme génétique pour le jobshop avec time-lags", 6ème congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, Tours, p. 183-200, ISBN 2-86906-196-X, 14-16 Février **2005**.
- E. Soutera et P. Lacomme (pas d'ordre alphabétique des auteurs). "Un Système d'Aide à la Décision basé sur un Algorithme Génétique pour le Vehicle Routing Problem", 6ème congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, Tours, p. 332-333, 14-16 Février **2005**.
- A. Caumont, M. Gourgand, P. Lacomme et N. Tchernev, "Métaheuristiques pour les problèmes de jobshop avec time lags :  $J_m | I_{i,sj(i)} | C_{\max}$ ", 5ème conférence Francophone de MODélisation et SIMulation, "Modélisation et simulation pour l'analyse et l'optimisation des systèmes industriels et logistiques", IRCCyN, Ecole des Mines de Nantes, p. 939-946, 1-3 Septembre **2004**.
- M. Bécart, P. Lacomme, A. Moukrim et N. Tchernev. "Proposition de résolution exacte d'un MILP pour les systèmes flexibles de production du type jobshop avec transport", 5ème conférence Francophone de MODélisation et SIMulation, "Modélisation et simulation pour

- l'analyse et l'optimisation des systèmes industriels et logistiques", IRCCyN, Ecole des Mines de Nantes, p. 635-642, 1-3 Septembre **2004**.
- P. Lacomme, C. Prins et A. Tanguy, "Optimisation par colonies de fourmis pour les tournées sur arcs", 4<sup>ème</sup> conférence Francophone de MODélisation et SIMulation MOSIM, "Organisation et Conduite d'Activités dans l'Industrie et les Services", ISBN 3-936150-24-9, 23-25 avril 2003, p. 505-511, Toulouse, France, **2003**.
- G. Fleury, P. Lacomme, C. Prins et W. Ramdane-Chérif, "Etude de la robustesse des solutions pour le CARP". 4<sup>ème</sup> Congrès de la société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, ROADEF, Télécom Paris, 20-22 Février, p. 178-179, **2002**.
- P. Lacomme, C. Prins et W. Ramdane-Cherif, "Algorithmes génétiques pour les problèmes de tournées sur arcs". Conférence MODélisation et SIMulation (MOSIM'01). ISBN 1-56555-212-1. p. 117-124, Université de Technologie de Troyes (UTT), 25-27 avril **2001**.
- M-L. Espinouse, P. Lacomme, A. Moukrim et N. Tchernev, "Bornes inférieures pour l'ordonnancement intégré de la production et du transport dans les FMS avec un seul chariot filoguidé". Conférence MODélisation et SIMulation (MOSIM'01). ISBN 1-56555-212-1. p. 541-548, Université de Technologie de Troyes (UTT), 25-27 avril **2001**.
- P. Lacomme, A. Moukrim et N. Tchernev, "Résolution conjointe de problèmes d'ordonnancement et de tournées de véhicules : couplage Branch and Bound - simulation à événements discrets". Congrès ROADEF, Ecole des Mines de Nantes, p. 128-129, 26-28 janvier **2000**.
- P. Lacomme et Mamadou Kaba Traoré. "Modélisation et simulation du système d'information des ateliers de traitement de surfaces : modèle générique orienté objets et approche multi-agents". INFORSID'98. pp 131-145. Montpellier. 13-15 mai **1998**.
- J-Y. Goujon et P. Lacomme. "Une structuration du sous-système décisionnel des systèmes industriels de production". INFORSID'96. p. 139-158. Bordeaux. 4-7 Juin. **1996**.
- J-Y. Goujon et P. Lacomme. "Planification pour les fonderies de type sable : optimisation stochastique et simulation multi-agents". Journée d'Etude : Utilisation de la simulation en gestion de la production. FRANCOSIM. p. 102-116. Organisée par l'IFMA. 14 Juin. **1995**.

#### **1.4.7 Autres publications**

- P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Chérif, "Evolutionary Algorithms for a Broad Class of Planning Problems in Arc Routing". Research Report, Ref. LOSI 2002-07, University of Technology of Troyes 22/11/**2002**.
- P. Lacomme, C. Prins et W. Ramdane-Cherif, "Les problèmes de tournées sur arcs : application à la collecte des déchets ménagers", Journée Technique : Transport Urbain et Multimodalité, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, Site de Belfort, Jeudi 7 Juin **2001**.

- M-L. Espinouse, P. Lacomme, A. Moukrim and N. Tchernev, "Lower bounds for the makespan in an FMS with one AGV", seminaire de Institute of Computing Science, Poznan University of Technology, Pologne, Février **2001**.
- W. Ramdane-Cherif, P. Lacomme et C. Prins, (pas d'ordre alphabétique des auteurs) "Les problèmes de tournées sur arcs", Groupe Bermudes, Bulletin de liaison n°21, 2 février 2001, LAMIH / Université de Valenciennes, **2001**.
- P. Lacomme, "Pilotage d'une ligne de traitement de surfaces", Journée GRP-Valenciennes, 26 & 27 Octobre **2000**.
- J-Y Goujon et P. Lacomme. "Planification et Optimisation des Systèmes de Production : deux éléments de la logistiques de production". Séminaire réalisé à la journée ARFILOG à Montluçon le 25-26 mars 1996. Publié dans La logistique, recherches et mise en oeuvre. Hermes (Ed.). p. 121-130. **1996**.
- P. Lacomme. "Ordonnancement des lots et planification des mouvements d'un robot de manutention dans une ligne de traitement de surfaces", Annales Scientifiques de l'Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand II, 3ème Journée de l'Ecole Doctorale Sciences pour l'Ingénieur "Machines performantes et intelligentes", recueil des actes, 24 octobre 1996, p. 73-86, **1996**.

## **1.5 Animation de la recherche**

### **1.5.1 Evaluation de la recherche**

#### **Rapporteur**

Lecteur pour les conférences : ACS'99, MCPL'2000, MOSIM'01, MOSIM'03

Lecteur pour les revues :

IJMA, EJOR, IJPR, ITORS

#### **Présidence/Vice-présidence de sessions dans des conférences**

Session "Flexible Manufacturing Systems" à la conférence MCPL'2000.

Session "Modélisation objets et agents" à la conférence MOSIM'01

Session "Méta-Heuristiques" à la conférence MOSIM'03

#### **Organisation de manifestations scientifiques**

Co-Editeur d'un numéro spécial de la revue **J.I.M** (Journal of Intelligent Manufacturing) Titre du numéro spécial "Global Optimisation Meta-Heuristics for Industrial Systems Design and Management».

Vice Président du comité d'organisation de la conférence **MOSIM'01** (<http://www.utt.fr/MOSIM01/>)

Membre du comité d'organisation de la conférence **MOSIM'06** ([http : http://www.isima.fr/mosim06/](http://www.isima.fr/mosim06/))

Thème : Modélisation, Optimisation et Simulation des Systèmes : Défis et Opportunités

Lieu : Rabat, 3-5 avril 2006.

### **Commission de spécialistes**

Membre élu titulaire de la commission de spécialistes en 27e section depuis 2004 à l'Université de Clermont-Ferrand I.

### **1.5.2 Collaborations avec d'autres laboratoires**

Principales collaborations ayant donné lieu à des publications communes depuis les 3 dernières années :

- Departament d'Estadística i Investigació Operativa, Université de Valence (Espagne)
- Laboratoire de Mathématiques, Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand
- HeuDiaSys Université de Technologie de Compiègne.
- ISTIT, Université de Technologie de Troyes.
- LAMIH, Valenciennes.

### **1.5.3 Participation à des projets de recherche**

**Projet stratégique** : Logistique du transport : problèmes de tournées complexes (2002-2004)

Responsable du projet : Christian Prins

Montant demandé à l'université : >200 000 FF

Participants : P. Lacomme, J-M Belenguer, E. Benavent, A. Corberàn, R. Marti.

#### **Projet PICASSO**

Membre du projet PICASSO déposé avec l'équipe de recherche de Valence (2002-2003)

Responsable du projet : Christian Prins

Séjour effectué à Valence en mai 2002. Durée : 1 semaine.

Projet renouvelé pour une deuxième année.

Projet "**Ordonnancement de jobs et gestion des moyens de transport dans les ateliers**



## **flexibles de production"**

Responsable du projet : A. Moukrim

Action Spécifique Recherche Opérationnelle

Rédaction d'un article regroupant la communauté française sur les FMS et soumis à JESA (Journal Européens des Systèmes Automatisés).

Titre : Les Systèmes Flexibles de Production

Auteurs : N. Brauner, P. Castagna, M-L. Espinouse, G. Finke, Ph. Lacomme, P. Martineau, A. Moukrim, A. Soukhal, C. Tacquard, N. Tchernev

### **1.5.4 Encadrements de thèse**

Thésard : Wahiba Ramdane Chérif

Encadrement : Philippe Lacomme (50%) et Christian Prins (50%)

Titre : Problèmes d'optimisation en collecte de déchets

Soutenance : 12 décembre 2002.

Thésard : Anthony Caumond

Encadrement : Michel Gourgand (20%), Philippe Lacomme (40%) et Nikolay Tchernev (40%)

Titre : Métaheuristiques et modèles d'évaluation de performances pour le Job-Shop flexible avec transport

## **1.6 Activités pédagogiques**

### **1.6.1 Résumé**

Les tableaux ci-dessous (tableau 1-2 et tableau 1-3) résument les principales heures d'enseignement effectuées depuis notre nomination comme Maître de Conférences. Lorsqu'un cours a eu lieu plusieurs années, le volume horaire indiqué est un volume moyen. Les heures faites dans les différentes matières (en particulier à l'IUT de Montluçon) varient d'une année sur l'autre en fonction du nombre de groupes d'étudiants.

	<b>Cours</b>	<b>Volume horaire (annuel)</b>	<b>Années</b>
<b>Département</b>	Cours de gestion des systèmes industriels	34 h	1999/2001
<b>GSI</b>	TP associés au cours	2*24 h	1999/2001
	TD associés au cours	2*24 h	1999/2001
<b>Dept GSI</b>	TD d'outils d'aide à la décision	20 h	2000/2001
<b>Dept GSID</b>	TP de programmation	14 h	2000/2001
<b>Dept GSI</b>	TP de simulation	14 h	1999/2001
<b>DESS MOI</b>	Intervention dans le module logistique	10 h	2000
<b>CNAM</b>	Cours d'Informatique Appliquée au Traitement des Données	24 h	2001
<b>CNAM</b>	TP d'Informatique Appliquée au Traitement des Données	25 h	2000

**Tableau 1-2. Résumé des interventions à Troyes**

	<b>Cours</b>	<b>Volume horaire (annuel)</b>	<b>Années</b>
<b>Département</b>	TD de Recherche Opérationnelle	70 h	2001-2005
<b>GLT – IUT</b>	TD de Mathématiques (statistiques)	50 h	2003-2005
<b>Montluçon</b>	TD de Gestion des Stocks	10 h	2001-2005
	Travaux Pratiques d'Informatique	40 h	2001-2005
<b>Licence Pro</b>	Cours de Recherche Opérationnelle	8h	2004-2005
<b>Login IUT</b>	TD de Recherche Opérationnelle	20 h	2004-2005
<b>Montluçon</b>			

**Tableau 1-3. Résumé des interventions à Clermont-Ferrand**

Le tableau 1-4 donne les intitulés des enseignements assurés en tant que thésard à l'Université (Deug 2<sup>ième</sup>, Licence/Maîtrise d'Informatique), au Lycée Blaise Pascal, au CNAM ainsi que dans les formations MAFPEN.

<b>Cours</b>	
<b>DEUG SM-PC</b>	Enseignement Intégré de Turbo-Pascal
<b>2ème année</b>	Travaux Pratiques de Turbo-Pascal
<b>Licence</b>	Travaux Pratiques d'Optimisation
<b>d'Informatique</b>	Travaux Pratiques d'Ada
<b>Maîtrise</b>	Travaux Pratiques de Génie Logiciel
<b>d'Informatique</b>	Travaux Pratiques de Compilation
	Travaux Pratiques de C++
	Cours de Méthodes et Outils de Spécification
<b>Lycée Blaise-Pascal</b>	Khôlles d'Informatique - Mathématiques Spéciales (SPE P' et PC*)
<b>CNAM</b>	TP Algorithmique Programmation - CYCLE A
	Cours d'Algorithmique - CYCLE A
<b>Formations</b>	Formation MAPLE aux enseignants du lycée Lafayette à
<b>MAFPEN</b>	Clermont-Ferrand (MAFPEN)

Tableau 1-4. Résumé des interventions à Clermont-Ferrand en tant que thésard

### 1.6.2 Encadrements pédagogiques

- Encadrement de stages d'étudiants de l'Université de Technologie de Troyes  
2-4 étudiants/an
- Encadrement de stages d'étudiants de l'IUT de Montluçon  
3-5 étudiants de 1<sup>ère</sup> année/an  
3-5 étudiants de 2<sup>ème</sup> année/an  
5 étudiants de la Licence Pro/an
- Encadrement de projets tutorés  
2 groupes/an de projets tutorés co-encadrés avec des collègues du département  
1 groupe se compose de 2 à 3 étudiants

Les projets tutorés sont des travaux réalisés par des étudiants en autonomie et ceci sous la responsabilité d'un enseignant. Presque tous les projets tutorés que nous avons encadrés ont été réalisés dans le cadre d'une collaboration avec une entité extérieure à l'IUT.

Exemples de projets tutorés que nous avons encadré :

- Mise en place d'un suivi des stocks à la caserne de pompiers de Montluçon
- Dimensionnement d'un stock et traçabilité des pièces pour la société S2MI
- Etude de l'implantation d'un nouveau magasin pour le CROUS de Montluçon

### 1.6.3 Encadrements d'étudiants sur des projets liés à la recherche (3 dernières années)

Eric Soutera. Etudiant du CNAM

Problème de tournées sur nœuds

Co-Encadrement avec M. Gourgand

Sujet : en 2004-2005 nous assurons avec Michel Gourgand l'encadrement d'Eric Soutera qui a passé une année à temps plein au sein du laboratoire. Il a travaillé sur les problèmes de tournées de véhicules. Son travail a donné lieu à deux publications : la première au congrès ROADEF à Tours et la deuxième à la conférence IESM à Marrakech [SOU, 05] [LAC, 05b].

Khata Mohammed Nadir. Stage de Maîtrise d'Informatique.

Problème de tournées sur nœuds

Co-Encadrement avec M. Gourgand

Sujet : rédaction d'un cahier des charges pour une entreprise industrielle concernant la gestion de sa flotte de camions.

Mathieu Bécart– Projet CUST Génie Mathématiques

Modèle linéaire pour la planification des systèmes flexibles de production

Co-Encadrement avec N. Tchernev

Sujet : Mathieu Bécart a travaillé sur la mise au point d'un modèle linéaire pour les problèmes d'ordonnancement dans les SFP. Son travail a donné lieu à 2 publications [BEC, 03] [BEC, 04].

Fabrice Franquenck et Lorine Pornet. 2<sup>ième</sup> Année d'Ingénieur ISIMA

Solutions robustes et/ou flexibles du job-shop

Co-Encadrement avec A. Tanguy et Anthony Caumond

Cédric Caron, Nicolas Antoine. 3<sup>ième</sup> Année d'Ingénieur ISIMA.

Réalisation d'un logiciel en OpenGL pour la visualisation de graphes en 3D

Co-Encadrement avec A. Tanguy

Rachid Driouch et Nicolass Kuchciak. 2<sup>ième</sup> Année d'Ingénieur ISIMA.

Optimisation de la collecte des déchets ménagers (algorithmes de fourmis)

Co-Encadrement avec A. Tanguy

Olivier Duval et Noura Ould Aklouche. 2<sup>ième</sup> Année d'Ingénieur ISIMA.

Etude de la résolution exacte d'un problème d'ordonnancement dans les AGVs

Co-Encadrement avec A. Moukrim (Université de Technologie de Troyes)

Michael Bourion et Mounir Tlili– Projet de DESS.  
Etude des problèmes de conception de systèmes flexibles de production  
Co-Encadrement avec R. Majhoub, N. Tchernev

#### **1.6.4 Participation à des voyages d'étude**

En 2003, nous avons participé au voyage d'étude des étudiants de 2<sup>ième</sup> année à Barcelone (Espagne). Ce voyage s'inscrit dans leur formation.

#### **1.6.5 Supports de cours**

- Support de cours d'Ada pour les étudiants de licence et du CNAM (60 pages)
- Support de cours de Structures de Données pour les étudiants du CNAM (90 pages)
- Support de cours de Turbo-Pascal pour les étudiants de DEUG (60 pages)
- Support de cours MAPLE pour les enseignants du Lycée Lafayette de Clermont-Ferrand pour la formation MAFPEN et pour les enseignants du Département de Mathématiques (60 pages)

#### **1.6.6 Participation à des projets internationaux de coopération**

Nous nous sommes récemment impliqué dans le partenariat entre l'Université de Clermont-Ferrand et l'Université Ferhat Abbas de Sétif. Cette convention entre la France et l'Algérie s'inscrit dans un ensemble de mécanismes de coopération : un programme de bourses ouvert aux étudiants, aux enseignants-chercheurs ; un programme de projets de recherche ; un programme de mise en place d'une école doctorale de Français...

Dans le cadre de ce partenariat, nous participerions à la mise en place du LMD à l'Université Ferhat Abbas de Sétif.

#### **1.6.7 Autres activités pédagogiques**

Nous sommes co-auteur d'un livre sur les algorithmes de graphe :

P. Lacomme, C. Prins et M. Sevaux, "Algorithmes de graphes – 2ème Edition avec programmes en Pascal/Delphi", Editeur : Eyrolles. ISBN : 2-212-11385-4, **2003**.

L'objet de ce livre est de rendre les techniques fondées sur la théorie des graphes accessibles à des "non-spécialistes" et de montrer comment les mettre en oeuvre dans des cas concrets. Une première partie introduit les notions d'optimisation combinatoire, de complexité des algorithmes et donne un panorama des méthodes existantes, des plus classiques aux plus récentes.

La seconde partie traite des différents problèmes de graphes : chemins optimaux, flots, tournées, coloration, etc. Les algorithmes sont accompagnés de programmes en pseudo-code et en langage Delphi avec des exemples d'applications.



## 2 Synthèse des travaux de recherche

Ce chapitre ainsi que les chapitres 3 et 4 proposent une synthèse de nos travaux de recherche en mettant l'accent sur les thèmes abordés et les démarches de résolution retenues. Pour chaque chapitre et section, les collaborations et les implications des étudiants sont mises en évidence et quelques articles liés aux thèmes abordés sont cités. La présentation concerne en grande partie les travaux réalisés depuis notre nomination comme Maître de Conférences.

Les travaux portent sur deux axes : les problèmes de tournées et les ateliers à ressources limitantes ce qui inclut les Systèmes Flexibles de Production, les Ateliers de Traitement de Surfaces et les problèmes de job-shop.

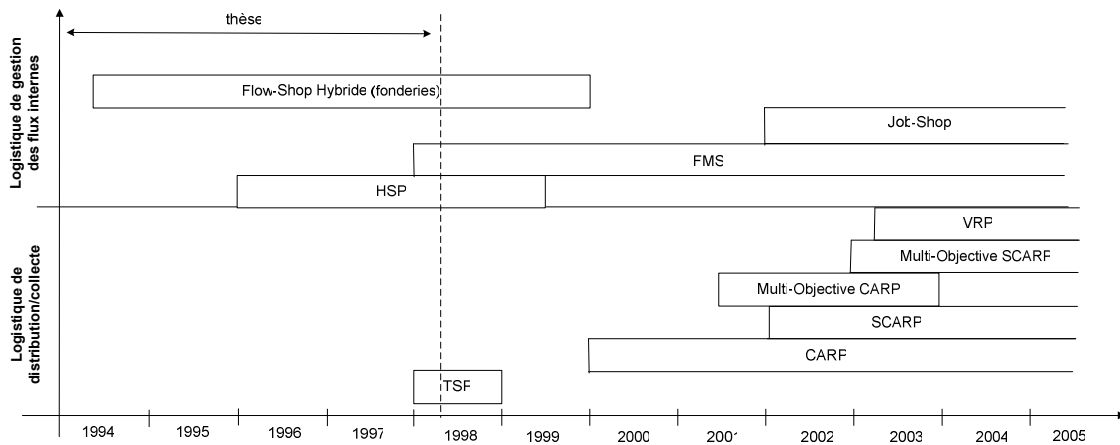
Durant notre thèse nous nous sommes intéressé aux fonderies de type sable (qui se modélisent comme un flow-shop), au HSP (Hoist Scheduling Problem) et au TSP (Travelling Salesman Problem). Ensuite, depuis 1999, date de notre nomination en tant que Maître de Conférences à l'Université de Technologie de Troyes, deux voies ont été développées en parallèle.

- La première concerne les problèmes des SFP (Systèmes Flexibles de Production ou Flexible Manufacturing System en Anglais) : ils sont, depuis 1999, un centre d'intérêt important et font l'objet d'une collaboration avec l'HeuDiaSyc.
- La seconde se rapporte aux problèmes de job-shop avec transport qui, depuis le début de la thèse d'Anthony Caumond (LIMOS), sont venus compléter les sujets étudiés par l'équipe sur les ateliers à ressources limitantes.

En parallèle, une collaboration pérenne s'est développée avec le laboratoire ISTIT-Institut des Sciences et Technologies de l'Information de Troyes (équipe OSI) anciennement le LOSI de l'Université de Technologie de Troyes. Les problèmes de tournées sur arcs ont été abordés dans la suite logique des travaux initiés sur le TSP. Simultanément nous avons développé une collaboration avec le LAMIH sur des aspects particuliers des tournées de véhicules multi-objectifs. Le Laboratoire de Mathématiques de Clermont-Ferrand nous a rejoint pour la prise en compte des phénomènes stochastiques et la détermination de solutions robustes.

La figure 2-1 reprend les thèmes de recherche abordés et présente les contextes dans lesquels les études ont été réalisées.





**Figure 2-1. Problèmes et outils abordés**

Un certain nombre de ces problèmes ont fait l'objet d'une étude, aussi bien dans le cadre déterministe que dans le cas stochastique (tableau 2-1).

Problèmes	Contexte Déterministe	Contexte Stochastique
Flow-Shop Hybride	X	X
Job-Shop	X	
SFP	X	
HSP	X	X
VRP	X	
Multi-Objective CARP	X	X (travail préliminaire)
CARP	X	X
TSP	X	

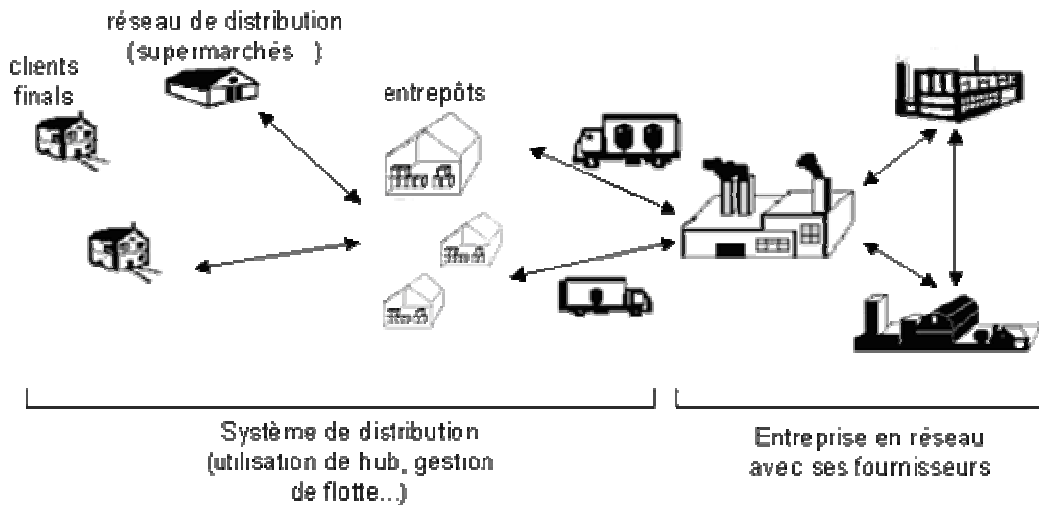
**Tableau 2-1. Contexte d'étude des différents problèmes**

Parallèlement à ces activités de recherche, nous nous sommes investi dans les activités pédagogiques. Ces préoccupations se sont exprimées à travers la réalisation d'un livre sur les graphes en rapport avec les cours assurés à l'IUT de Montluçon [LAC, 03b]

## 2.1 Problématique générale

Actuellement les entreprises constituent de plus en plus des réseaux, chaque réseau incluant une entreprise et l'ensemble de ses fournisseurs. L'activité de production est coordonnée avec la partie distribution où un sous-traitant achemine les produits jusqu'aux magasins ou bien directement jusqu'aux consommateurs. Cette activité de distribution utilise des réseaux de

distribution complexes utilisant des entrepôts (hubs en anglais). Cette chaîne constituée de l'usine (avec ses fournisseurs) et d'un réseau de distribution est la **chaîne logistique** (figure 2-2).



**Figure 2-2. Exemple de chaîne logistique**

Cette chaîne logistique pose des problèmes tant en phase de conception qu'en phase d'exploitation et ceci au niveau de toutes ses parties (approvisionnement, production et distribution). En phase de conception on peut citer les problèmes de dimensionnement, d'agencement, de choix des politiques de gestion [PRO, 92]. En phase d'exploitation, il s'agit de planifier et d'ordonnancer les différentes opérations à l'intérieur du système (ordonnancement de pièces, des mouvements de robots, de transporteurs).

Ces problèmes ne sont pas nouveaux mais ils prennent une importance de plus en plus grande à cause de l'internationalisation des échanges et de la concurrence acharnée qui règne dans la plupart des secteurs économiques.

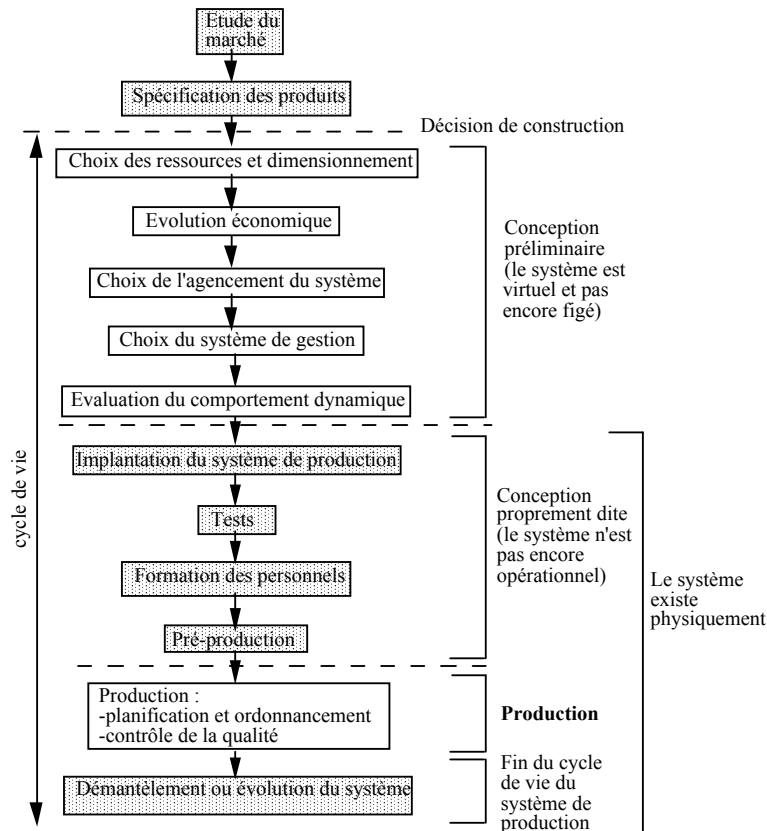


Figure 2-3. Cycle de vie d'un système [PRO, 92]

A chaque étape du cycle de vie (figure 2-3) correspond un ensemble de problèmes [DOL, 00] :

- le choix des ressources, qui doit permettre de déterminer les machines et les équipements nécessaires pour atteindre la capacité de production voulue et ceci à coût minimal ;
- le dimensionnement, qui comprend l'équilibrage de la(les) ligne(s), le choix des équipements et le dimensionnement des stocks tampon ;
- l'évaluation économique, qui permet de valider les choix techniques d'un point de vue financier ;
- l'agencement du système, qui concerne la disposition des ressources sur la surface de production pour permettre de minimiser les coûts de fonctionnement et de simplifier la gestion du système ;
- le choix du système de gestion de production qui traditionnellement comprend les niveaux de planification, d'ordonnancement et de conduite ;
- l'évaluation du comportement dynamique, qui est l'étude de l'ensemble du système de production face à des aléas (variations des temps de fabrication, prise en compte des demandes exceptionnelles, absentéisme, apparitions de retards de livraisons, pannes...).

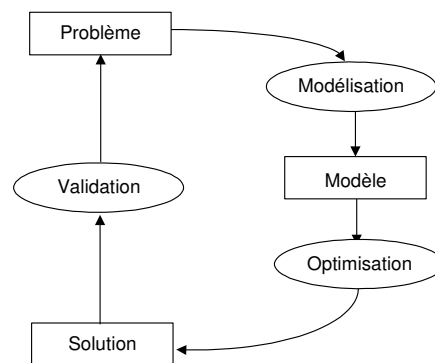
Les résultats de cette étape permettent de savoir s'il est possible de passer à l'étape de conception détaillée.

En phase de production, les problématiques sont liées à des objectifs d'amélioration de la productivité ou de réorganisation de la production. Il s'agit de problèmes d'ordonnement et de planification. Il est évident que les choix faits pendant la phase de conception conditionnent fortement les solutions que l'on peut apporter aux problèmes d'ordonnement et de planification. L'agencement des machines, les moyens de transport choisis... ont une influence importante sur les solutions envisageables. L'idéal est donc de résoudre, conjointement, les problèmes de conception du système ainsi que les problèmes d'ordonnement et de planification.

### 2.1.1 Démarche de modélisation/optimisation pour l'aide à la décision

La conception et la réalisation d'outils d'aide à la décision consistent à proposer un outil adapté à la résolution et passe par une démarche composée de trois étapes (figure 2-4) :

- la modélisation du problème ;
- la conception d'algorithmes d'optimisation ;
- la validation des solutions obtenues.



**Figure 2-4. Démarche globale de modélisation / optimisation**

La *modélisation* consiste à représenter le problème initial sous une forme simplifiée en ne prenant en compte que les éléments pertinents par rapport aux objectifs de l'étude. Le modèle ainsi obtenu peut être un modèle mathématique, un modèle de graphe ou un modèle de simulation, selon les objectifs à atteindre et les hypothèses qu'il est possible de faire dans l'étude du système.

La *partie optimisation* consiste à concevoir des méthodes capables de fournir une ou plusieurs solutions avec un indicateur de performance des solutions proposées. Il peut s'agir du temps total de production ou d'un taux d'utilisation de une ou plusieurs ressources de production.

La *partie validation* doit permettre de vérifier que les solutions obtenues sont bien des solutions acceptables du problème de départ. La(les) solution(s) a(ont) été calculée(s) à l'aide

d'un modèle qui est une simplification du problème, soit parce que certaines caractéristiques du problème n'ont pas pu être formalisées, soit parce que ces caractéristiques n'ont pas semblé pertinentes pour l'étude. Cette validation doit se faire, soit en collaboration avec les experts industriels (s'ils sont à l'origine du problème), soit à l'aide de modèles moins restrictifs que ceux utilisés pour pouvoir optimiser le système. Si un modèle mathématique a été utilisé pour l'optimisation, il est probable qu'il n'a pu être réalisé que sous des hypothèses simplificatrices importantes ou nombreuses. Il est possible d'utiliser un modèle de simulation à événements discrets qui va considérablement limiter les hypothèses simplificatrices et permettre ainsi de valider la faisabilité des solutions obtenues par le modèle mathématique.

### 2.1.2 Notre contribution

Nos travaux de recherche concernent les problèmes d'ordonnancement et de planification des moyens de manutention dans les systèmes, ce qui inclut à la fois un travail de modélisation pour représenter le système sous une forme exploitable et un travail de conception d'outils de recherche opérationnelle pour obtenir des solutions acceptables. Ces travaux peuvent être regroupés en :

- travaux portant sur les problèmes de tournées, ce qui modélise les problèmes de logistique de distribution/collecte ;
- travaux portant sur l'ordonnancement et la planification d'ateliers à ressources de transport.

Les méthodes et outils de modélisation que nous utilisons comprennent :

- des méthodes de spécification (réseau de Petri, modèle objet...);
- des méthodes de modélisation (simulation, graphes...).

En ce qui concerne les méthodes d'optimisation, notre spectre est large mais essentiellement centré sur les méthodes itératives :

- méthodes stochastiques mono-objectif (recuit simulé, descente stochastique...);
- méthode de type branch and bound ;
- méthode stochastique multi-objectifs (algorithme de type NSGA-II).

Dans un grand nombre de cas, nous nous sommes intéressés à la proposition de schéma d'optimisation dans le cas déterministe mais aussi dans le cas stochastique (détermination de solutions robustes).

Pour plusieurs problèmes que nous avons traités, nous sommes allés jusqu'à la proposition d'outils d'aide à la décision ou de systèmes de pilotage basés sur un schéma d'optimisation.

## 2.2 Démarche scientifique

### 2.2.1 Réaliser plusieurs modèles du même problème

Un de nos objectifs est de promouvoir l'utilisation conjointe de méthodes exactes et approchées dans l'étude des problèmes abordés. Notons que la plupart des problèmes concernent la minimisation d'une fonction coût et que la présentation est orientée sur des problèmes de minimisation mais que cela n'est pas limitatif. Pour un même problème, proposer une solution exacte et une autre approchée, fournit de nombreux avantages :

- la possibilité d'évaluer les méthodes approchées par rapport aux solutions exactes. Cette comparaison n'est pas facile car les méthodes exactes sont généralement limitées à la résolution d'instances de taille limitée ;
- de disposer d'une borne inférieure dans le cas (très répandu !) où la réalisation d'un modèle mathématique est trop complexe ou alors dans le cas où la résolution du modèle est trop longue en temps de calcul. En relaxant certaines contraintes de fonctionnement du système, c'est-à-dire en ajoutant des hypothèses simplificatrices lors de la réalisation du modèle mathématique, on obtient des bornes inférieures. Ces bornes fournissent un bon moyen d'évaluer la performance des méthodes approchées (figure 2-5).

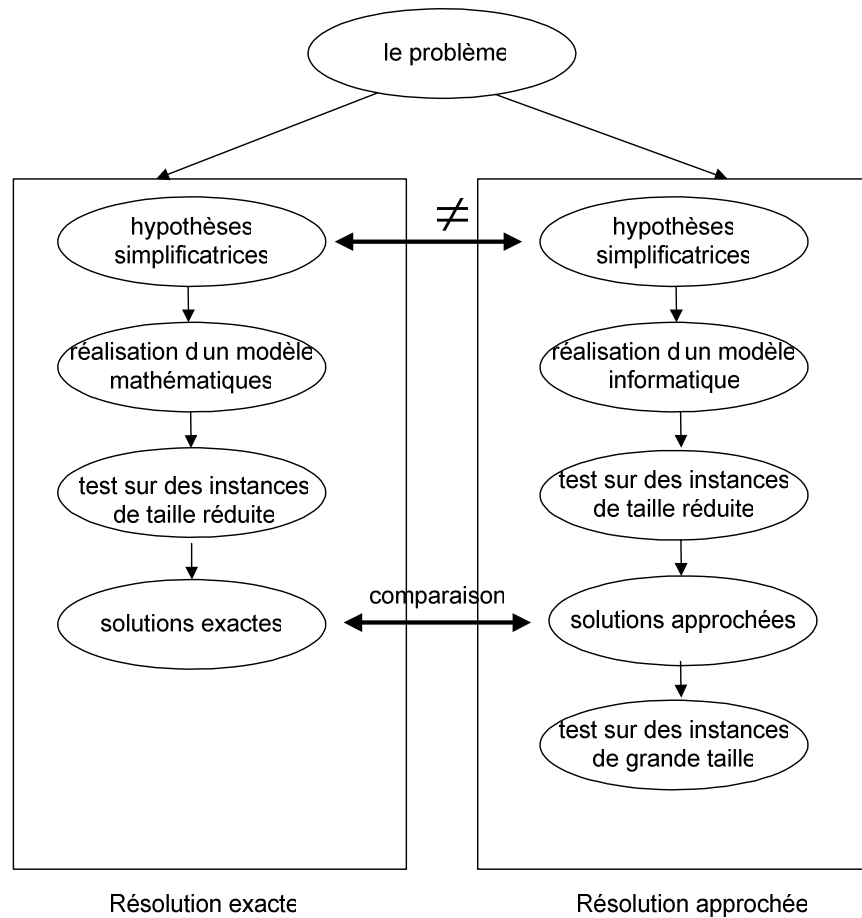


Figure 2-5. Réalisation de deux modèles du même problème

### 2.2.2 Décomposer le problème

La décomposition du problème nous a conduit à introduire le Triple Couplage (figure 2-6) durant notre thèse et à approfondir ensuite cette proposition. Ce Triple Couplage fait apparaître la nécessité d'avoir (selon les cas) un module d'optimisation, un module d'évaluation et un troisième module contenant les règles de fonctionnement du système. Il a été utilisé dans un contexte déterministe [FLE, 97] et étendu au contexte stochastique [FLE, 99a] [FLE, 99b].

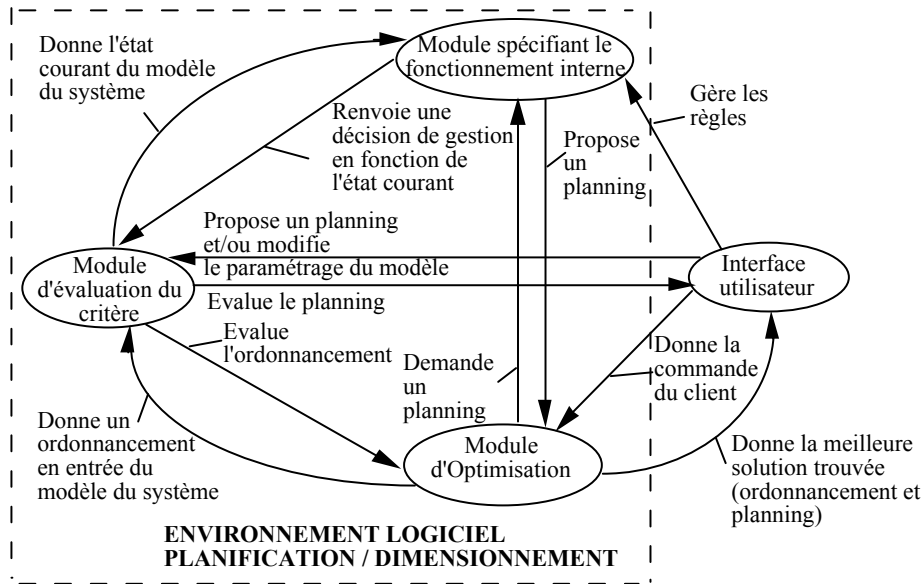


Figure 2-6. Le Triple Couplage [FLE, 97] [FLE, 99a]

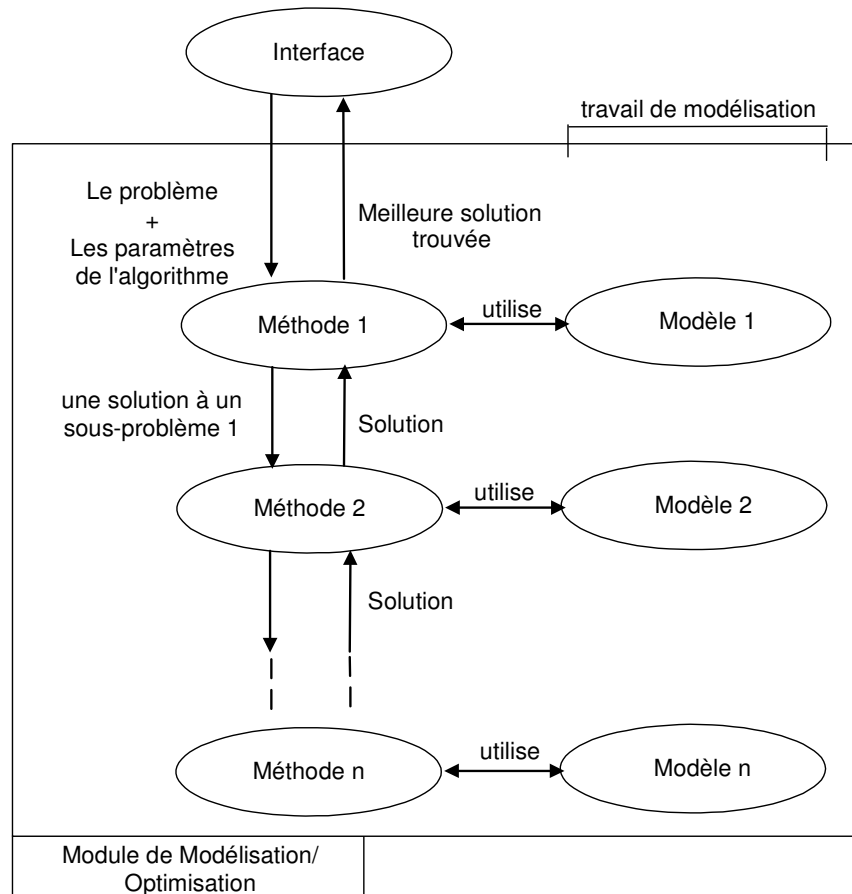
Cette vision a évolué et nous proposons de "voir" le modèle d'optimisation comme une suite de méthodes d'optimisation, chacune de celles-ci échangeant avec les autres une partie de la solution en cours de construction. Chaque méthode propose une solution à un sous-problème et peut utiliser des méthodes exactes ou approchées selon la taille du sous-problème à traiter (figure 2-7).

Chaque méthode peut s'appuyer sur une représentation qui lui est propre : un graphe, un modèle de simulation... Sur la figure 2-7 les flèches à double sens représentent l'utilisation par les méthodes 1, 2, ..n d'une structure de données générée :

- soit une fois pour toutes au démarrage ;
- soit en fonction des solutions obtenues lors de la résolution d'un sous-problème.

La partie droite fait apparaître la modélisation (à chaque étape correspond un modèle). La partie gauche montre la suite des méthodes de recherche opérationnelle qui, en exploitant les modèles correspondants, vont conduire à la construction des solutions.





**Figure 2-7. Principe de décomposition**

Nous nous proposons d'illustrer notre proposition sur :

- des problèmes de tournées sur arcs ;
- des ateliers de traitement de surfaces (HSP) ;
- des systèmes flexibles de production (SFP) ;
- le job-shop avec time-lags.

### **Pour les problèmes de tournées sur arcs [LAC, 01a][LAC, 04b]**

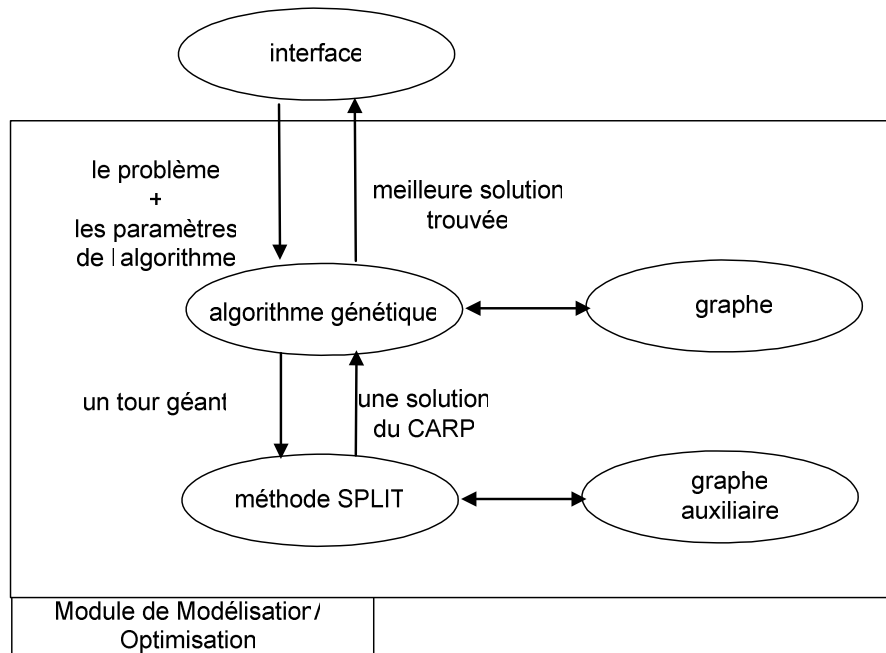
Il s'agit de construire un ensemble de tournées de coût minimal et visitant chaque arc d'un graphe. Il faut prendre en compte, pendant la construction de la solution, la capacité limitée des véhicules qui, en chaque arc du graphe, collecte des marchandises. Ce problème relève du CARP (Capacitated Arc Routing Problem).

Lors de l'étude du CARP, la démarche de résolution présentée sur la figure 2-7 a été appliquée. Le problème a été décomposé en deux sous-problèmes (figure 2-8) :

- la construction d'un tour unique (géant) passant sur chaque arc du graphe ;

- la décomposition de ce tour en plusieurs sous-tours en fonction de la capacité des véhicules.

Les deux méthodes utilisées s'appuient sur un graphe qui modélise de manière simple le réseau routier. Le tour géant est construit à l'aide de ce graphe et ceci sans prendre en compte la capacité des véhicules. La méthode de découpage (nommée SPLIT) utilise ensuite un graphe auxiliaire pour les calculs et pour constituer des sous-tours en fonction de la capacité des véhicules. Elle utilise le fait que tous les véhicules sont de même capacité (flotte homogène).



**Figure 2-8. Schéma d'optimisation mis en place pour la résolution du CARP**

Ce schéma d'optimisation a été adapté au VRP avec flotte hétérogène dans le cadre du travail d'Eric Soutera [SOU, 05] [LAC, 05b]. Cette étude a abouti à la définition d'une nouvelle procédure de découpage qui étend la procédure SPLIT au cas hétérogène.

### **Pour la gestion des flux internes dans le HSP [FLE, 96][FLE, 01]**

Le HSP (Hoist Scheduling Problem) concerne la gestion des mouvements d'un robot qui déplace des produits d'une machine à l'autre. Chaque produit possède une gamme qui définit la liste des machines sur lesquelles il doit être traité, ainsi que les temps minimaux et maximaux de séjour. Comme les temps de transport en charge et à vide du robot sont loin d'être négligeables, le robot ne peut pas être considéré comme toujours disponible. Le but de l'étude consiste :

- à déterminer un ordre d'entrée des pièces dans l'atelier (avec leur date d'entrée) ;
- la liste des mouvements du robot (avec leur date).

Il est évident que la solution recherchée doit respecter tous les temps de séjour des produits sur les machines. Si ce n'est pas le cas, la solution est non admissible.

Le schéma d'optimisation retenu (figure 2-9) est basé sur :

- un algorithme stochastique pour déterminer un ordre d'entrée des pièces dans le système ;
- une règle de gestion du robot de type règle de priorité.

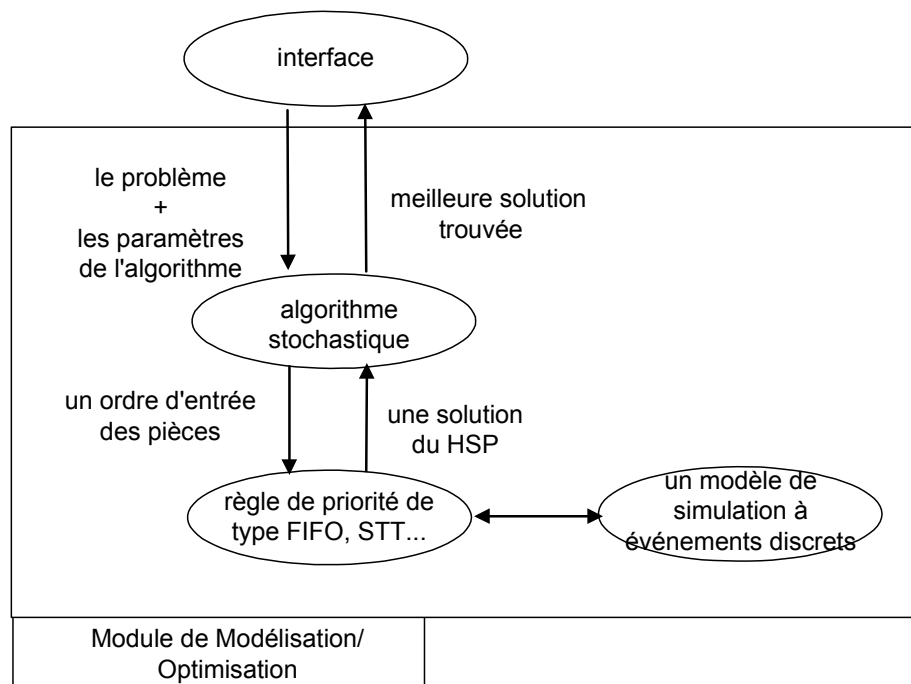


Figure 2-9. Schéma d'optimisation mis en place pour la résolution du HSP

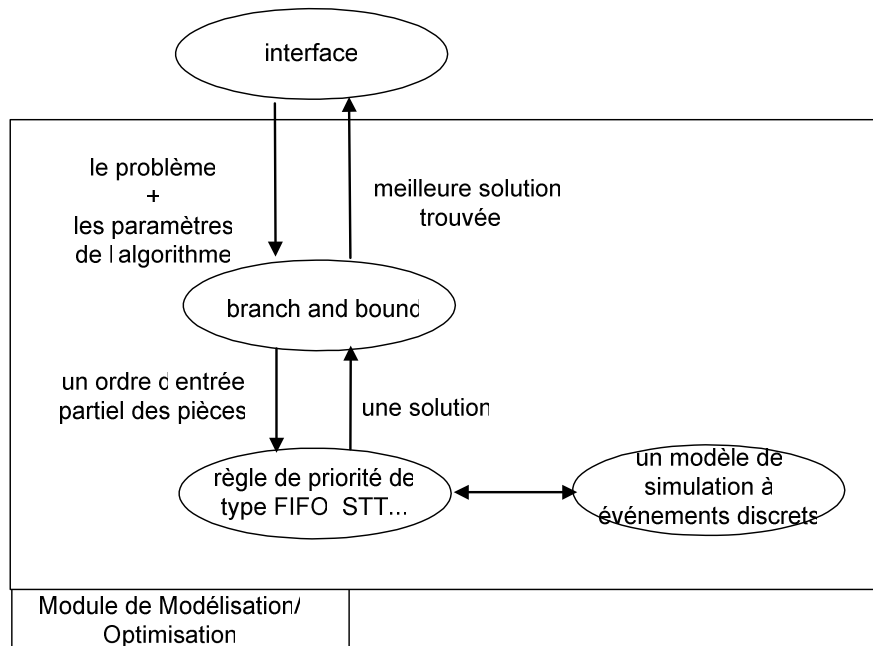
### **Pour la gestion des flux internes dans les Systèmes Flexibles de Production [LAC, 05a] [ESP, 01] [GOU, 00] [ESP, 00]**

Les Systèmes Flexibles de Production (SFP ou bien FMS pour Flexible Manufacturing System en Anglais) sont des ateliers de type job-shop avec transport dans lesquels il s'agit :

- de déterminer un ordre d'entrée des pièces dans le système;
- de gérer les mouvements du chariot.

Deux approches ont été proposées. La première consiste à utiliser un algorithme itératif (de type algorithme stochastique) qui génère un ordre d'entrée des pièces et un modèle de simulation à événement discrets pour évaluer cet ordre en gérant le robot avec une règle de priorité. La deuxième consiste à utiliser un algorithme de type "branch and bound" qui génère

des ordres "partiels" des pièces en entrée (figure 2-10). Un ordre partiel est un ordre d'entrée ne comportant pas la totalité des pièces mais seulement une partie. Pour chaque ordre "partiel", un modèle de simulation à événements discrets permet de l'évaluer. Cela signifie qu'il faut gérer les mouvements du robot dans le système. Cette gestion est effectuée de manière heuristique par une règle de priorité comme FIFO ou STT.



**Figure 2-10. Schéma d'optimisation Branch and Bound/Simulation mis en place pour la résolution dans les SFP**

En complément de ces deux approches (la première dédiée aux instances de grande taille et la seconde aux instances de taille moyenne), une modélisation linéaire a été proposée [BEC, 03].

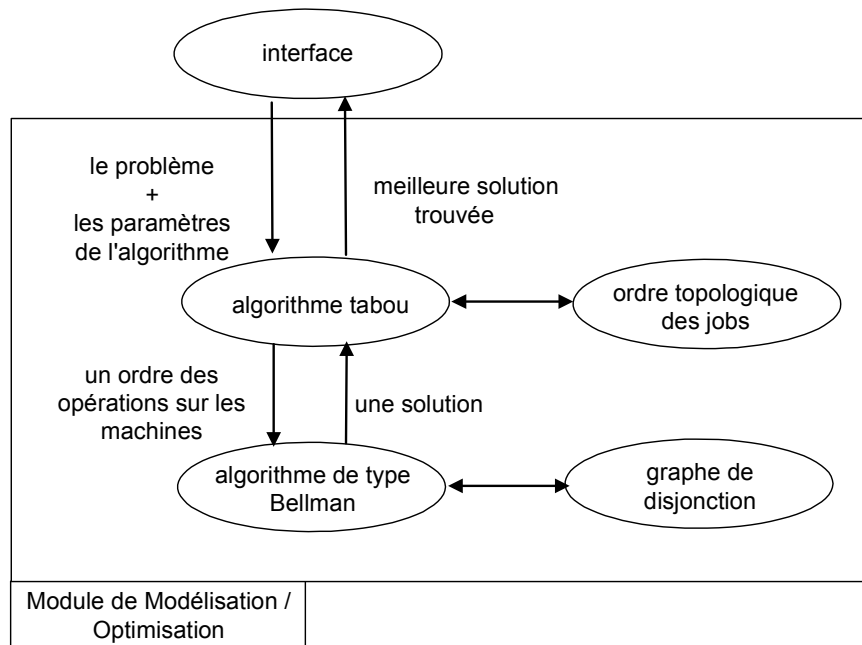
### **Pour la gestion des flux internes dans les ateliers de type job-shop avec time-lags [CAU, 04] [CAU, 05c]**

L'objectif est de déterminer une "bonne" solution au problème d'ordonnancement dans un job-shop avec contraintes d'écart minimaux et maximaux entre opérations. Le terme time-lags est le plus répandu mais on trouve différentes dénominations qui désignent toutes un temps minimal et maximal de séjour d'une pièce sur une machine. Le problème se décompose en deux sous-problèmes :

- la détermination de l'ordre de réalisation des opérations sur les machines ;
- la détermination des dates de début et de fin des opérations.

Le schéma retenu (figure 2-11) utilise un ordre topologique proposé par un algorithme génétique (cet ordre donne implicitement l'ordre de passage sur les machines). Un graphe représentant le problème est alors construit : il s'agit d'un graphe de disjonction. Il sert de

support à un algorithme de plus court chemin (de type Bellman) qui détermine les dates de début et de fin des opérations. L'admissibilité des solutions est une difficulté importante à cause des time-lags qui peuvent (alors que l'ordre de passage des jobs sur les machines ne provoque aucun cycle) créer des chemins de longueur positive dans le graphe.



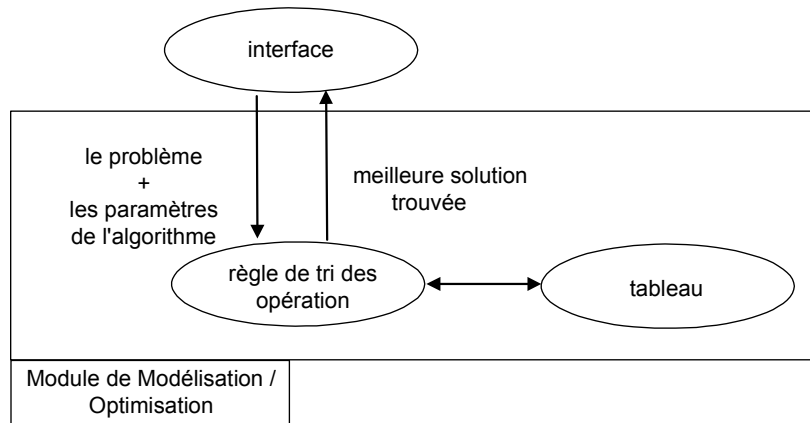
**Figure 2-11. Schéma d'optimisation mis en place pour la résolution du job-shop avec time-lags**

Ce travail sur le job-shop avec time-lags est le point de départ d'une étude qui devrait permettre l'étude du job-shop avec transport et contraintes additionnelles. Sa résolution aurait alors pour base une modélisation sous la forme d'un graphe disjonctif.

### **Conclusion sur notre schéma de décomposition**

Quelle que soit la méthode utilisée et ceci quel que soit le niveau de décomposition, il existe toujours une structure de données sur laquelle travaille la méthode. Même une méthode par liste utilise une structure de données support, tout comme les méthodes basées sur des règles de priorité pour ordonnancer des tâches (figure 2-12).

Lorsque cette structure de données est simple, on ne la fait pas figurer sur le schéma. Par exemple, sur la figure 2-10 aucune mention n'indique que le branch-and-bound travaille avec un tableau pour représenter les ordres d'entrée possibles des pièces.



**Figure 2-12. Une méthode d'ordonnancement par liste**

### 2.2.3 Prendre en compte les différents contextes

L'expérience montre que la plupart des systèmes à étudier et des problèmes à résoudre sont, par nature, soumis à des aléas qui sont :

- soit internes, et dans ce cas il s'agit de pannes, de variations de temps de transport ou d'usinage ;
- soit externes (liés à l'environnement), et il s'agit alors d'une demande à satisfaire qui est imparfaitement connue par exemple, ou d'aléas dans les flux (pannes, retards).

La création d'un modèle déterministe est souvent effectuée sans expliciter clairement qu'il s'agit déjà d'une hypothèse simplificatrice importante. Les différents modèles qu'on peut réaliser du système et de son environnement sont présentés dans la figure 2-13.

	modèle déterministe de l'environnement	modèle stochastique de l'environnement
modèle déterministe du système	MeDMsD	MeSMsD
modèle stochastique du système	MeDMsS	MeSMsS

MeD : Environnement Déterministe      MsD : Système Déterministe  
MeS : Environnement Stochastique      MsS : Système Stochastique

**Figure 2-13. Différents cas possibles pour les modèles du système et de son environnement**

De manière implicite, la fonction objectif qu'on cherche généralement à minimiser, change selon les types de modèles réalisés. Ainsi dans un contexte déterministe, on minimisera le makespan, la somme des retards, la somme pondérée des retards... Dans un contexte stochastique, la recherche de telles solutions n'a ni sens, ni intérêt, puisque toute nouvelle évaluation de la fonction objectif aboutit à une nouvelle valeur de la fonction. La fonction

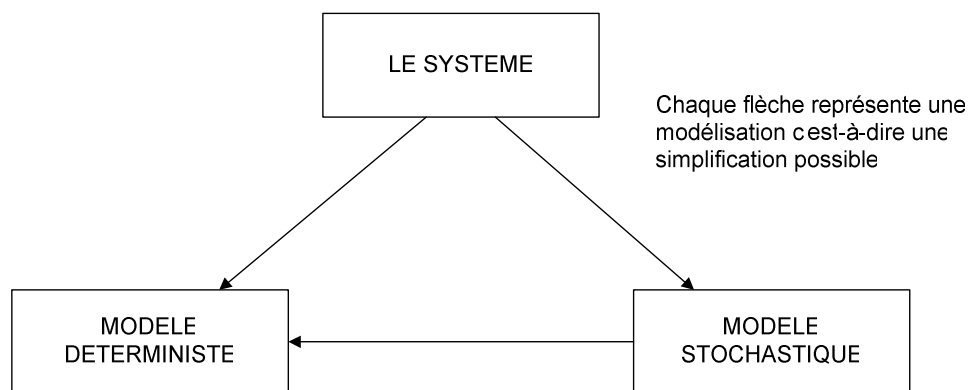
objectif se comporte comme une variable aléatoire et ses valeurs peuvent être considérées comme celles d'une variable aléatoire. Les critères généralement retenus sont alors liés soit à l'obtention de solutions robustes soit à des solutions flexibles.

Dans le cadre du projet FRO (animé par Eric Sanlaville) qui est l'un des projets de l'action spécifique inter GDR Recherche Opérationnelle, la distinction entre les termes flexibilité et robustesse est définie très précisément.

Déterminer des solutions robustes signifie déterminer des solutions ayant des propriétés "intéressantes" par rapport à un ensemble d'aléas. Une solution peut être qualifiée de robuste si, soumise à des aléas, elle ne présente qu'une variation très faible du critère retenu pour l'étude. Il s'agit de limiter la dégradation de performance entraînée par les aléas. Cela implique nécessairement de modéliser les aléas.

Déterminer des solutions flexibles signifie déterminer des solutions qui pourront 'facilement' être modifiées lors de l'occurrence des aléas. Une solution est alors qualifiée de flexible si elle peut être modifiée en minimisant les conséquences sur sa qualité.

La plupart des travaux proposés concernent la détermination de solutions robustes dans le cadre d'un modèle stochastique du système et d'un modèle déterministe de son environnement (MeDMsD). Il est possible de transformer un modèle stochastique en modèle déterministe, à condition par exemple de savoir exprimer sous forme mathématique la fonction à minimiser (figure 2-14).

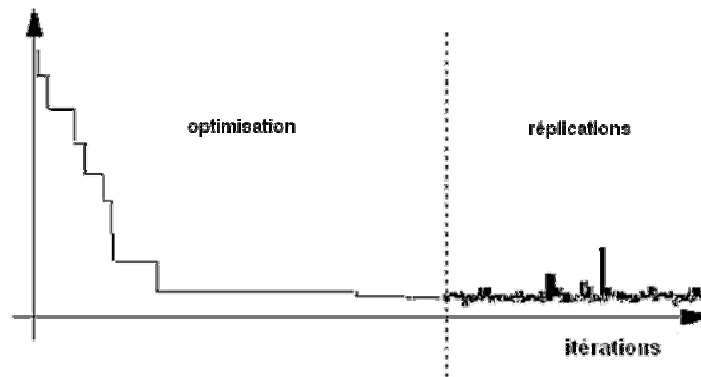


**Figure 2-14. Les différents modèles du système**

Cette transformation, d'un modèle stochastique en modèle déterministe, a été utilisée pour l'étude des ateliers de traitement de surfaces et pour l'étude des tournées sur arcs. L'avantage

de revenir au modèle déterministe est de permettre l'utilisation des algorithmes classiques d'optimisation tels que, par exemple, les algorithmes génétiques et le recuit simulé. Les algorithmes d'optimisation capables de travailler sur des modèles stochastiques sont peu nombreux. On peut citer l'algorithme ASOVA de G. Fleury [FLE, 93] ou la programmation linéaire stochastique [ROC, 02].

Dans tous les cas, la phase d'optimisation est suivie d'une phase de réplication dont l'objectif est de réaliser une étude statistique de la solution (ou des solutions) identifiée(s) comme robuste(s) (figure 2-15).



**Figure 2-15. Les deux étapes de l'optimisation dans un contexte stochastique**

Nous avons essayé de promouvoir cette approche et nous détaillons, dans les sections qui suivent, deux exemples de mise en œuvre

#### **2.2.4 Comparer et évaluer des solutions**

Quelles que soient les méthodes et dans quelque contexte que ce soit, la mise en œuvre suppose que les solutions soient comparables et qu'on puisse définir un ordre parmi toutes les solutions possibles. Deux approches sont possibles :

- la création d'un ordre hiérarchique strict par l'intermédiaire de fonctions de pénalités ;
- l'utilisation d'un schéma d'optimisation multi-objectifs.

L'optimisation basée sur une fonction hiérarchique stricte est un cas particulier du cas de l'optimisation multi-objectifs. Une approche de type fonction hiérarchique stricte pour le HSP et une autre de type multi-objectifs pour les tournées sur arcs, ont été proposées dans [FLE, 01] [LAC, 03c]. Souvent il y a un intérêt important à utiliser une fonction hiérarchique pour la gestion des contraintes qu'il est difficile de prendre en compte ou bien pour obtenir une exploration plus facile de l'espace des solutions. La définition d'un ordre hiérarchique strict, par l'intermédiaire de fonctions de pénalités, dérive des approches de base en multi-objectifs [SRI, 94]. En optimisation multi-objectifs, il est possible de combiner plusieurs



fonctions objectifs  $f_i$  dans une unique fonction  $Z$  en faisant intervenir des coefficients représentant les poids accordés à chacune des fonctions ( $Z = \sum_{i=1}^N w_i \cdot f_i(x)$ ) avec généralement  $\sum_{i=1}^N w_i = 1$ .

En levant l'hypothèse (restrictive ?) liée à la somme  $\sum_{i=1}^N w_i = 1$ , il est possible de hiérarchiser des critères. Il suffit pour cela de choisir les  $w_i$  de telle sorte que :

$$\text{Min}(w_i \cdot f_i) > \text{Max}(w_{i+1} \cdot f_{i+1})$$

La recherche d'un ordre d'entrée des pièces dans un système flexible de production est un exemple d'utilisation d'une telle approche. Dans de tels systèmes, il existe un grand nombre d'ordres d'entrée des pièces qui provoquent des blocages du système si la gestion du chariot se fait (comme c'est souvent le cas dans les ateliers industriels) de manière heuristique. On qualifie généralement cet ordre d'irréalisable et pas abus de langage on parle de solutions irréalisables. Il est alors "naturel" de définir comme fonction objectif une fonction composée de deux "sous" fonctions :  $f_1$  représentant le nombre de pièces non encore traitées par le système au moment où un blocage se produit et  $f_2$  la date d'occurrence de ce blocage. L'utilisation de la fonction  $f_2$  peut paraître discutable mais elle permet d'ordonner deux solutions (deux ordres d'entrée des pièces) ayant le même nombre de pièces non encore traitées au moment du blocage du système.

Dans le cadre d'une utilisation avec des méthodes de voisinage, de telles expressions de la fonction objectif modifient l'accessibilité dans l'espace de recherche, donnant plus de liberté dans les transitions acceptées. Ceci a été mis en évidence par les travaux réalisés sur le job-shop avec time-lags. En effet, deux approches ont été proposées : une approche basée sur un algorithme tabou et une approche basée sur un algorithme génétique [CAU, 04] [CAU, 05c]. La capacité donnée à l'algorithme génétique d'explorer l'espace des solutions réalisables et irréalisables en attribuant un coût aux solutions irréalisables (par l'intermédiaire d'une fonction hiérarchique) favorise l'exploration de l'espace de recherche.

Dans les chapitres qui suivent, nous montrons comment ces différentes étapes de la démarche ont été mises en œuvre dans le cas des problèmes de transport et dans les ateliers à ressources de transport limitantes :

- le chapitre 3 concerne les problèmes de tournées ;
- le chapitre 4 concerne les ateliers à ressources de transport ;
- le chapitre 5 présente les problèmes de l'optimisation stochastique ;

- le chapitre 6 concerne le développement de systèmes d'aide à la décision.

Au cours de la présentation, nous utilisons le mot ordonnancement comme une traduction du mot Anglais Schedule que l'on prend dans le sens défini par P. Brucker [BRU, 01]. Dans le cadre des tournées de véhicules nous utilisons le terme planification puisque généralement les études sont réalisées sur des horizons plus grands. Dans le paragraphe qui concerne les Systèmes Flexibles de Production par exemple, le mot ordonnancement désigne l'ordre d'entrée des pièces.

### 3 Les problèmes de tournées

Les travaux réalisés portent essentiellement sur un problème théorique : le CARP (Capacitated Arc Routing Problem). Ce problème concerne la gestion d'une flotte homogène de véhicules utilisés pour le transport de marchandises (collecte ou livraison) suivant des demandes réparties sur les arcs d'un réseau. Un autre problème de tournées, le VRP (Vehicle Routing Problem) est en cours d'étude dans les cas homogène et hétérogène.

#### 3.1 La problématique

Sous le terme "problème de tournées", on regroupe les problèmes de logistique de distribution/collecte [LAC, 01b]. Ceci inclut notamment, la gestion de flottes (homogènes ou non) de véhicules de transport qui servent à satisfaire des demandes réparties soit le long de rues ou de routes (arcs) soit en des lieux précis (nœuds), situés sur un réseau (graphe).

Les problèmes apparaissent durant la phase de conception et concernent aussi la phase d'exploitation.

Durant la phase de conception, ils comprennent :

- les problèmes de districting c'est-à-dire les problèmes de décomposition de graphes en sous-graphes, avec comme objectif de faciliter la résolution des problèmes de collecte/distribution ;
- les problèmes de hub location, c'est-à-dire les problèmes de localisation de hubs ;
- les problèmes de dimensionnement de la flotte de véhicules ;
- les problèmes de dimensionnement des véhicules ;

Durant la phase d'exploitation, on peut distinguer :

- les problèmes de constitution des tournées ;
- les problèmes de remplissage (lié au problème du sac à dos).

Les problèmes des tournées sur nœuds sont différents de ceux concernant les tournées sur arcs même si certains peuvent être transformés d'un type à l'autre.

Les travaux réalisés portent essentiellement sur les problèmes de tournées sur arcs. Cependant un travail prometteur pour les tournées sur nœuds (VRP) a commencé dans les cas homogène et hétérogène.

## 3.2 Problèmes de tournées sur nœuds et sur arcs

La plupart des problèmes de transport de type collecte ou distribution se modélisent par des tournées sur nœuds ou bien sur arcs. Dans les problèmes de tournées sur nœuds, des véhicules, basés à un dépôt, doivent livrer des clients situés sur les nœuds d'un réseau (graphe). Les objectifs sont souvent la minimisation de la distance parcourue, de la durée de travail, ou du nombre de véhicules nécessaires. Ces problèmes sur nœuds sont assez bien étudiés, car ils sont apparus très tôt en distribution (livraison de fioul par exemple).

Le problème sur nœuds le plus simple est le calcul d'une tournée de longueur minimale visitant chaque client. C'est le fameux TSP (Traveling Salesman Problem ou problème de voyageur de commerce), qui est déjà très difficile à résoudre : pour 50 nœuds, le nombre de parcours possibles est de l'ordre de  $10^{64}$ . Trouver par énumération la meilleure tournée nécessiterait des milliards d'années pour un ordinateur actuel. Le VRP (Vehicle Routing Problem) est une extension réaliste du TSP où la demande totale exige plusieurs tournées. Ce problème est encore plus combinatoire puisqu'il faut partitionner les clients en tournées et définir leur ordre dans chaque tournée.

Dans beaucoup d'applications, les tâches consistent à visiter non pas des nœuds mais des arcs, comme par exemple déneiger une rue ou relever des compteurs. On parle alors de tournées sur arcs. L'équivalent du VRP, quand on traite des arcs par des véhicules de capacité limitée, est appelé CARP (Capacitated Arc Routing Problem). Il existe des extensions où des tournées doivent visiter à la fois des nœuds et des arcs (problèmes mixtes), comme dans la collecte des déchets où il faut traiter à la fois des rues et des points de collecte sélective. Le CARP et ses extensions avec nœuds et arcs sont encore peu étudiés, bien qu'ils modélisent des situations très répandues.

## 3.3 Cadre des problèmes de tournées sur arcs

### 3.3.1 Exemples d'application

Les problèmes réels, qui se modélisent comme un CARP (Capacitated Arc Routing Problem), sont nombreux. Ils apparaissent évidemment dans les problèmes de transport, mais aussi dans d'autres situations comme en témoigne la liste suivante. Des formes mixtes entre tournées sur arcs et sur nœuds, ou bien entre applications urbaines et rurales sont évidemment possibles :

- problèmes urbains (arcs = rues) :
  - Collecte de déchets ménagers
  - Nettoyage de la voirie (trottoirs, caniveaux)
  - Relevés de compteurs (eau, gaz, électricité)
  - Tournées postales

- problèmes ruraux (arcs = routes) :
  - Collecte du lait
  - Déneigement, salage ou sablage en hiver
  - Elagage et fauchage de bas-côtés, curage de fossés
  - Réfection et marquage des chaussées (lignes blanches)
- autres problèmes (réseaux non routiers) :
  - Désherbage de voies ferrées
  - Inspection de réseaux (lignes électriques, canalisations)
  - Découpe de matériaux le long de tracés prédéfinis
  - Dispositifs d'impression graphique (impression laser, traceurs)

L'exemple de la collecte des déchets ménagers est l'exemple d'application des problèmes de tournées sur arc le plus utilisé dans la littérature. Son importance vient aussi du fait que derrière ce problème simple de collecte, se cache toute une problématique liée à la chaîne complète de retraitement des déchets (figure 3-1).

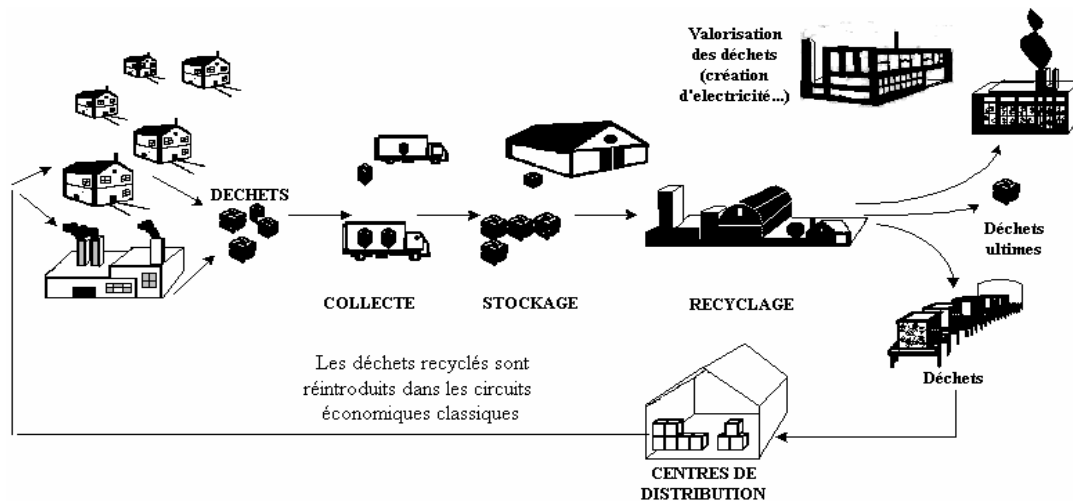


Figure 3-1. Chaîne logistique pour la collecte de déchets

### 3.3.2 Les travaux concernant les problèmes de tournées sur arcs

Les problèmes de tournées sur arcs sont apparus dans les années 1970, avec le problème du "postier chinois" où il faut visiter toutes les rues d'un réseau en parcourant une distance minimale. A part ce cas qui dispose d'algorithmes efficaces, la moindre extension entraîne des problèmes combinatoires très difficiles (NP-complets). C'est par exemple le cas du problème

du postier rural, où seul un sous-ensemble de rues doit être traité, et évidemment le cas général à plusieurs tournées appelé CARP (Capacitated Arc Routing Problem, déjà mentionné).

Les premiers travaux ont fourni des heuristiques assez simples, construisant une seule solution, et des bornes inférieures basées sur des modèles de graphes ([PEA, 91], [PEA, 89], [PEA, 88], [GOL, 83], [DEA, 81] et [GOL, 81]). L'écart maximal par rapport à l'optimum a été établi pour certaines heuristiques [FRE, 78]. Les rares méthodes optimales [HIR, 92], qui sont des recherches arborescentes, sont pour l'instant décevantes : à partir de 30 arcs, on connaît des exemples où l'optimum n'est pas connu. La recherche de ces dernières années s'engage donc dans deux directions principales pour trouver des méthodes plus puissantes : les méthodes de programmation linéaire et les métaheuristiques.

Les techniques de programmation linéaire exploitent la structure de divers modèles sous forme de programmes linéaires en nombres entiers. Elles bénéficient des progrès rapides des solveurs commerciaux de programmation mathématique comme Cplex ou Xpress. Nos partenaires de Valence utilisent surtout ce genre de méthodes. Ils ont pu établir ainsi des propriétés de l'espace des solutions et des bornes inférieures pouvant être utilisées dans d'autres techniques de résolution ([BEN, 92], [BEL, 03] et [BEL, 98]). Ils ont d'ailleurs réussi à adapter certains de ces résultats au problème classique de tournées sur nœuds (VRP), ce qui est une étape pour espérer résoudre des extensions combinant nœuds et arcs [AUG, 98] [BEL, 00].

Les métaheuristiques sont des techniques d'amélioration progressive d'une première solution. Elles incluent le recuit simulé, les méthodes taboues, et les algorithmes génétiques. Elles permettent de traiter des problèmes de grande taille, tout en obtenant des solutions excellentes, souvent optimales. Eglese [EGL, 94] et Li [LI, 92] ont été les premiers à utiliser le recuit simulé dans une étude sur le sablage des routes. Des méthodes taboues, plus puissantes, ont été conçues récemment par Hertz *et al.* [HER, 99] [HER, 00] et par Corberàn *et al.* [COR, 00]. Toutes ces méthodes viennent d'être surpassées par des algorithmes génétiques hybrides puissants développés par [LAC, 01a] qui donnent des solutions à moins de 2% de l'optimum et qui sont souvent optimales pour des problèmes jusqu'à 200 arcs.

Les applications réussies concernent pour l'instant le déneigement des routes [EGL, 94] [CAM, 99] et la collecte des ordures ménagères (voir par exemple Candida Mourão *et al.* pour Lisbonne [CAN, 00], et Tung et Pinnoi pour Hanoi [TUN, 00]). Ulusoy a été le premier en 1985 à traiter une complication, le cas d'une flotte de véhicules différents. Benavent et Soler en 1999 [BEN, 98] et Lacomme *et al.* en 2001 [LAC, 01a] ont abordé récemment des problèmes urbains avec des sens uniques, des interdictions de tourner et des retards quand on tourne à gauche aux carrefours avec feu. Snizek *et al.* en 2001 [SNI, 01] ont étudié, pour la ville de Philadelphie, le cas dans lequel chaque véhicule ne peut traiter que certaines rues ou quartiers (pour des raisons de gabarit par exemple).

### 3.3.3 Les modèles théoriques

La figure 3-2 donne une représentation des différents problèmes de tournées sur arc. Un état de l'art est proposé dans [RAM, 02].

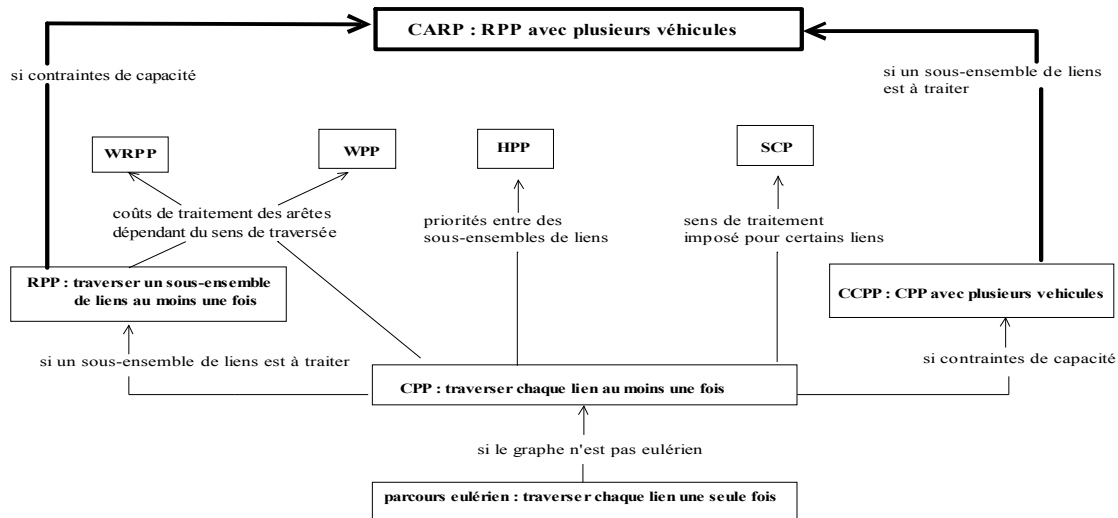


Figure 3-2. Les problèmes de tournées sur arcs ([RAM, 02])

### 3.3.4 Les extensions du CARP pour des solutions plus réalistes

#### Premier niveau d'extension par rapport au CARP de base

Une première étape vers des problèmes plus réalistes consiste à gérer des réseaux combinant sens uniques et rues à double sens, des interdictions de tourner, des pénalités pour tourner à certains carrefours (le cas le plus simple étant le demi-tour), et des dépôts de véhicules distincts des lieux de chargement initial/déchargement final (décharges, usines d'incinération, stocks de sel, etc.). Ce niveau est en cours d'investigation à Troyes et Valence.

#### Problèmes d'autonomie

Une tournée peut être limitée en durée par la législation du travail et, en distance, par la réserve en carburant du véhicule. Un autre cas connu à Paris consiste à utiliser des camions expérimentaux silencieux et non polluants, à moteur électrique. La capacité limitée des accumulateurs impose une autonomie bien plus faible qu'avec un moteur thermique. Ces questions d'autonomie, ignorées dans les modèles actuels, doivent être prises en compte pour obtenir des tournées réalisables en pratique.

## **Flottes hétérogènes de véhicules et dimensionnement des flottes**

Beaucoup d'articles supposent, pour simplifier, que les véhicules sont identiques. En pratique, il y a souvent plusieurs types de véhicules, conduisant à des problèmes multicritères combinant des coûts d'utilisation des véhicules ainsi que la minimisation du nombre de véhicules utilisés. Des gabarits différents peuvent aussi interdire ou imposer l'usage de certains véhicules dans certains secteurs (problèmes à dépendances sites/véhicules étudiés par Sniezek *et al.*). Une flotte hétérogène peut poser des problèmes au niveau opérationnel (comment utiliser au mieux un parc de véhicules existant ?) comme au niveau stratégique (comment panacher la flotte au moment de l'achat, pour un certain usage à long terme ?).

## **Multitours**

Les multitours (tournées enchaînées par un même véhicule) sont fréquents à cause du nombre limité de véhicules. Ils offrent une grande flexibilité mais rendent les problèmes encore plus combinatoires. La gestion des multitours devient complexe avec une flotte hétérogène car il faut choisir quels véhicules réemployer. Un multitour est limité par la capacité du véhicule et aussi par des questions d'autonomie.

## **Les tournées périodiques**

Ces problèmes sont fréquents dans le cas où la demande se reconstitue progressivement. Dans le cadre de la collecte des déchets ménagers, la quantité à collecter augmente chaque jour, et finalement la quantité à collecter sur une rue dépend en grande partie, du temps qui s'est écoulé par rapport au précédent passage du véhicule. Des travaux ont été ainsi publiés pour des VRP périodiques (rechargement de distributeurs automatiques de boissons ou de citernes de propane pour des serres). Pour éviter les ruptures de stocks, il faut déterminer les fréquences de visite et les jours exacts de visite de chaque site. Ce problème est complexe, car le nombre limité de véhicules ou la nécessité d'une activité régulière, impose de traiter chaque jour une partie du réseau. Ceci conduit à une planification des tournées (souvent cyclique) sur un horizon de plusieurs jours ou semaines.

Le CARP périodique est peu traité dans la littérature. Les applications sont pourtant bien réelles : inspection périodique de lignes à haute tension, campagnes de fauchage des bas-côtés en campagne, fréquences de ramassage des ordures ménagères en ville. Pour les ordures ménagères et le fauchage, l'optimisation semble très difficile : si l'on néglige le traitement d'un arc, sa durée de traitement augmente avec la demande qui s'accumule et cette durée est souvent non proportionnelle.

## **Collecte sélective (separate collection)**

En collecte des déchets, il s'agit de ramasser différents types de déchets (verre, papier, etc.) qui ne sont pas mélangés dans un même sac d'une même poubelle. Des problèmes très intéressants surgissent quand les différents déchets sont collectés dans des bacs qui ne peuvent



pas être vidés (et donc mélangés) dans le même compartiment d'un véhicule. Il faut alors choisir entre des tournées collectant chacune un seul type de déchet ou bien des tournées ramassant tous les types grâce à des camions à compartiments. Bien que toutes ces solutions soient techniquement possibles, aucune analyse économique n'a été publiée pour déterminer la meilleure stratégie. Plus généralement, ce genre de décision se pose dans tous les problèmes de tournées où il faut choisir entre des tournées à un seul produit et d'autres avec des véhicules transportant plusieurs produits.

### **Combinaison entre tournées et ordonnancement du recyclage ou de l'incinération**

Cette complication a été observée à Nantes : la capacité de l'usine d'incinération et la revente de l'électricité obtenue à EDF à des tarifs dépendant de l'heure, obligent à synchroniser les tournées de collecte pour avoir un apport progressif et régulier de déchets dans le temps.

Des problèmes similaires sont rencontrés dans la collecte du lait et du courrier : il faut à chaque fois, respecter les contraintes (dates ou capacités) des installations destinataires.

### **Localisation des installations**

La localisation des installations (base des véhicules, décharges, usines d'incinération, centres de tri, dépôts de carburants, stocks de sable) est cruciale pour avoir ensuite de bonnes tournées. Il est clair qu'on gagne à revoir cette localisation de temps en temps dans les agglomérations en forte croissance. Les décharges et autres installations techniques font l'objet de contraintes particulières : elles doivent souvent être assez éloignées des zones les plus peuplées, mais sans trop d'incidence sur les durées et les coûts de transport.

### **Robustesse des solutions**

La recherche considère trop souvent des situations où tout est déterministe, avec des demandes certaines. Quelques travaux récents sur le VRP commencent à traiter des cas aléatoires, par exemple remplir des citernes de propane dans les exploitations agricoles sans connaître exactement la quantité restante de gaz dans la cuve (Stochastic Inventory Routing).

Ces méthodes ne sont pas toujours facilement transposables aux tournées sur arcs. Par exemple, dans le cas de la collecte des déchets, les jours de passage sont annoncés à l'avance aux usagers et ne peuvent pas être modifiés ; ainsi même en cas de production anormale de déchets dans certaines rues, on ne peut pas reporter au lendemain, tout ou partie du ramassage, sans perturber celui des autres rues.

La détermination de solutions robustes passe, à notre avis, par une bonne analyse de la demande et de ses variations dans le temps et suppose l'existence, pour les aléas, d'une

certaine stationnarité. Nous avons déjà esquissé des techniques permettant de construire des solutions robustes a priori, grâce à un algorithme génétique explorant l'espace des solutions avec un objectif multicritère (coût + robustesse).

Le problème des variations saisonnières de la demande ainsi que des phénomènes de tendance ne sont pas des problèmes "intéressants" en soit car il s'agit de phénomènes faciles à anticiper et qui, en pratique, ne posent pas de difficulté pour être appréhendés. Par exemple, pour la collecte des déchets ménagers, les lendemains de fêtes font l'objet de tournées spéciales.

### Modélisation sous forme de graphe

Le dénominateur commun de ces problèmes pratiques est une modélisation naturelle sous forme d'un graphe décrivant le réseau sur lequel les tâches sont réparties et dans lequel des véhicules évoluent. Ce graphe peut être très complexe si l'on veut prendre en compte des contraintes réelles (par exemple des sens uniques, des interdictions de tourner), des secteurs (à traiter en bloc), des contraintes de précédence, des fenêtres horaires, etc. Les problèmes réels de ce type peuvent être de très grande taille : à titre d'exemple, la collecte des ordures ménagères dans la communauté de Valenciennes correspond à un réseau de 9000 arcs, concédée par appel d'offre à un seul opérateur (source : SITA, filiale Environnement de la Lyonnaise des Eaux).

## 3.4 Travaux réalisés

Nous présentons dans cette partie nos travaux sur les problèmes de tournées

Notre intérêt pour les problèmes de tournées a démarré en 1998 par l'étude du problème du TSP symétrique et asymétrique et s'est poursuivi ensuite par l'étude des problèmes de tournées sur arcs (figure 3-3).

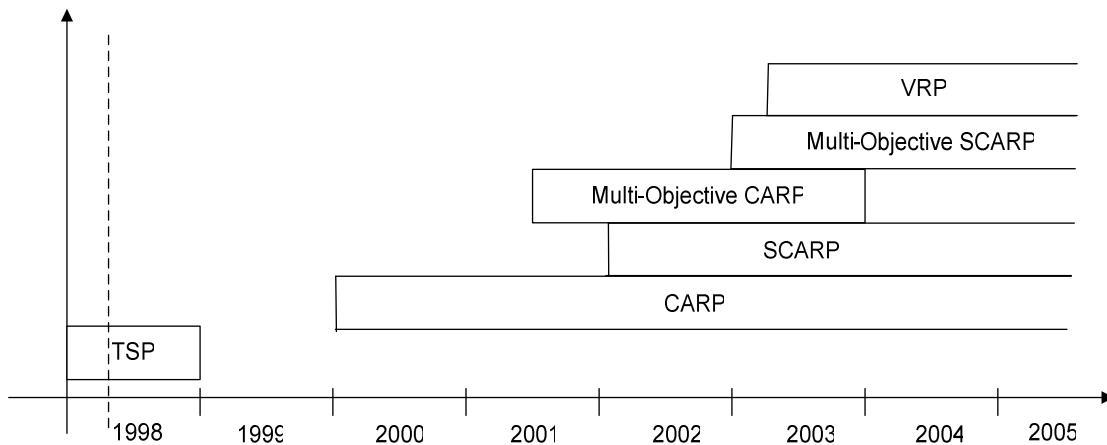


Figure 3-3. Les études réalisées sur les problèmes de tournées (détails de la figure 2-1).

Les travaux ont été réalisés sous les hypothèses suivantes :

- la présence d'un seul secteur de collecte, d'une flotte homogène et l'absence de multi-tours ;
- un seul dépôt. En collecte de déchets, ce cas est rare. En général (à Troyes par exemple), il existe un dépôt par secteur de collecte ;
- les coûts fixes liés à l'utilisation des véhicules ne sont pas pris en compte ;
- les fenêtres de temps ne sont pas prises en compte.

### 3.4.1 Proposition pour le CARP de "base"

Ce CARP dit "de base" ne permet pas de gérer des contraintes réelles comme par exemple une flotte hétérogène de véhicules, un réseau routier complexe (des interdictions de tourner par exemple). Il permet de traiter seulement un réseau de rues à double sens, à collecter en "tricot", et avec minimisation de la distance parcourue. Dans le jargon du métier, la collecte en "tricot" désigne le passage d'un véhicule dans une rue avec une collecte bilatérale des déchets ménagers.

Tous les travaux réalisés sont fondés sur :

- un graphe modélisant la topologie du problème ;
- un algorithme itératif pour la génération de tours géants représentant des solutions sans prendre en compte la contrainte liée à la capacité des camions ;
- un algorithme optimal de découpage nommé SPLIT (permettant de transformer un tour géant en un ensemble de tours respectant la capacité des véhicules) basé sur un graphe auxiliaire.

La modélisation du réseau routier est réalisée sous la forme d'un graphe complètement orienté dans lequel une rue est remplacée par deux arcs "liés" pour représenter les deux sens possibles d'une traversée. Le principe est illustré sur la figure 3-4.

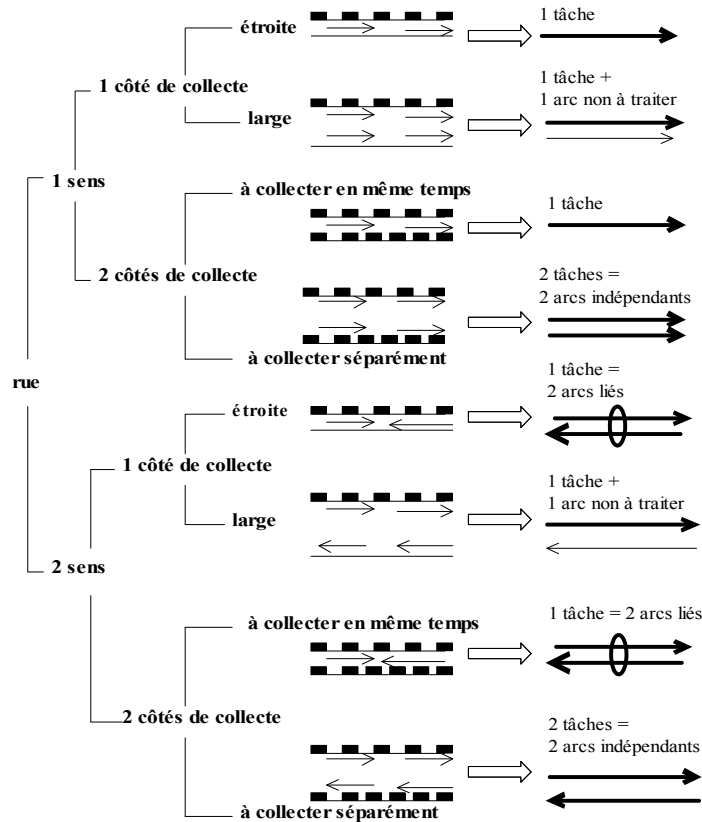


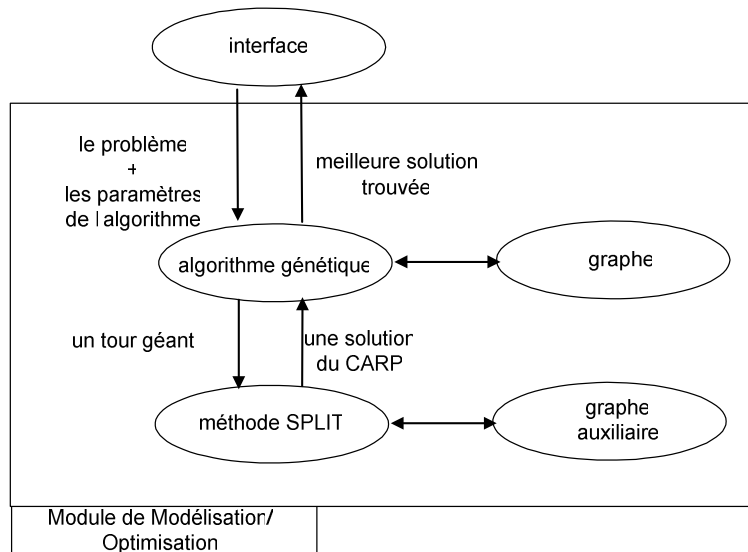
Figure 3-4. Modélisation d'un graphe routier [RAM, 02]

A partir de ce graphe, il est possible de réaliser un distancier arc à arc par la simple application d'un algorithme de plus court chemin de type Dijkstra ou Bellman. Il est remarquable que seule la longueur du chemin est intéressante. La constitution exacte du chemin le plus court n'est utile que pour certaines heuristiques ou bien pour restituer la solution finale. Le graphe simplifié est un graphe comportant uniquement les arcs à collecter : chaque chemin entre deux arcs est représenté par un arc de coût correspondant à la longueur du chemin le plus court.

A partir de ce modèle il est possible de construire plusieurs schémas d'optimisation dont l'un utilise un algorithme génétique.

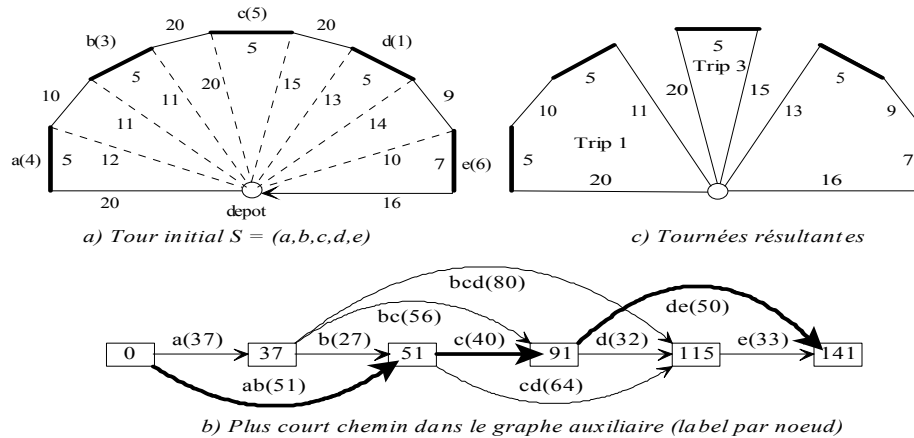
**Proposition d'un schéma d'optimisation de type Algorithme Génétique**

Le schéma d'optimisation retenu est représenté sur la figure 3-5. Nous employons le terme algorithme génétique par abus de langage et comme une abréviation de "algorithme de type algorithme génétique".



**Figure 3-5. Principe de résolution du CARP**

A partir du graphe modélisant le réseau routier, l'algorithme génétique construit des tours géants représentés comme une suite ordonnée de numéros d'arc (chromosome dans la terminologie des algorithmes génétiques). L'algorithme SPLIT réalise un découpage optimal pour obtenir les tournées respectant la capacité des camions. Ce découpage est réalisé par un algorithme de plus court chemin sur un graphe auxiliaire de calcul représentant tous les découpages possibles. Le graphe auxiliaire est généré à partir du tour géant "proposé" par l'algorithme génétique. Le principe de cette approche originale est donné sur la figure 3-6.



**Figure 3-6. Modélisation du problème de découpage sous la forme d'un graphe et obtention du découpage optimal [RAM, 02]**

Les résultats obtenus avec ce schéma d'optimisation [LAC, 01a] dépassent ceux proposés par la méthode taboue (CARPET) de Hertz [HER, 00].

#### Exemples de résultats obtenus

Cette partie de notre recherche a donné lieu à la publication d'un article à la conférence EURO-GP 2001 nommé meilleur article pour EVOSTIM [LAC, 01a] (Second European Workshop on Scheduling and Timetabling). Cet article synthétise l'approche basée sur un algorithme génétique et décrit le schéma d'optimisation. Cette méthode est actuellement (à notre connaissance) la plus performante publiée pour le CARP. Elle a été testée sur les instances de DeArmon [DEA, 81], Belenguer and Benavent [BEL, 03] et les instances de Eglese [EGL, 94]. La figure 3-7 donne les résultats d'exécution de l'approche proposée par rapport à la méthode CARPET qui est restée pendant de nombreuses années la méthode de référence dans le domaine. Sur le tableau de la figure 3-7, MA est l'abréviation de "Memetic Algorithm" et désigne l'algorithme génétique proposé.

En moyenne sur les 23 instances de DeArmon, l'algorithme génétique fournit des résultats à 0.15% de la borne inférieure contre 0.48% pour la méthode CARPET. De manière similaire, on trouve un écart moyen de 0.61% (contre 1.90% pour la méthode CARPET) sur les instances de Benavent et 2.47% sur les instances d'Eglese (contre 4.74% pour la méthode CARPET).

	23 problèmes		34 problèmes		24 problèmes	
	DeArmon		Benavent		Eglese	
	Carpet	MA	Carpet	MA	Carpet	MA
Ecart en % par rapport à la borne inférieure	0,48	0,15	1,90	0,61	4,74	2,47
Pire écart en % par rapport à la borne inférieure	4,62	1,78	8,57	4,26	8,61	4,46
Nombre de solutions optimales trouvées	18	21	15	22	0	0
Nombre de fois où la meilleure solution connue est atteinte	19	22	17	32	0	19
Temps d'exécution moyen en secondes	9,02	5,29	63,87	38,35	/	526,99

**Figure 3-7. Exemples de résultats obtenus [LAC, 04b]**

### **Les problèmes de tournées sur arcs : le CARP de base résolu par un algorithme de fourmis**

Des étudiants, en stage de deuxième année ISIMA, ont été associés aux recherches sur le CARP. Ainsi, Rachid Driouch et Nicolass Kuchciak, ont travaillé sur l'application des algorithmes de type colonies de fourmis aux tournées sur arcs.

Suite à leur travail, il a été mis au point un algorithme performant qui donne de meilleurs résultats que l'algorithme tabou (CARPET) de Hertz. Toutefois, pour les instances de grande taille, il ne parvient pas à concurrencer l'algorithme génétique et il nécessite un temps de calcul supérieur [LAC, 03a] [LAC, 04a].

#### **3.4.2 Proposition pour le CARP Stochastique (SCARP)**

Le CARP permet de modéliser par exemple les problèmes de collecte de déchets ménagers, problèmes pour lesquels les quantités à collecter varient et ne sont en réalité connues que sous la forme de quantités moyennes à collecter.

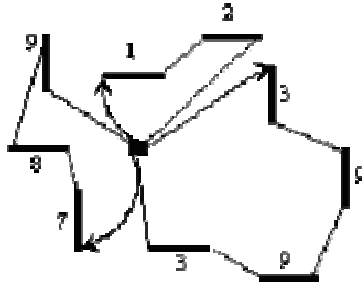
Utiliser des valeurs moyennes à collecter est la suite logique des travaux précédents car il semble évident que, d'un point de vue pratique, les compagnies de ramassage des déchets ménagers :

- ne disposent que de données moyennes ;
- sont très intéressées par des solutions robustes permettant aux chauffeurs d'effectuer régulièrement les mêmes tournées.

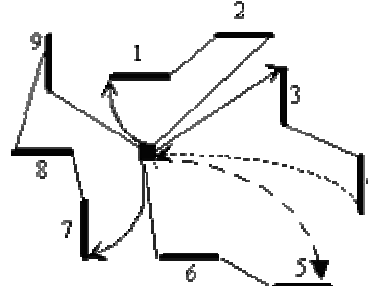
L'importance de ce deuxième point a été confirmée par une société spécialisée dans la collecte des déchets ménagers : cette société a constaté un gain de temps appréciable lorsque les chauffeurs exécutent régulièrement les mêmes tournées.

Il est possible de montrer que les solutions obtenues en résolvant le CARP Déterministe sont

sensibles aux variations des quantités à collecter [FLE, 02a] [FLE, 02b]. Cela signifie que de petites variations des quantités à collecter entraînent des allers/retours supplémentaires au dépôt (figure 3-8 et figure 3-9). Nos travaux s'inscrivent dans la continuité de ceux déjà réalisés sur le Vehicle Routing Problem (VRP) [BER, 96] [LAP, 02] [RAY, 96].

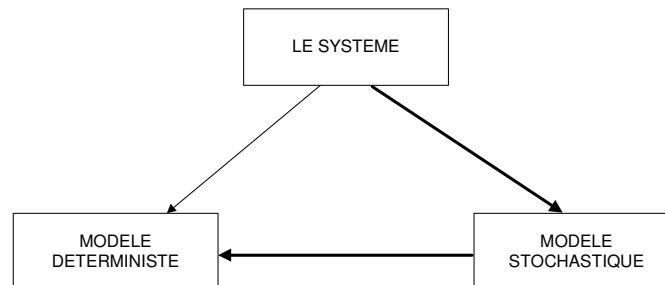


**Figure 3-8. Exemple de solution avec 3 tournées**



**Figure 3-9. Un exemple de solution avec un aller/retour supplémentaire au dépôt**

Afin d'éviter toute ambiguïté, on peut nommer DCARP le problème déterministe (les quantités à collecter sont connues) et SCARP le problème stochastique (les quantités varient). Après avoir mesuré la robustesse des solutions, il est possible de résoudre le DCARP en autorisant le remplissage des véhicules à 90%, on peut ainsi obtenir très simplement des solutions ayant certaines propriétés de robustesse. En fait, on crée ainsi un modèle déterministe [FLE, 05a] qui est une simplification du problème stochastique de départ (figure 3-10).



**Figure 3-10. Schéma de simplification retenu**

La valeur de 90% offre, comme il est possible de le montrer, un compromis intéressant. Afin de bien distinguer les deux approches, nommons "*slack approach*" la résolution du DCARP et "*tight approach*" la résolution du DCARP en limitant le remplissage des véhicules.

Nommons :

$S_1$  : solution obtenue avec la "*slack approach*"

$S_2$  : solution obtenue avec la "*tight approach*"

$h(S)$  : le coût d'une solution  $S$



- $\nabla_h(S1, S2)$  : pourcentage d'augmentation du coût de la solution  
 $\nabla_t(S1, S2)$  : pourcentage de tournées supplémentaires dans la solution  
 $\nabla_H(S1, S2, n)$  : pourcentage d'augmentation du coût moyen de la solution, calculé avec  $n$  réplifications  
 $\nabla_H(S1, S2, n)$  : pourcentage d'augmentation du nombre moyen de tournées, calculé avec  $n$  réplifications  
 $p(S, n)$  : pourcentage des solutions ayant des tournées supplémentaires calculé avec  $n$  réplifications de  $S$ .  
 $PI_H(S1, S2, n)$  : pourcentage d'amélioration de la solution avec  $n$  réplifications

Le tableau 3-1 met en évidence les points suivants :

- Le coût de la solution augmente peu malgré la baisse de la capacité des camions (8.87% de hausse en moyenne pour les instances de Eglese, 4.43% pour les instances de DeArmon et finalement 3.29% pour les instances de Belenguer et Benavent).
- Le nombre de tournées supplémentaires augmente, selon les instances, de 12.03% à 19.91%.

L'analyse statistique des solutions à travers  $n$  réplifications fait apparaître que :

- Le coût de la solution évalué par  $n$  réplifications est meilleur avec la "tight approach" (la capacité des véhicules est réduite à 90% de leur capacité nominale) de 2% à 11% en moyenne selon les instances. Une remarque similaire peut être faite sur le nombre moyen de tournées dans les solutions.
- La probabilité d'allers/retours imprévus au dépôt est réduite de manière très importante. Il passe de 97% à 12% pour les instances d'Eglese, de 53% à 0.6% pour les instances de Belenguer et Benavent et de 70% à 1.0% pour les instances de DeArmon. La dernière colonne  $PI_H(S1, S2, n)$  donne le pourcentage d'amélioration obtenu.

<b>Moyenne</b>	$\nabla_h(S1, S2)$	$\nabla_t(S1, S2)$	$\nabla_H(S1, S2, n)$	$\nabla_T(S1, S2, n)$	$p(S1, n)$	$p(S2, n)$	$PI_H(S1, S2, n)$
eglese	8.87%	12.03%	-11.09%	-14.04%	96.8%	12.9%	86.92%
val	3.29%	19.91%	-1.99%	2.64%	53.0%	0.6%	96.33%
gdb	4.43%	16.16%	-3.20%	-4.65%	70.0%	1.0%	98.58%

**Tableau 3-1. Performance des deux approches**

L'étude réalisée montre que les "bonnes" solutions du CARP sont sensibles aux fluctuations des quantités à collecter et qu'il est possible d'obtenir des solutions plus robustes en limitant le remplissage des camions à 90% de leur capacité nominale [FLE, 05a].

### 3.4.3 Deuxième proposition pour le CARP stochastique (SCARP)

Cette deuxième étude est basée sur une transformation plus précise du problème stochastique en problème déterministe : on remplace les  $Q_i$  du problème stochastique par la loi des  $Q_i$  (tableau 3-2). Il s'agit en fait de moyenniser la demande en considérant que sur chaque rue un grand nombre de poubelles sont à ramasser et que la loi normale permet de modéliser efficacement la quantité à collecter sur chaque rue.

---

#### SCARP : recherche d'une solution $S$ telle que

- Les quantités à collecter  $Q_i$  sont des variables aléatoires
- La capacité  $Q$  des véhicules est connue et déterministe
- La fonction  $f(Q_i, Q, S)$  qui représente le coût d'une solution dépend de la réalisation des variables aléatoires  $Q_i$

DCARP	Commentaire
Résolution du DCARP ( <i>slack approach</i> )	$q_i = \overline{Q}_i$ , $Q$ inchangé et fonction objectif $f(q_i, Q, S)$
Résolution du DCARP ( <i>tight approach</i> )	$q_i = \overline{Q}_i$ , $Q$ devient $Q' < Q$ , et la fonction objectif $f(q_i, Q', S)$
Résolution du DCARP ( <i>law approach</i> )	$q_i = \overline{Q}_i$ , $Q$ inchangé, et la fonction objectif devient $g(\mathcal{L}(Q_i), Q, S)$ où $\mathcal{L}(Q_i)$ est la loi des $Q_i$ .

**Tableau 3-2. Les approches de résolution du SCARP [FLE, 05b]**

Une analyse mathématique complète a permis d'exprimer mathématiquement le coût moyen d'une solution, l'écart type du coût, le nombre moyen de tournées, l'écart type sur le nombre de tournées... et de proposer un grand nombre de fonctions objectifs permettant de "contrôler" le type de robustesse souhaitée pour les solutions. Sans être exhaustif, on peut citer les fonctions objectifs suivantes :

- Minimiser  $\overline{H(S)} + k\overline{T(S)}$  le coût moyen +  $k$  fois le nombre moyen de tournées où  $k$  est un paramètre à préciser.
- Minimiser  $h$  le coût "déterministe" d'une solution sous l'hypothèse que la probabilité d'un aller/retour supplémentaire au dépôt pour la tournée  $j$  soit inférieure à une limite fixée à l'avance ( $p_j \leq \varepsilon$ ).

Un critère de robustesse intéressant est le rapport :  $\frac{\overline{H(S, n)} - h(S)}{h(S)}$ . En effet, une valeur

proche de 0 est caractéristique d'une solution pour laquelle le coût moyen estimé avec  $n$  réplifications est très proche du coût déterministe. En minimisant  $\overline{H(S)} + 10\sigma(S)$ , en moyenne

sur les instances de DeArmon ce ratio est égal à 0, puis 0,02% pour les instances de Belenguer et Benavent et enfin de 0.15% pour les instances de Eglese (tableau 3-3). Notons que la valeur 10 utilisée dans la fonction objectif permet de contrôler l'importance relative accordée aux deux critères que sont ici le coût moyen et l'écart type du coût.

	Gdb	Eglese	Val
Comparaison avec la " <i>tight approach</i> "			
$\frac{h(S2) - h(S)}{h(S)}$	5,51%	23,44%	4,15%
$\frac{\overline{H(S2,n)} - h(S)}{h(S)}$	5,51%	23,61%	4,18%
$\frac{\overline{H(S2,n)} - \overline{H(S,n)}}{\overline{H(S,n)}}$	-2,29%	-0,23%	-1,33%
Critères de robustesse			
$\frac{\overline{H(S2,n)} - h(S2)}{h(S2)}$	0,00%	0,15%	0,02%
$p(S2,n)$	0,46%	17,66%	2,25%
$\sigma_H(S2,n)$	0,21	64,12	0,72
$\sigma_T(S2,n)$	0,03	0,26	0,06
$\frac{\sigma_H(S2,n)}{\overline{H(S2,n)}}$	<b>0,08%</b>	<b>0,48%</b>	<b>0,19%</b>

**Tableau 3-3. Exemples de résultats obtenus [FLE, 05b]**

L'approche présentée fait intervenir directement l'objectif de la minimisation et fournit des résultats de très bonne qualité. Comme le montrent les expérimentations numériques, il est possible de déterminer des solutions robustes aux problèmes de tournées sur arcs.

#### 3.4.4 Proposition pour le CARP de base bi-objectifs

Une étude a été réalisée et mise en œuvre sur les algorithmes multi-objectifs. Un algorithme de type NSGA-II a été proposé pour le CARP [LAC, 03c]. Les résultats prouvent qu'il est possible d'obtenir des solutions de très bonne qualité qui sont concurrentielles (sur le critère de la distance parcourue) avec celles calculées par l'algorithme génétique dédié au CARP. La poursuite naturelle de ces travaux consiste à étendre ce schéma au CARP stochastique, en fusionnant les travaux réalisés sur le SCARP et ceux réalisés à partir de l'algorithme multi-objectifs.

### 3.4.5 Difficultés de résolution des problèmes de tournées dans le cas hétérogène

Le cas hétérogène soulève en réalité deux questions :

- Peut-on être certain (si le nombre de véhicules de chaque type est limité) qu'il existe une solution ?
- Si on ne peut pas apporter de réponse satisfaisante à une demande, avec la composition de la flotte initialement fixée, quelle solution doit-on rechercher ?

D'un point de vue pratique, les données du problème changeant régulièrement (nouveaux clients, quantités à collecter fluctuantes...), la flotte de camions d'une entreprise peut à tout moment s'avérer insuffisante pour répondre à la demande. Dans ce cas, il s'agit de déterminer la solution qui minimise le nombre de clients non traités par la flotte de véhicules ou bien la quantité des marchandises non collectées ou non distribuées. En effet, l'appel à la sous-traitance est généralement le seul recours lorsque de telles situations se produisent ce qui engendre des surcoûts importants pour l'entreprise.

La difficulté de résolution est liée aux deux points précédents mais aussi au problème d'affectation d'une tournée à un véhicule ou à un type de véhicules dû au caractère hétérogène de la flotte.

L'approche basée sur la construction de tours géants découpés optimalement ayant fait ses preuves sur le CARP (cas homogène), des propositions préliminaires mais intéressantes pour le cas hétérogène sont présentées dans [LAC, 05b]. Elles sont basées sur deux considérations :

- une fonction objectif hiérarchique strict (cf. section 2.2.4) peut formaliser efficacement l'objectif à atteindre en minimisant le nombre de clients (arcs ou nœuds) non servis en premier et puis ensuite la longueur totale du tour ;
- une extension heuristique de la procédure SPLIT reste possible même si certains tours géants ne peuvent pas être découpés à cause du caractère heuristique du découpage.

Le deuxième point est très important car il fait apparaître soit qu'un tour géant est non "découpable" à cause de contraintes liées au problème (il n'existe pas de découpage) soit qu'un tour géant peut ne pas être "découpable" à cause du caractère heuristique du découpage. En incluant cette nouvelle procédure SPLIT (notée SPLIT\_H dans [LAC, 05b]) dans un schéma d'optimisation de type algorithme génétique, on aboutit à la présence, dans la population, d'individus de coût élevé (un certain nombre de clients – arcs ou nœuds- ne peuvent pas être servis). On constate que ces individus ne nuisent pas à la convergence de l'algorithme, même s'il n'existe aucune garantie que la solution optimale puisse être atteinte. Le comportement de l'algorithme ainsi développé est illustré sur la figure 3-11 qui montre l'évolution, au cours de son déroulement, du pourcentage de solutions dans la population qui ne permettent pas de servir tous les clients (ces solutions sont qualifiées d'irréalisables). L'application concerne le VRP hétérogène.

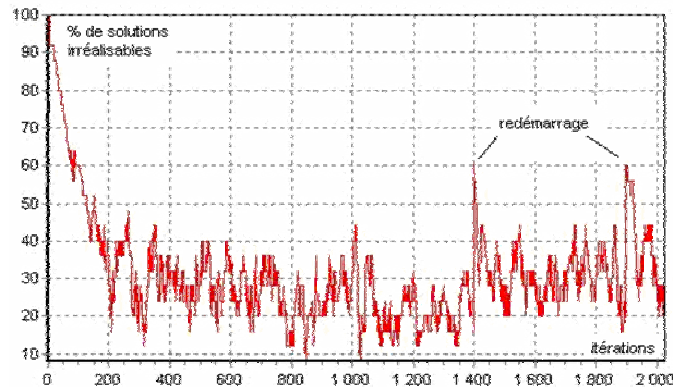


Figure 3-11. Pourcentage de solutions irréalisables dans la population

L'implantation proposée dans [LAC, 05b] n'est pas compétitive en terme de temps de calcul car d'autres critères ont prévalu au moment du développement (cf. chapitre 6). Toutefois, les résultats sont particulièrement encourageants comme le montre le tableau 3-4. Dans ce tableau  $n$  donne la taille des instances,  $h(S^*)$  la meilleure solution connue,  $t(S^*)$  le nombre de tournées dans la meilleure solution connue,  $h(S)$  la meilleure solution trouvée après 5 exécutions et  $t(S)$  le nombre de tournées dans cette solution, puis finalement  $\Delta(S, S^*)$  l'écart en pourcentage entre la meilleure solution trouvée et la meilleure solution connue.

Instance	$n$	$h(S^*)$	$t(S^*)$	Meilleure solution après 5 exécutions		
				$h(S)$	$t(S)$	$\Delta(S, S^*)$
Tail13	51	1518.05	17	1548.62	16	2.01
Tail14	51	611.39	6	621.09	7	1.59
Tail15	51	1015.29	9	1035.83	9	2.02
Tail16	51	1145.52	9	1165.15	9	1.71
<b>Ecart moyen :</b>						<b>1.83</b>
Tail17	76	1071.01	11	1105.26	11	3.20
Tail18	76	1846.35	13	1947.16	13	5.46
<b>Ecart moyen :</b>						<b>4.33</b>
Tail19	101	1123.83	8	1218.29	8	8.41
Tail20	101	1556.35	13	1670.54	13	7.34
<b>Ecart moyen :</b>						<b>7.87</b>
<b>All instances average</b>						<b>3.96</b>

Tableau 3-4. Exemples de résultats sur le VRP hétérogène

### 3.4.6 Les autres extensions du CARP

Les extensions du CARP de base sont nombreuses, tant au niveau des méthodes que des problèmes. Parmi les extensions abordées, on peut citer : le PCARP (Period Capacitated Arc

Routing Problem) et le ECARP (Extended Capacitated Arc Routing Problem).

L'étude du PCARP nécessite la redéfinition de la fonction objectif qui doit inclure un objectif sur un horizon de plusieurs semaines ou plusieurs jours. Le codage des solutions doit lui aussi être adapté : le chromosome est étendu (un nouveau type de croisement est aussi introduit) et le schéma d'optimisation reste sensiblement le même [LAC, 02].

Une étude ponctuelle du ECARP a aussi été réalisée [LAC, 01c]. Il s'agissait d'inclure dans le modèle du CARP des extensions liées pas exemple aux interdictions de tourner sur un graphe routier. Le problème a été formalisé sous la forme d'un modèle linéaire et de petites instances (dérivées des instances de DeArmon) ont été optimalement résolues en utilisant une approche de type Cutting Plane.

### **3.4.7 Bilan des travaux réalisés sur les problèmes de tournées**

Nous avons travaillé sur les problèmes de tournées sur arcs et plus précisément sur le CARP qui permet de modéliser bon nombre de situations réelles comme la collecte des déchets ménagers. Les travaux réalisés ont abouti à la conception d'un algorithme génétique qui est, à notre connaissance, la meilleure méthode, à ce jour, pour traiter les problèmes de tournées sur arcs de type CARP (Capacitated Arc Routing Problem).

Nous avons développé deux voies de recherche à partir de ce problème initial. La première concerne une série d'extensions du problème : étude du PCARP, du SCARP et du ECARP. La deuxième concerne des approches multi-objectifs pour les problèmes de tournées déterministes. La définition d'un schéma d'optimisation multi-objectifs pour le SCARP constituerait, non pas le schéma d'optimisation idéal mais, en tout état de cause, une avancée significative en tirant avantage des approches multi-objectifs dans le cadre stochastique.

Nous avons abordé depuis quelques mois les problèmes de HVRP (Heterogenous Vehicle Routing Problem) avec une approche similaire à celle qui a fait ses preuves sur le problème du CARP [LAC, 05b] [SOU, 05]. La présence de véhicules de capacité différente complique fortement le problème, car elle remet en cause la méthode de découpage du tour géant en sous-tours.

A l'occasion d'un stage d'étudiant, une collaboration s'est instaurée avec la société Pyram (<http://www.pyram.fr/>) spécialiste des salles de bain. Cette société a un problème de distribution de marchandises qui concerne ses 300 clients répartis sur l'ensemble de la France et souhaite la réalisation d'un outil d'aide à la décision pour :

- automatiser le suivi des tournées et des camions, travail aujourd'hui réalisé manuellement ;
- aider à la conception des tournées.

Une maquette informatique a été réalisée. Elle comprend :

- une couche base de données pour le stockage des tournées en cours de création ainsi que le suivi des camions ;
- une couche graphique pour le dialogue avec l'utilisateur. Cette interface est basée sur une intégration avec le logiciel Mappoint (Copyright © Microsoft) ;
- une couche optimisation qui comprend un algorithme génétique et des heuristiques de construction.

L'outil d'aide à la décision permet la prise en compte de flottes homogènes et hétérogènes. Il est aujourd'hui en phase de test. Tous les détails sur les méthodes proposées dans cet outil ainsi qu'une description de celui-ci sont donnés dans [SOU, 05].





## 4 Ateliers à ressources de transport

Les travaux ont été réalisés en partie au travers de la thèse en cours de Anthony Caumont pour le job-shop, avec une collaboration avec Mathieu Bécart en stage de 3<sup>ième</sup> Année CUST Génie Mathématiques. Ce chapitre concerne nos travaux sur les trois sommets du groupe de travail Bermudes : FMS, HSP et job-shop. L'acronyme FMS signifie Flexible Manufacturing System et le terme français est SFP pour Systèmes Flexibles de Production. Le terme HSP signifie Hoist Scheduling Problem. Le terme français Ateliers de Traitement de Surfaces est beaucoup moins utilisé. Nous nous intéressons aux problèmes de job-shop avec time-lags et aux problèmes de job-shop avec transport.

### 4.1 Le problème du HSP (Hoist Scheduling Problem)

Comme tout problème lié à la gestion d'une ressource de transport limitante, il possède une forte ressemblance avec les problèmes de tournées. Lors de leur présentation du 13 juin 2003 au groupe Bermudes (bulletin de liaison n°26), Marie-Ange Manier, Christelle Bloch et Hervé Manier ont montré les analogies existantes entre le HSP et un problème de type m-STSPTW. Les types de HSP sont très nombreux et dépendent du type de cuve, des gammes et de la solution recherchée (solution cyclique ou non) etc... Une récente classification très complète a été réalisée en 2003 [MAN, 03].

#### 4.1.1 Les spécificités des HSP

Il s'agit généralement d'ateliers de production de type flow-shop ou job-shop avec des contraintes additionnelles. Les éléments caractéristiques spécifiques aux ateliers de traitement de surfaces sont les suivants (figure 4-1) :

- chaque produit à traiter possède une gamme qui spécifie la liste des cuves (machines) dans lesquelles il doit être traité ainsi que la durée minimale et maximale de séjour sur chaque cuve (machine).
- les déplacements des produits entre les cuves (machines) sont réalisés par des robots ; les durées de ces déplacements ne sont pas négligeables devant les temps de séjour des pièces dans les cuves (machines).
- toutes les pièces entrent sur une ligne par la même cuve (machine) et quittent le système par une même cuve (machine).
- si plusieurs robots se partagent la gestion d'une même ligne, alors il existe des carrefours où les robots se croisent et pour lesquels il faut gérer l'accès afin d'éviter les conflits.

- si les produits transportés utilisent des supports de transport alors il peut exister un problème de gestion de ces supports sur les différentes lignes.
- les ateliers de traitement de surfaces (comme les systèmes flexibles de production) peuvent être soumis à des blocages.

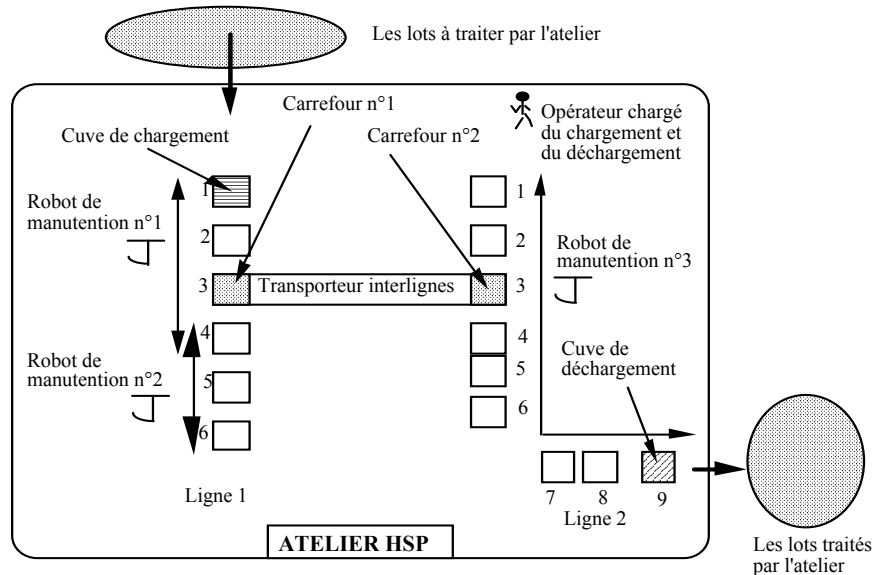


Figure 4-1. Un atelier de traitement de surfaces

Dans [BAP, 01] les auteurs proposent une description très précise des ateliers de traitement de surfaces. Les cas les plus étudiés concernent [MAN, 03] :

- des ateliers avec une seule ligne ;
- un unique robot sur la ligne ;
- la recherche de solutions cycliques.

Dans la plupart des travaux, l'objectif consiste à minimiser le makespan pour un atelier dont la topologie est fixée. Ceci ne peut être fait que de deux manières :

- en proposant un ordre d'entrée adapté des produits;
- en gérant plus efficacement les robots.

Il s'agit en fait de résoudre le "job input sequencing and material handling scheduling"

#### 4.1.2 Proposition pour les ateliers de traitement de surfaces

Le rapport interne de 1997 [GOU, 97] propose un modèle conceptuel de connaissance des HSP qui s'appuie sur une décomposition en trois sous-systèmes : logique (correspondant aux gammes), physique (les entités cuves, chariots, lignes...) et décisionnel (les règles de gestion). Une description OMT fournit un modèle objet, dynamique et fonctionnel. Le but poursuivi était de définir un cadre permettant de faciliter la compréhension et la spécification de tout

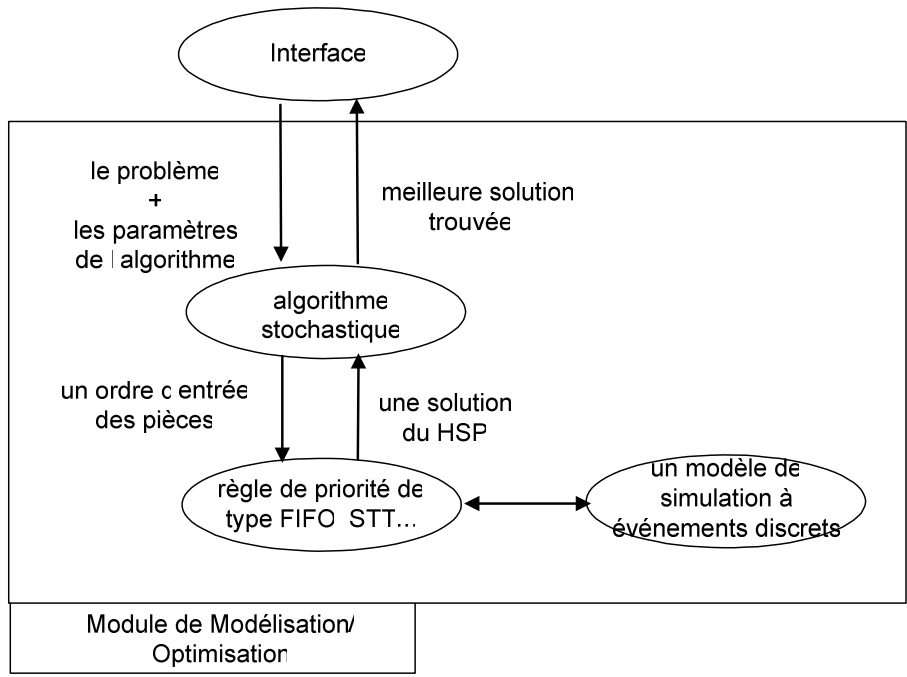
nouveau HSP en s'appuyant sur les modèles proposés. Ce rapport constitue une tentative de formalisation de la connaissance des ateliers de type HSP.

**Proposition d'un schéma d'optimisation pour le HSP (déterministe)**

Avec la société Amis de Montluçon, un atelier composé d'une seule ligne et d'un seul robot a fait l'objet d'une étude. Celle-ci a été réalisée dans des conditions de fonctionnement du système différentes de celles habituellement rencontrées. En effet, dans notre cas, les pièces à traiter sont disposées sur des supports de transport, ceux-ci restant vides dans le système lorsque le traitement des pièces est terminé. Ces supports, qui vides ou pleins, sont continuellement dans le système, induisent des difficultés supplémentaires dans la gestion du système :

- ils "gênent" la progression des pièces dans l'atelier car il est impossible de déposer un support plein dans une cuve contenant un support de transport ;
- il faut les gérer car il existe des contraintes limitant les durées d'immersion des supports vides dans certaines cuves.

Compte tenu du type d'approvisionnement de l'atelier étudié, les solutions recherchées devaient être non cycliques, et une solution devait être proposée en quelques minutes pour une ordonnancement "classique", et en seulement quelques secondes pour un ordonnancement calculé suite à un aléa dans le système. Le schéma d'optimisation proposé est fondé sur un couplage algorithme stochastique/règle de priorité/modèle de simulation (figure 4-2).



**Figure 4-2. Schéma d'optimisation du HSP**

L'approche retenue repose sur une idée comparable à celle proposée par Yih en 1994 [YIH, 94], qui propose de décaler les dates d'entrée des pièces en cas de conflit. Pour un ordre d'entrée des pièces fixé, les dates d'entrée sont calculées au plus tôt. La méthode construit un ordonnancement de  $n$  pièces en entrée, de manière itérative, en construisant un ordonnancement avec 2 pièces, puis 3 etc... Si, à l'étape  $i$ , une contrainte de temps de séjour dans une cuve n'est pas vérifiée, il suffit de décaler la date d'entrée de la pièce en  $i^{\text{ième}}$  position jusqu'à obtenir un ordonnancement réalisable (notons qu'il en existe nécessairement un ; au pire il suffit de limiter le nombre de pièces dans l'atelier à la valeur 1).

La gestion des mouvements du robot est très difficile, car une simple règle de priorité [PAN, 77] n'est pas suffisante pour assurer une gestion correcte des déplacements. Il a été défini une règle de gestion du robot par décomposition du problème de décision en sous-problèmes, chacun concernant la gestion d'une cuve du système. C'est l'approche descendante de décomposition du système de gestion de l'atelier. Du point de vue de la modélisation, il s'agit de structurer le sous-système décisionnel du système. La règle de gestion du robot qui a découlé de l'analyse, est heuristique et, compte tenu des temps de calcul très courts qui étaient imposés par l'entreprise, la recherche d'une solution optimale ne semblait pas possible.

La figure 4-3 donne une idée assez précise du type de solution calculée, en mettant en évidence la délicate gestion des supports de transport. Sur cette figure :

- la cuve d'entrée dans le système est la cuve numéro 1 qui se trouve à droite sur le dessin ;
- la cuve de sortie est la cuve numéro 18 qui se trouve sur la gauche du dessin ;
- le temps de chargement/déchargement vaut 10 unités de temps.
- le cas envisagé est le plus simple : toutes les pièces ayant la même gamme, la solution est donc une solution cyclique.

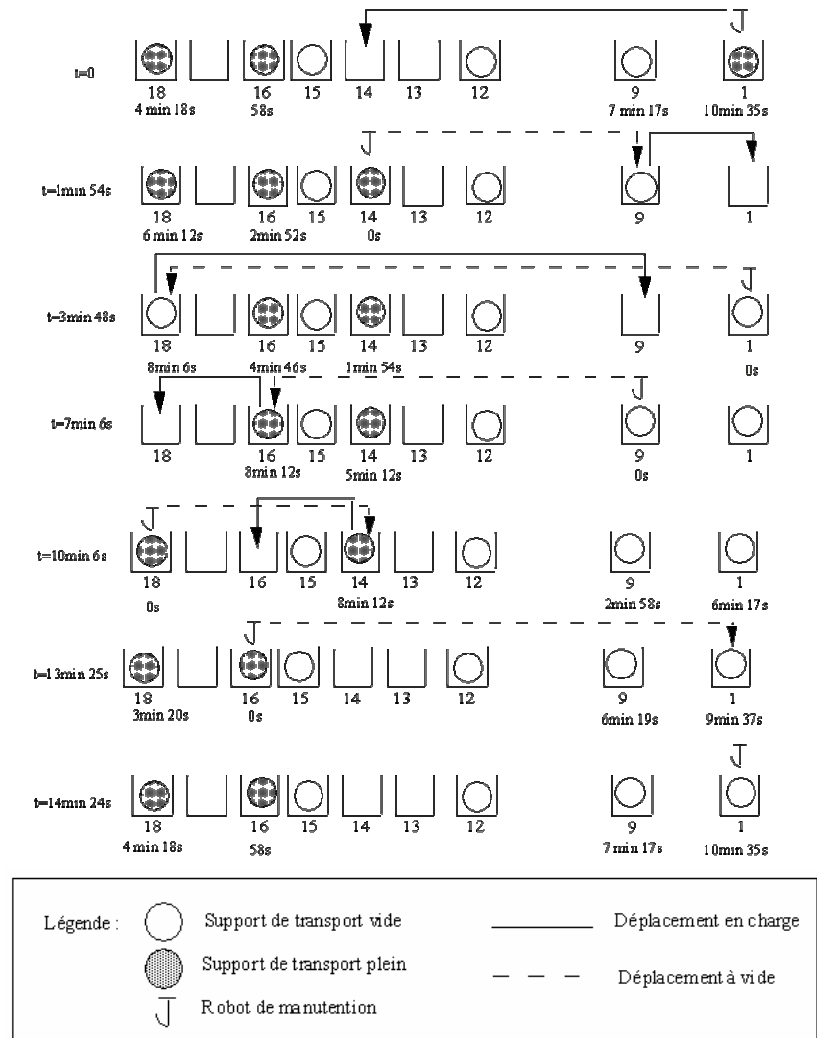


Figure 4-3. Solution cyclique obtenue avec des pièces de gamme 12

L'étude initiale a été complétée par la suite, en intégrant dans le calcul des solutions, des critères de robustesse. L'objectif est devenu la détermination de solutions de bonne qualité mais aussi robustes aux variations de temps de transport du robot. Dans le système réel étudié, ces variations sont permanentes mais de faible ampleur.

**Proposition d'un schéma d'optimisation pour le SHSP (Stochastic HSP)**

Le schéma précédent, basé sur celui de Yih [YIH, 94], est étendu au cas du HSP stochastique. Deux améliorations majeures ont été apportées au schéma précédent. La première concerne la métaheuristique utilisée pour rechercher des ordonnancements de pièces. La méthode stochastique est remplacée par un algorithme d'optimisation d'une variable aléatoire puisque les temps de transport sont eux-mêmes des réalisations de variables aléatoires. La deuxième

concerne le calcul des dates d'entrée des pièces puisqu'on se contente d'examiner à l'étape  $i$  si une contrainte de temps de séjour dans une cuve n'est pas vérifiée pour la pièce en  $i$  ième position. Si des violations de temps de séjour se produisent (et cela est inévitable) sur les pièces de rang 1..  $i-1$  elles sont ignorées. La solution obtenue à la fin de l'optimisation est évaluée par des répliques. Les critères de robustesse retenus concernent essentiellement le nombre de violations des contraintes et la valeur de ces violations. L'article publié dans IJPR et décrivant l'étude du Stochastic HSP est le seul article à notre connaissance traitant de la détermination de solutions robustes pour la résolution du SHSP [FLE, 01].

#### **4.1.3 Bilan des travaux réalisés sur les HSP**

L'étude réalisée concerne un problème complexe peu étudié, car il cumule un bon nombre de spécificités : non cyclique et comportant des supports de transport. Les tableaux de synthèse sur le HSP proposés par [MAN, 03] mettent clairement en évidence la forte concentration d'articles sur les cas cycliques, "mono-produit", "mono-cuve", et avec des approches dynamiques et réactives. Ce qui rend difficile la résolution des problèmes de HSP, c'est la présence d'un moyen de transport dont les déplacements sont comparables, en durée, au temps de séjour des pièces dans les cuves. Rapidement, le taux d'utilisation de la ressource de transport atteint les 100%. Les contraintes de temps de séjour maximal dans les cuves rendent, de plus, impossible la gestion du robot par des règles de priorité classique : le problème est trop contraint pour permettre leur utilisation.

Le chapitre suivant aborde les problèmes des Systèmes Flexibles de Production qui se distinguent des HSP par la présence de stocks sur les machines et par l'absence de durée maximale de séjour des pièces sur les machines. Cette absence rend possible une gestion heuristique, par règle de priorité, des mouvements du chariot.

## **4.2 Le problème des SFP (Systèmes Flexibles de Production)**

La communauté scientifique s'intéressant aux SFP au niveau international est bien identifiée : elle possède une revue spécialisée (IJFMS : International Journal of Flexible Manufacturing System) et les laboratoires actifs dans ce domaine sont bien connus. En France, ces laboratoires se sont fédérés au sein du groupe Bermudes depuis 1996. La communauté a bénéficié d'un soutien important de l'action spécifique Recherche Opérationnelle au travers d'un projet "Ordonnancement de jobs et gestion des moyens de transport dans les ateliers flexibles de production (FMS)" dont le coordonnateur est Aziz Moukrim. Ce soutien a permis la rédaction d'un article présentant la recherche Française autour des SFP. Cet article a été soumis à la revue JESA en 2004 [BRA, 04]. En outre, une session plénière a été organisée à la conférence MOSIM'04 à Nantes pour présenter l'état de la recherche sur les SFP en France. Ces deux événements sont importants, car il s'agit du premier article et de la première présentation de la communauté SFP.

#### 4.2.1 Les spécificités des SFP avec chariots

Il existe de nombreuses classifications des différents types de systèmes flexibles de production. Les critères de classification considérés par les auteurs sont variés. Citons, par exemple, la méthode de fabrication utilisée [REM, 93], la taille des machines et leur complexité [KUS, 85], les modèles des flux de pièces à traiter [BRO, 84] [STE, 85] ainsi que les caractéristiques de fonctionnement et de contrôle [MAC, 93]. Les définitions de base ainsi que de nouvelles classifications ont été proposées récemment par [TCH, 97] [SOU, 01]. Nos travaux portent sur les systèmes flexibles de production avec chariots automatiquement guidés (figure 4-4) et plus particulièrement sur les problèmes d'ordonnancement des pièces et des mouvements des chariots (job input sequencing and material handling scheduling).

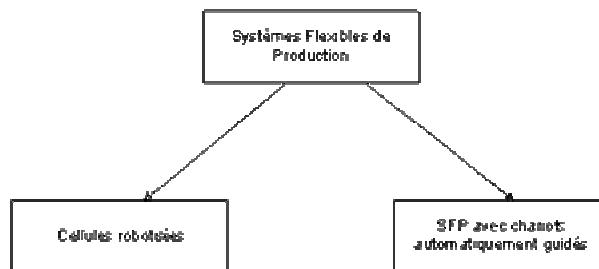


Figure 4-4. La recherche en France sur les SFP [BRA, 04]

Le modèle théorique qui se rapproche le plus du problème d'ordonnancement des pièces et des mouvements du chariot est le modèle du job-shop.

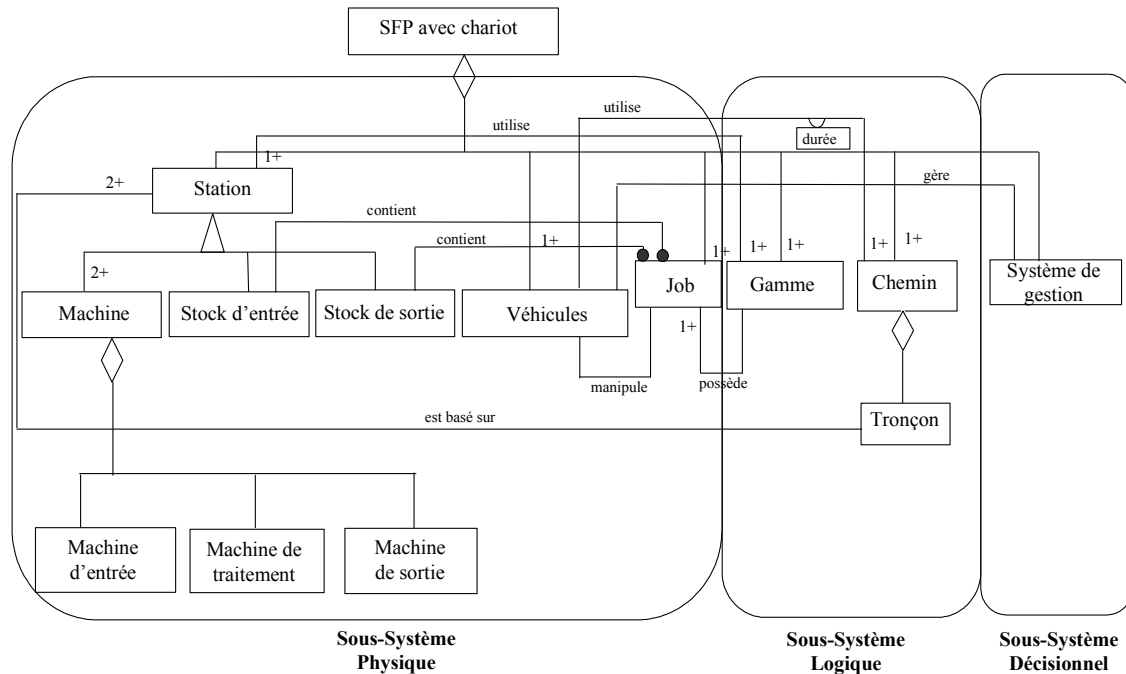


Figure 4-5. Modèle objet simplifié des SFP (hors réseau de guidage) [LAC, 04c]

Comme le montre la figure 4-5, les SFP possèdent un grand nombre de particularités physiques dont les plus importantes sont :

- chaque station se compose d'une machine, d'un stock d'entrée et d'un stock de sortie (figure 4-6) ;

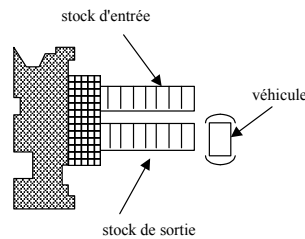


Figure 4-6. Une station dans un SFP

- le(s) chariot(s) se déplace(nt) le long d'un système de guidage comportant des sections, des tronçons et des intersections. Le terme section désignant un ensemble de tronçons sur lesquels, par exemple, un seul véhicule est autorisé à chaque instant pour des contraintes technologiques de gestion du système (figure 4-7).



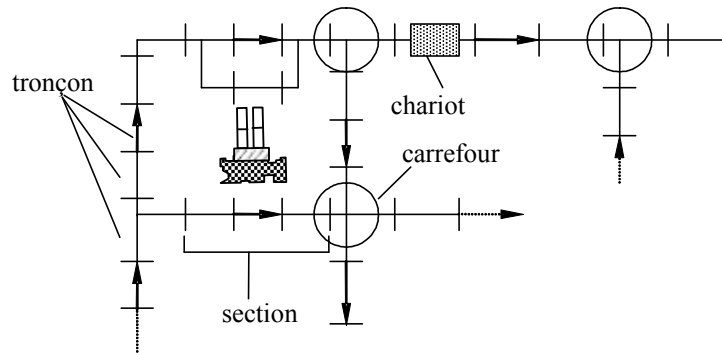


Figure 4-7. Eléments du réseau de guidage

Ces éléments compliquent fortement la gestion des systèmes flexibles. Les stocks d'entrée/sortie sont de capacité limitée et les situations d'inter-blocages dans le système peuvent apparaître, même sur des systèmes très simples composés d'un seul chariot comme le montre la figure 4-8. De plus, les stocks sont généralement présents dans les SFP sous la forme de tapis roulants, ce qui signifie que la discipline de gestion des pièces sur la station est FIFO. Il existe d'autres cas, plus rares, car l'implantation d'un stock, ayant une autre discipline que FIFO, nécessite des appareillages sophistiqués et onéreux.

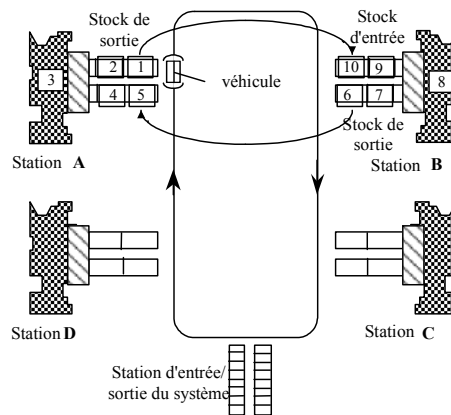


Figure 4-8. Un SFP en situation de blocage

Notons que la dernière place du stock de sortie joue un rôle particulier car c'est la seule place du stock munie de capteurs permettant au système de pilotage de connaître les pièces à transporter. Il s'ensuit qu'un chariot ne peut se déplacer pour aller chercher une pièce qu'après la date à laquelle la pièce arrive à l'extrémité du stock de sortie. Cela peut se résumer par le fait que les déplacements du chariot n'anticipent pas la sortie des pièces.

La présence, dans le système de guidage, de tronçons, sections et carrefours permet de mettre en place un système de pilotage évitant les collisions (éventuellement dangereuses) entre des chariots. Souvent un seul chariot est autorisé par tronçon ou par section mais différentes politiques existent à ce niveau. Dans tous les cas, la gestion des carrefours est un point très important d'un point de vue industriel.

Notons que les temps de déplacement des chariots ne sont pas négligeables devant les durées de traitement des pièces. Il suffit, pour s'en convaincre, de se rapporter aux jeux de données de Bilge et Ulusoy par exemple [BIL, 95]. Dans leur article, Bilge et Ulusoy utilisent le terme de "Job-Set" pour désigner les gammes et le terme de "layout" pour représenter les matrices de temps de déplacement entre les machines.

Les problèmes d'ordonnancement des pièces et des mouvements des chariots, sont traités, d'un point de vue industriel, de la manière suivante, pour chaque système :

- il existe une politique de choix d'un chariot. Si plusieurs chariots sont disponibles à un instant donné et si une pièce est dans un stock de sortie, alors un chariot est choisi par une règle de priorité. Généralement, cette règle tend à équilibrer le taux d'utilisation des chariots, pour éviter l'épuisement trop rapide de la batterie de l'un des chariots.
- Il existe une politique de gestion des chariots lorsque aucune pièce ne demande à être transportée. Généralement les chariots sont laissés immobiles à leur position actuelle, mais on trouve aussi des politiques consistant à déplacer les chariots de manière circulaire dans le système.
- Si plusieurs pièces nécessitent un transport, il existe de nombreuses politiques pour le choix d'une pièce requérant un transport : FIFO, STT, STD, MOQS....

#### **4.2.2 Les travaux réalisés**

Les travaux réalisés concernent les systèmes flexibles de production avec un seul chariot et plus particulièrement l'ordonnancement des pièces et des mouvements du chariot. Afin d'obtenir des solutions réalistes au problème, il est nécessaire de prendre en compte, si possible, toutes les contraintes de fonctionnement dans la recherche des solutions. Parmi les contraintes spécifiques aux SFP, on peut citer :

- la capacité limitée des stocks d'entrée/sortie ;
- le nombre maximal de pièces simultanément autorisées dans l'atelier ;
- les déplacements à vide et en charge du chariot.

Ce problème a été abordé sous 5 angles complémentaires :

- formalisation du problème sous une forme linéaire.
- détermination de bornes inférieures ;
- couplage Algorithme Stochastique/règles de priorité/simulation ;
- couplage Branch-and-bound /règles de priorité/simulation ;
- simulation réflexive.

De manière plus formelle, il s'agit, pour résoudre le problème, de construire une solution avec :

- les opérations d'usinage des pièces sur les machines ;
- les opérations de passage des pièces sur les stocks d'entrée/sortie de chaque machine ;
- les opérations de transport en charge du chariot ;
- les opérations de transport à vide du chariot.

Même pour un faible nombre de pièces à ordonnancer à l'entrée du système, le nombre total d'opérations à placer est vite prohibitif. Le premier Job-Set proposé par Bilge et Ulusoy est assez révélateur. Sur le Job-Set 1 (tableau 4-1) avec seulement 5 pièces à ordonnancer (chacune de gamme différente) on obtient : 23 opérations de traitement, 23 opérations de transport à vide, 18 opérations de transport en charge soit un total de 64 opérations.

	<b>Gamme des pièces</b>
Type 1	L/U(0) M1(8) M2(16) M4(12) L/U(0)
Type 2	L/U(0) M1(20) M3(10) M2(18) L/U(0)
Type 3	L/U(0) M3(12) M4(8) M1(15) L/U(0)
Type 4	L/U(0) M4(14) M2(18) L/U(0)
Type 5	L/U(0) M3(10) M1(15) L/U(0)

**Tableau 4-1. Gamme des pièces pour le Job-Set 1 de Bilge et Ulusoy**  
(L/U désigne la station d'entrée/sortie du système)

### 4.2.3 Proposition d'un modèle linéaire du problème

Le travail réalisé sur le modèle linéaire étend et généralise les travaux antérieurs de MacCarthy ainsi que ceux de Bilge et Ulusoy [BIL, 95] [MAC, 93]. Une comparaison rapide entre les trois modèles sur le tableau 4-2 témoigne de l'effort de formalisation développé.

<b>Type de contraintes</b>	<b>Formulation de Bilge et Ulusoy</b>	<b>Formulation de MacCarthy</b>	<b>Notre formulation</b>
Contraintes de précédence	Oui	Oui	Oui
Contraintes d'ordonnancement	Oui	Oui	Oui
Contraintes de transport	Oui	Oui	Oui
Contrainte de transport à vide	Non	Non	Oui
Capacité des stocks d'entrée	Non	Oui	Oui
Capacité des stocks de sortie	Non	Non	Oui
Nombre maximal de pièces simultanées	Non	Non	Oui
Non blocage des machines	Non	Non	Oui
Règle de gestion des stocks	Non	Non	Oui

**Tableau 4-2. Comparaison des modèles linéaires**

Comparaison des modèles linéaires

La formulation proposée permet de résoudre optimalement des problèmes comportant 7 pièces à ordonnancer ce qui représente environ 100 opérations à placer [BEC, 04] [BEC, 03]. Il reste beaucoup à faire sur ce modèle, même si les premiers tests réalisés sont encourageants. Une deuxième version de ce modèle (plus efficace en nombre de variables binaires) est en cours de validation [CAU, 05a].

Cette nouvelle formulation linéaire permet la recherche de deux types de solutions :

- des solutions où la gestion du chariot et la gestion des stocks sont optimales ;
- des solutions, où la gestion du chariot est optimale et les stocks gérés par la politique FIFO.

Notons MILP1 le modèle permettant d'obtenir une solution optimale des mouvements du chariot et des stocks puis notons MILP2 le modèle résolvant optimalement les mouvements du chariot et gérant les stocks selon la politique FIFO.

Le tableau 4-3 donne un exemple de résultats obtenus par la résolution du MILP avec Cplex sur les jeux de données proposés dans [BIL, 95]. Afin de reprendre les tests réalisés dans [BIL, 95] des expérimentations ont été effectuées avec différents facteurs multiplicatifs des temps d'usinage et de déplacement. Dans le tableau ci-dessous :

$nc$  : représente le nombre total d'opérations à ordonnancer ;

$V$  : l'ensemble des pièces en entrée du système

$N$  : le nombre de pièces simultanément autorisées dans le système.

$C_{\max}$  : le makespan de la solution optimale

$UB$  : une borne supérieure du problème.

Les cases grises signifient qu'aucune solution n'a été trouvée dans des temps acceptables (inférieure à 24 heures). Dans ce cas, la case contient la meilleure solution déterminée lors du processus de résolution.

$p_{ij}$	$t_{ij}$	$nc$	$V$	$N$	$C_{\max}$	$UB$
$\times 1$	$\times 1$	28	{1,2}	1	156	156
			{1,2}	2	120	128
		36	{1,2,3}	1	237	237
			{1,2,3}	2	182	194
			{1,2,3}	3	178	190
		45	{1,2,3,4}	1	305	305
			{1,2,3,4}	2	218	226
			{1,2,3,4}	3	214	234
			{1,2,3,4}	4	214	224
		56	{1,2,3,4,5}	1	366	366
			{1,2,3,4,5}	2	260	271
			{1,2,3,4,5}	3	256	256
			{1,2,3,4,5}	4	250	268
			{1,2,3,4,5}	5	260	272

Tableau 4-3. Résolution exacte avec le MILP1 de l'instance Job-Set 1, Layout 1 des jeux de données fournis dans [BIL, 95].

Chaque solution peut être représentée sous la forme d'un diagramme de Gantt (figure 4-9 et figure 4-10).

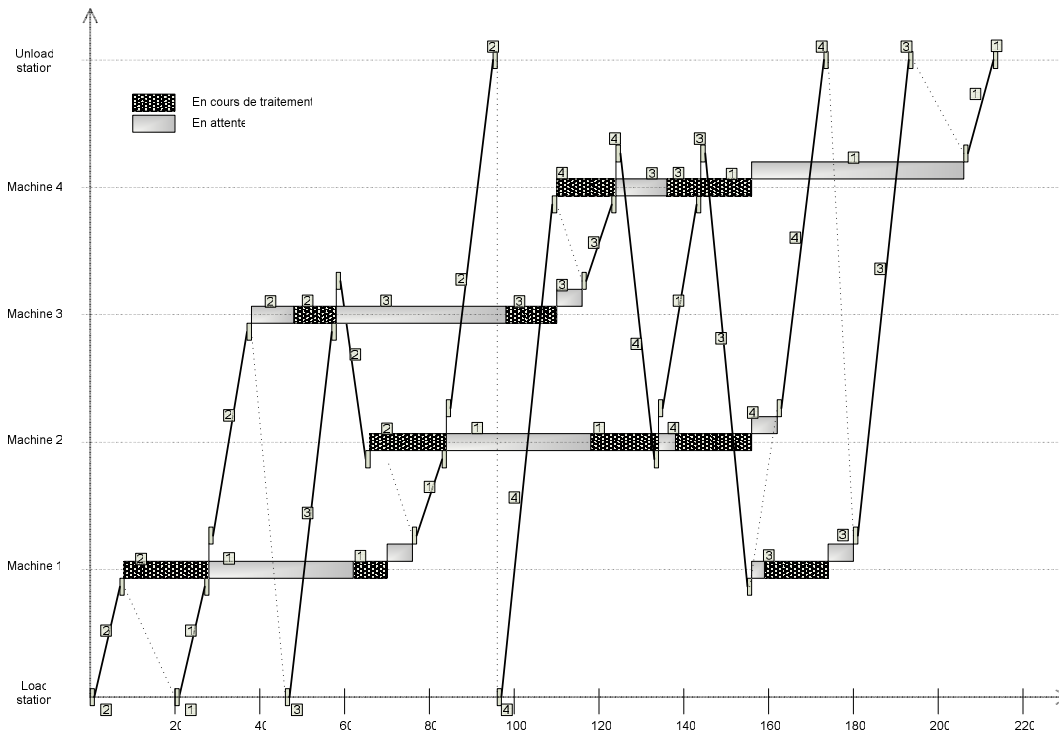


Figure 4-9. Diagramme de Gantt pour  $n = 4$  et  $N = 2$

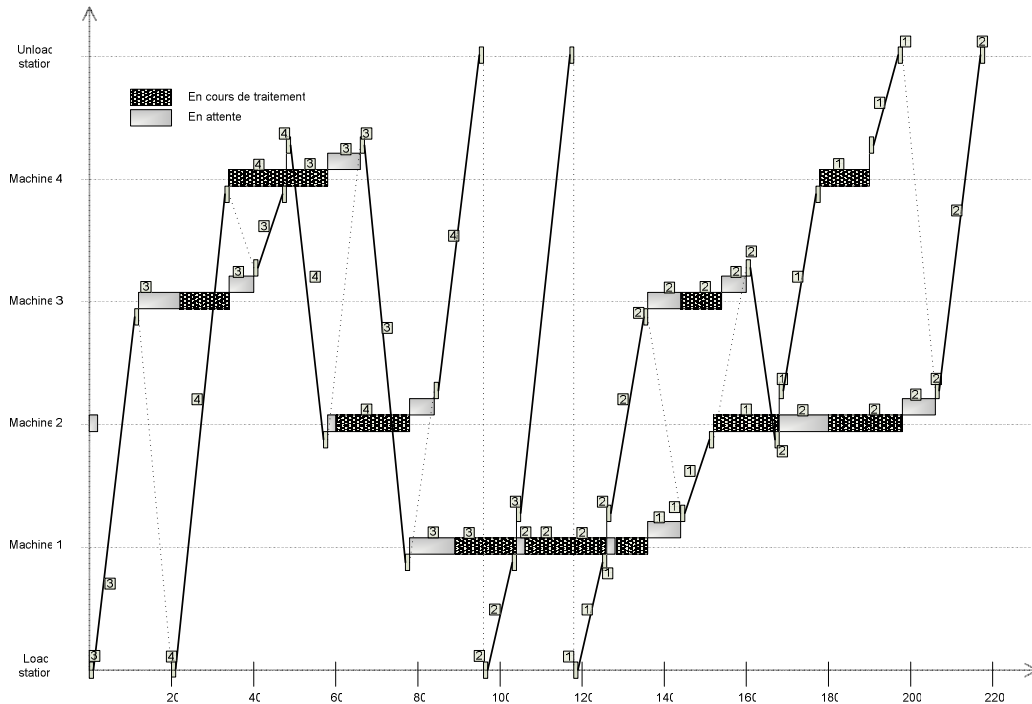
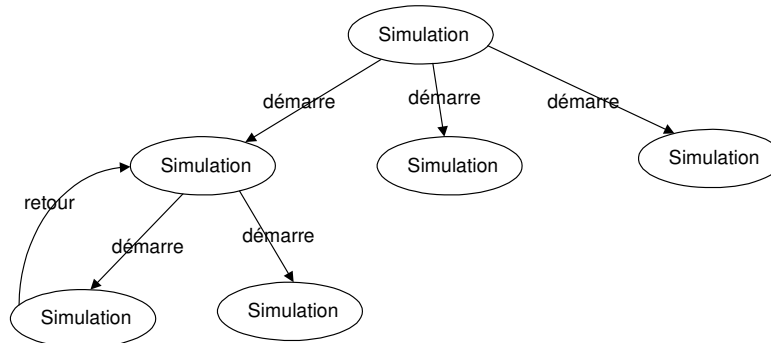


Figure 4-10. Diagramme de Gantt pour  $n = 4$  et  $N = 3$

#### 4.2.4 Proposition d'un modèle de simulation réflexif

Un modèle de simulation réflexif [LAC, 04c] a été utilisé comme outil de validation et de test des résultats obtenus par le modèle linéaire. Le principe consiste à remplacer chaque utilisation de la règle de priorité qui gère les mouvements du chariot par un appel à un autre modèle de simulation. En fait, la simulation "s'auto-simule" et déroule ainsi un arbre de recherche représentant toutes les possibilités de gestion du chariot.

Il y a deux cas à distinguer pendant le déroulement du modèle de simulation. Soit il existe plusieurs possibilités de gestion du chariot (plusieurs destinations possibles) auquel cas on est sur un point de décision ; soit le chariot se rend vers l'unique destination possible. Lorsque plusieurs destinations sont possibles, le modèle de simulation s'arrête et envisage consécutivement toutes les destinations possibles. Envisager une solution consiste à l'évaluer et donc à démarrer une nouvelle simulation, et ainsi de suite jusqu'à ce la charge totale ait été écoulee. La simulation réflexive effectue alors un retour arrière et le processus se poursuit (figure 4-11). Deux modèles, l'un en SIMULA et l'autre en Delphi, ont été auto-validés sur plus de 30 jeux de données.



**Figure 4-11. Principe de la simulation réflexive**

Cette méthode, très peu utilisée pour les problèmes d'ordonnancement, s'est montrée très efficace puisque des solutions exactes ont été calculées en quelques minutes pour une centaine d'opérations à ordonnancer [LAC, 04c]. Les résultats obtenus par la simulation réflexive ont été validés avec ceux obtenus par le modèle linéaire. Il sera nécessaire d'intégrer dans ces deux approches, des calculs de bornes inférieures [ESP, 01].

Pour valider les deux modèles (le modèle linéaire et la simulation réflexive), l'ordre d'entrée optimal des pièces, déterminé avec le deuxième modèle linéaire noté MILP2, est utilisé comme donnée d'entrée de la simulation réflexive, ce qui limite la recherche arborescente de la simulation réflexive. Les contraintes de fonctionnement prises en compte par la simulation réflexive et le MILP2 sont identiques. Avec ces deux modèles, la gestion des stocks se fait en FIFO. Comme le montre le tableau 4-4 les résultats sont identiques.

$V$	$N=$	$S_{MILP2}^*$	$C_{\max}$ du MILP2	$C_{\max}$ de la Simulation Réflexive	Nombre de nœuds explorés	Temps de calcul
{1,2}	1	1,2	156	156	1	<1s
{1,2}	2	2,1	120	132	103	<1s
{1,2,3}	1	1,3,2	237	237	1	<1s
{1,2,3}	2	1,3,2	182	182	5.227	<1s
{1,2,3}	3	2,1,3	178	178	35.579	<1s
{1,2,3,4}	1	1,2,3,4	305	305	1	<1s
{1,2,3,4}	2	3,4,2,1	218	218	32.427	4s
{1,2,3,4}	3	2,1,3,4	214	214	1.260.975	2'14s
{1,2,3,4}	4	2,3,1,4	214	214	6.784.691	11'21s

**Tableau 4-4. Exemple de résultats fournis par la simulation réflexive et comparés au MILP2 en utilisant l'ordre d'entrée fourni par le MILP2 (Job-Set 1, Layout 1)**

L'intérêt de la simulation réflexive ne s'arrête pas à la validation du modèle linéaire. En effet, en chaque point de décision dans l'arborescence, il est possible :

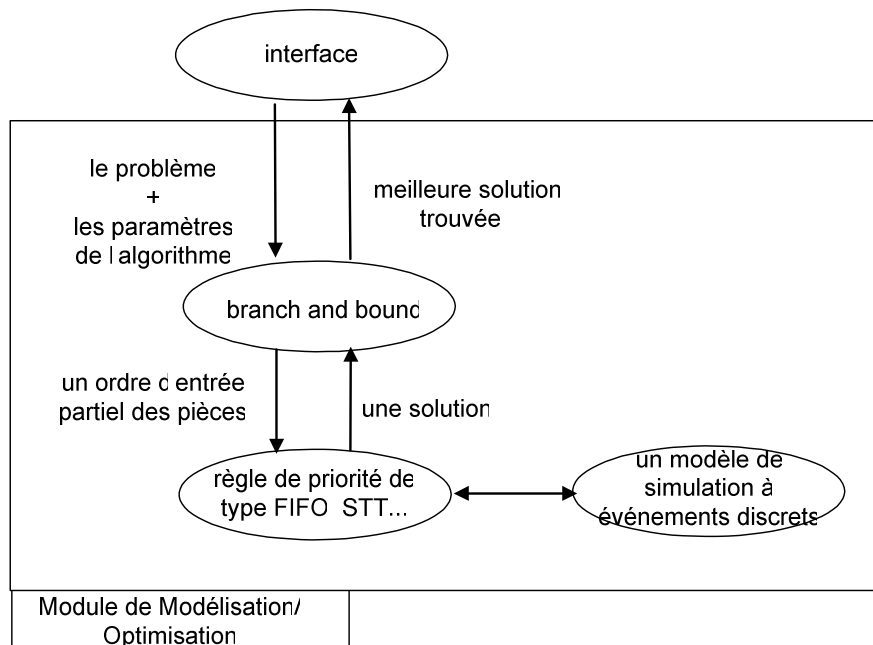
- soit d'autoriser le robot à rester inactif jusqu'au prochain événement même si une ou plusieurs pièces ont terminé leur traitement ;
- soit de ne pas autoriser les attentes du robot.

Ces deux notions sont très proches des notions qu'on retrouve en ordonnancement sous les termes actifs, semi-actifs et sans délais. Ce modèle de simulation réflexif devrait permettre de valider des modèles basés sur des graphes disjonctifs.

Ces deux méthodes de résolution ne sont applicables que pour les petites instances de SFP avec moins de 80 opérations à ordonnancer, ce qui correspond à environ 5 pièces à ordonnancer. Pour les problèmes de plus grande taille, seules des approches de décomposition du problème restent possibles. De manière classique, les algorithmes stochastiques restent pour les problèmes de très grande taille (plus de 40 pièces à ordonnancer) des méthodes privilégiées. Les approches de type branch-and-bound pour les problèmes de taille moyenne (jusqu'à 20 pièces à ordonnancer) restent aussi possibles.

#### 4.2.5 Proposition d'un schéma d'optimisation basé sur un couplage branch-and-bound/simulation

Avec cette approche, la gestion des mouvements du chariot est heuristique (utilisation d'une règle de priorité), mais la résolution du problème d'ordonnancement est, quant à elle, exacte, grâce à un algorithme de branch-and-bound [LAC, 05a] [ESP, 01]. Le principe du couplage est représenté sur la figure 4-12. Il montre comment l'évaluation d'un ordre partiel est réalisée, grâce à une règle de priorité pour la gestion du chariot.



**Figure 4-12. Principe de résolution : couplage Branch-and-bound/règle de priorité/simulation [LAC, 05a]**



La méthode de branch-and-bound construit une succession d'ordres partiels qui aboutit à l'énumération des ordres d'entrée possibles (figure 4-13). Sur le schéma ci-dessous,  $x_i$  désigne un ordre partiel où seules les  $i$  premières positions de l'ordre ont été affectées d'un numéro de pièces.  $H(x_i)$  représente la valeur de la fonction coût liée à l'ordre partiel  $x_i$ .

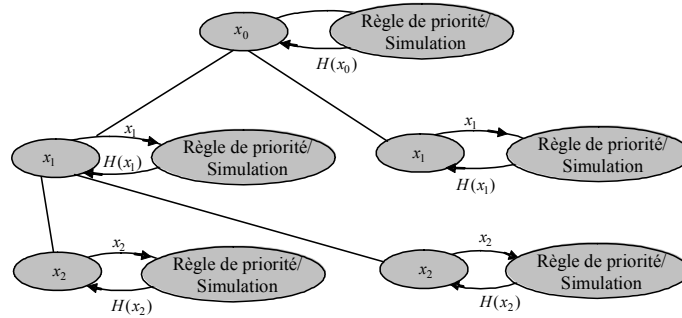


Figure 4-13. Principe du branch-and-bound proposé

En ce qui concerne les performances, il est possible de résoudre des problèmes avec 10 pièces à ordonnancer en 17s sur un Pentium IV 2.4 Ghz ; ceci représente 105.827 nœuds générés par le branch-and-bound soit un temps de 0,1ms par nœud généré. Un résumé de l'article accepté par IJPR [LAC, 05a] est présenté dans le chapitre 10.

Le couplage Branch-and-bound / Simulation permet de déterminer, après plusieurs exécutions avec différentes politiques de gestion du chariot, une borne supérieure au problème initial déjà utilisée lors de la résolution des modèles linéaires (tableau 4-5). Ces valeurs sont à rapprocher des résultats présentés sur le tableau 4-3 et tableau 4-4.

$ V $	$N$	$C_{FIFO}$	$C_{STT}$	$C_{SPT}$	$C_{MOQS}$	$Best$
2	1	156	156	156	156	156
	2	120	128	128	128	128
3	1	237	237	237	237	237
	2	182	194	194	194	194
	3	178	194	202	194	190
4	1	305	305	305	305	305
	2	218	226	226	226	226
	3	214	236	236	236	234
	4	214	224	260	224	224
5	1	366	366	366	366	366
	2	260	271	271	271	271
	3	248	256	262	256	256
	4	248	268	284	268	268
	5	248	272	306	280	272

Tableau 4-5. Exemples de résultats sur des instances de petite taille (Job-Set 1, Layout 1)

Ce schéma d'optimisation exploite une borne inférieure et une borne inférieure "approchée". La borne approchée ne permet pas de garantir que l'ordre d'entrée des pièces est l'ordre optimal par rapport à la politique de gestion choisie (FIFO, STT...) mais permet la résolution approchée d'instances de grande taille (20 pièces en entrée).

Le tableau 4-6 donne les résultats obtenus avec le job-set 1, layout1 des instances proposées par Bilge and Ulusoy [BIL, 95]. Dans ce tableau,  $n$  représente le nombre de pièces à ordonnancer,  $N$  le nombre de pièces simultanément autorisées dans le système et  $t$  le temps de calcul sur un ordinateur équipé d'un processeur PIII 800Mhz.

$n$	$N$	Elagage exact			Elagage heuristique			
		Nombre de nœuds traités	Nombre d'élagages	$t$	Nombre de nœuds traités	Nombre d'élagages	% d'écart par rapport à l'optimum	$t$
8	4	6054	3689	0 min 02s	1670	1050	0,0	0 min 01s
	6	6985	4277	0 min 01s	4455	2654	0,0	0 min 00s
	8	8867	4842	0 min 02s	7532	4156	0,0	0 min 01s
10	4	105827	67823	0 min 27s	10164	6844	0,0	0 min 02s
	6	112968	71430	0 min 30s	19660	13512	2,3	0 min 03s
	8	138983	88225	0 min 39s	71197	45193	0,0	0 min 12s
12	4	812022	535594	4 min 20s	14286	9825	0,0	0 min 02s
	6	1222788	777256	6 min 31s	46153	32254	0,0	0 min 07s
	8	1399509	875129	7 min 41s	182783	125354	0,0	0 min 23s
15	4				165276	120397		0 min 32s
	6				486265	353863		0 min 30s
	8				866828	636855		2 min 46s
20	4				528567	395932		1 min 54s
	6				641756	491941		2 min 12s
	8				12617692	9436623		52 min 29s

**Tableau 4-6. Exemples de résultats avec la règle FIFO comme politique de gestion du chariot [LAC, 05a]**

#### 4.2.6 Proposition d'un schéma d'optimisation basé sur un algorithme stochastique/simulation pour les instances de grande taille

Le couplage algorithme stochastique/règle de priorité/simulation permet de déterminer un bon ordre d'entrée des pièces en gérant le chariot avec une règle de priorité (STT, STT...). Le schéma d'optimisation [LAC, 00] [LAC, 99] [GOU, 99] permet de résoudre des problèmes avec plus de 50 pièces à ordonnancer en quelques minutes. Il s'agit d'une résolution approchée du problème d'ordonnancement des pièces et des mouvements du chariot.

#### 4.2.7 Analyse détaillée des règles de priorité pour la gestion d'un chariot [CAU, 05b]

La conjugaison de ces ensembles d'outils permet pour la première fois (à notre connaissance) l'étude de la performance des règles de priorité pour la gestion du chariot en utilisant autre

chose qu'une "simple" borne inférieure. Le tableau 4-7 ne permet pas de mettre en évidence de manière claire les différences entre les règles de gestion car le nombre de pièces en entrée est faible ainsi que le nombre maximal de pièces autorisées dans le système. Les premières différences significatives entre les règles commencent à apparaître lorsque  $N > 3$ . Pour 4 pièces et  $N=3$  par exemple, FIFO permet d'obtenir une solution à 15% de la solution optimale de gestion du chariot et SPT à 21.4%. Des résultats intéressants de ce point de vue seront obtenus dès que la résolution de grandes instances par le modèle linéaire sera possible.

$S_{MILP2}^*$	$N$	$C_{\max}$	$C_{FIFO}$	Gap %	$C_{STT}$	Gap %	$C_{SPT}$	Gap %	$C_{MOQS}$	Gap %
1.2	1	156	156	0.00	156	0.00	156	0.00	156	0,00
2.1	2	120	128	6.67	128	6.67	128	6.67	128	6,67
1.3.2	1	237	253	6.75	253	6.75	253	6.75	253	6,75
1.3.2	2	182	204	12.09	204	12.09	204	12.09	204	12,09
2.1.3	3	178	194	8.99	206	15.73	224	25.84	206	15,73
1.2.3.4	1	305	305	0.00	305	0.00	305	0.00	305	0,00
4.3.2.1	2	218	249	14.22	249	14.22	249	14.22	249	14,22
2.1.3.4	3	214	248	15.89	260	21.50	252	17.76	260	21,50
2.3.1.4	4	214	268	25.23	242	13.08	268	25.23	240	12,15

**Tableau 4-7. Exemple de tableau de résultats permettant d'analyser la performance des règles de gestion par rapport à la gestion optimale du chariot (Job-Set 1, Layout 1)**

#### 4.2.8 Bilan des travaux réalisés sur les SFP

Dans le cadre des SFP avec un seul chariot, nous avons travaillé sur 4 approches complémentaires de résolution du problème d'ordonnement des pièces et des mouvements du chariot (tableau 4-8). La caractéristique principale de ces 4 approches est de reposer sur plusieurs modèles différents du problème sous les mêmes hypothèses simplificatrices. Cette façon de procéder a rendu possible la validation mutuelle des différents modèles.

	<b>Ordre d'entrée des pièces</b>	<b>Gestion des mouvements du chariot</b>	<b>Gestion des pièces dans les stocks</b>
Modèle linéaire	Résolution exacte	Résolution exacte	Résolution exacte ou FIFO
Simulation réflexive	Résolution exacte	Résolution exacte	FIFO
Couplage Branch-and-bound/règle de priorité/simulation	Résolution exacte	Résolution approchée (règle de priorité)	FIFO
Couplage Algorithme Stochastique/règle de priorité/simulation	Résolution approchée	Résolution approchée (règle de priorité)	FIFO

**Tableau 4-8. Les différentes approches**

La prise en compte de toutes les contraintes du système (stocks de capacité limitée, ...) rend difficile la résolution de ce problème et la généralisation à plusieurs chariots est encore une perspective de recherche. La modélisation qui manque encore à nos travaux, concerne la modélisation du problème sous la forme d'un graphe disjonctif. Pour aborder ces aspects et en parallèle aux travaux présentés dans cette section, une étude des problèmes de job-shop a débuté avec l'objectif de parvenir au job-shop avec transport.

### 4.3 Le problème du job-shop et de ses extensions

Les travaux entrepris sur le job-shop sont dans la continuité de ceux effectués sur le HSP et sur les SFP. Les deux problèmes précédents sont des "job-shops like". L'objectif consiste à remplacer le modèle de simulation précédent (paragraphes 4.2.5 et 4.2.6) par un modèle à base de graphe disjonctif. Les extensions du job-shop qui semblent les plus intéressantes dans cette optique sont :

- les contraintes de time-lags (contraintes de temps de séjour minimal et maximal sur les machines) ;
- les contraintes de transport.

Le HSP avec un seul chariot peut être considéré comme un job-shop avec des contraintes supplémentaires de time-lags pour représenter les durées minimales et maximales de séjour et des contraintes de transport. Un SFP avec un seul chariot peut être vu comme un job-shop, avec comme contraintes supplémentaires, les transports et les stocks (stocks dans les stations, nombre maximal de pièces autorisées). Comme le montre le tableau 4-9, il est possible d'aborder les problèmes de HSP et des SFP en partant du modèle théorique du job-shop. Dans cette optique Cheng et Smith font des propositions très intéressantes dans [CHE, 95].

<b>Job-Shop</b>	<b>HSP</b>	<b>SFP</b>
<b>Time-lag</b>	X	
<b>Transport</b>	X	X
<b>Stock</b>		X

**Tableau 4-9. Liens entre le HSP, les SFP et le problème théorique du job-shop**

Il est évident qu'un HSP avec plusieurs chariots, cuves "multi-fonctions", ou convoyeur interligne donnerait lieu (si cela est possible) à une modélisation sous la forme d'un job-shop plus difficile. Cette remarque reste vraie pour les SFP où le cas mono-robot est le plus facile à identifier à un problème de job-shop. A court et moyen terme, il y a un intérêt évident à réaliser une modélisation des problèmes du HSP et des SFP en repartant des travaux du job-shop.

#### **4.3.1 Introduction**

Durant notre thèse, nous nous sommes intéressé à la planification de la fonderie Peugeot de Set-Fons dont la structure physique s'apparente à un flow-shop hybride [LAC, 98]. La complexité de ce type de système réside dans la partie logique (gamme comportant des opérations d'assemblage, recirculation...). L'approche proposée est fondée sur un couplage méthodes stochastiques/règles de priorité/simulation. Cette étude a mis en évidence les grandes variétés de contraintes, intéressantes d'un point de vue applicatif, telles que les périodes de disponibilité des ressources (horaires d'ouverture), regroupements de flux de pièces... Cela nous pousse à croire aux avantages qu'on peut tirer de l'extension des travaux existants sur le job-shop flexible, job-shop,... pour s'approcher encore davantage des préoccupations pratiques.

La littérature sur le job-shop est particulièrement vaste, mais on constate que le nombre d'articles abordant les time-lags et les contraintes de transport est beaucoup plus réduit. Depuis 1959, année où Mitten a introduit les time-lags [MIT, 59], les articles abordant cette notion dans le graphe disjonctif du job-shop ne sont pas très nombreux.

On trouve des travaux concernant des time-lags entre opérations quelconques appliqués, par exemple, à des problèmes à machines parallèles comme dans [MUN, 98]. Les problèmes de time-lags sont essentiellement abordés dans le cas de problèmes à une seule machine. La plupart du temps, il s'agit de time-lags minimums [FIN, 96] [BAL, 95] [BRU, 99a] mais aussi parfois quelconques comme dans [BRU, 99b]. Lorsque les time-lags ne sont exprimés qu'entre des opérations successives d'un même job, le problème du job-shop avec time-lag généralise le job-shop avec no-wait. Il suffit de consulter l'état de l'art de [HAL, 96] pour

constater le grand nombre de publications sur le sujet. On trouve aussi des articles qui concernent les problèmes de time-lags minimums et maximums entre opérations consécutives d'un job dans le cas du flow-shop [YAN, 95] [FON, 03]. Des publications récentes sont issues de Nancy et on peut citer la thèse de F. Deppner [DEP, 04] et l'article à paraître de Fondrevelle *et al.* [FON, 05]. Enfin un ensemble important d'articles abordent le problème des time-lags minimums seuls (les time-lags maximums sont nuls) avec une terminologie variable : delayed precedence, generalized precedence ou encore transportation time.

#### 4.3.2 Proposition d'un schéma d'optimisation étendant le schéma d'optimisation de Nowicki et Smutnicki [CAU, 04]

L'approche proposée s'inscrit dans la continuité des travaux de Nowicki et Smutnicki [NOW, 96], qui ont élaboré une méthode taboue considérée encore aujourd'hui comme l'une des méthodes les plus performantes pour le problème du job-shop. Le schéma d'optimisation est présenté sur la figure 4-14 et repose sur une modélisation du problème sous la forme d'un graphe de disjonction (on parle aussi de graphe disjonctif) non orienté et sur la modélisation d'une solution sous la forme d'un graphe de disjonction orienté.

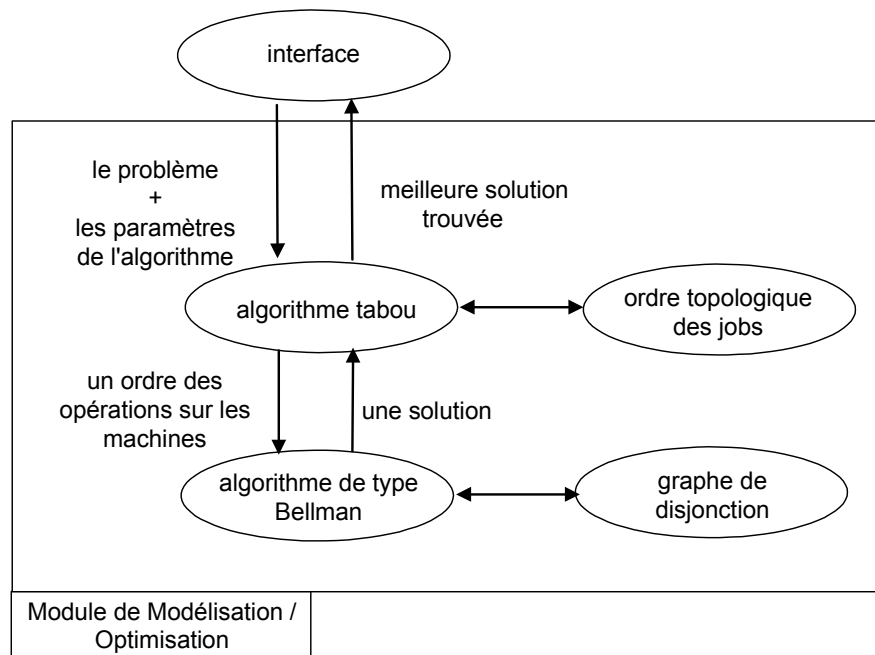


Figure 4-14. Schéma d'optimisation de type tabou

Ce schéma d'optimisation est fondé sur une modélisation du problème sous la forme d'un graphe disjonctif étendu dans lequel les time-lags sont représentés par des arcs supplémentaires, sous la forme d'arcs de coût négatif pour les time-lags maximums (figure 4-15). En fonction de l'ordre des opérations sur les machines, les arêtes (représentant les disjonctions entre opérations) sont orientées, et un algorithme de type Bellman permet de calculer le chemin le plus court dans le graphe. En utilisant une structure de tas, on peut

parvenir à une implantation particulièrement efficace. On peut remarquer que les circuits dans le graphe peuvent être liés non seulement à une mauvaise orientation des arêtes (comme pour le job-shop) mais aussi aux arcs de coûts négatifs représentant les time-lags.

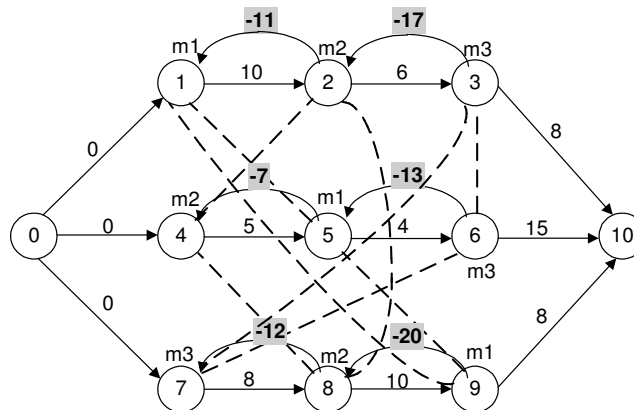
Par exemple, si l'on considère les données du tableau 4-10 et les time-lags du tableau 4-11, le graphe disjonctif non orienté qui modélise ce problème est représenté sur la figure 4-15.

<b>Job 1</b>	Machine 1, Durée : 10	Machine 2, Durée : 5	Machine 3, Durée : 8
<b>Job 2</b>	Machine 2, Durée : 5	Machine 1, Durée : 3	Machine 3, Durée : 15
<b>Job 3</b>	Machine 3, Durée : 8	Machine 2, Durée : 10	Machine 1, Durée : 8

**Tableau 4-10. Exemple de job-shop**

<b>Job 1</b>	$t_1^{\min} = 0, t_1^{\max} = 1$	$t_1^{\min} = 1, t_1^{\max} = 12$
<b>Job 2</b>	$t_1^{\min} = 0, t_1^{\max} = 2$	$t_1^{\min} = 1, t_1^{\max} = 10$
<b>Job 3</b>	$t_1^{\min} = 0, t_1^{\max} = 4$	$t_1^{\min} = 0, t_1^{\max} = 10$

**Tableau 4-11. Les time-lags associés au problème**



**Figure 4-15. Modélisation sous la forme d'un graphe d'un problème de job-shop avec des time-lags maximaux**

La gestion de la liste taboue (relativement sophistiquée) ainsi que la fonction d'aspiration sont reprises de l'algorithme initial de Nowicki et Smutnicki. Le système de voisinage reprend le système de voisinage de [LAA, 92] basé sur la notion de blocs. Chaque solution est représentée par l'ordre de réalisation des opérations sur chaque machine.

La difficulté supplémentaire liée aux time-lags réside dans le fait que certains ordres peuvent ne pas permettre de prendre en compte tous les time-lags. L'approche développée reste très proche de celle utilisée pour le HSP et qui est dérivée de [YIH, 94]. Les time-lags maximaux ne pouvant pas être pris en compte sont utilisés pour définir la fonction objectif qui est de la

forme :  $\alpha_1.H_1 + \alpha_2.H_2$  où  $H_1$  représente les time-lags qui n'ont pas pu être pris en compte et  $H_2$  la longueur du chemin le plus court dans le graphe. Les valeurs de  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  peuvent être fixées comme décrit dans le paragraphe 2.2.4.

Partant du constat que certaines solutions ne permettant pas de vérifier tous les times-lags, peuvent après plusieurs itérations, permettre l'obtention d'une solution où tous les time-lags sont vérifiés, nous avons développé plusieurs stratégies pour identifier et supprimer les time-lags maximaux. Il est possible de les introduire un par un, ou bien après un premier calcul sur le graphe contenant tous les time-lags, d'identifier le circuit dans le graphe et de supprimer le time-lag à l'origine du circuit. Une telle approche a donné des résultats intéressants pour les instances dont les time-lags maximaux sont relativement importants [CAU, 04]. Pour les instances de type no-wait et les instances avec des valeurs de time-lags maximaux "faibles" un deuxième schéma d'optimisation a donné des résultats plus intéressants en parallélisant davantage l'exploration de l'espace de recherche. Ceci est probablement dû (comme semble le montrer l'étude présentée au paragraphe 4.3.4) au faible nombre de solutions réalisables par rapport au nombre total de solutions.

### 4.3.3 Proposition d'un schéma d'optimisation pour l'exploration de solutions "irréalisables" [CAU, 05c]

L'algorithme proposé est de type algorithme génétique et contrairement à l'algorithme tabou, il code les solutions sous la forme d'un vecteur de numéros de jobs (figure 4-16).

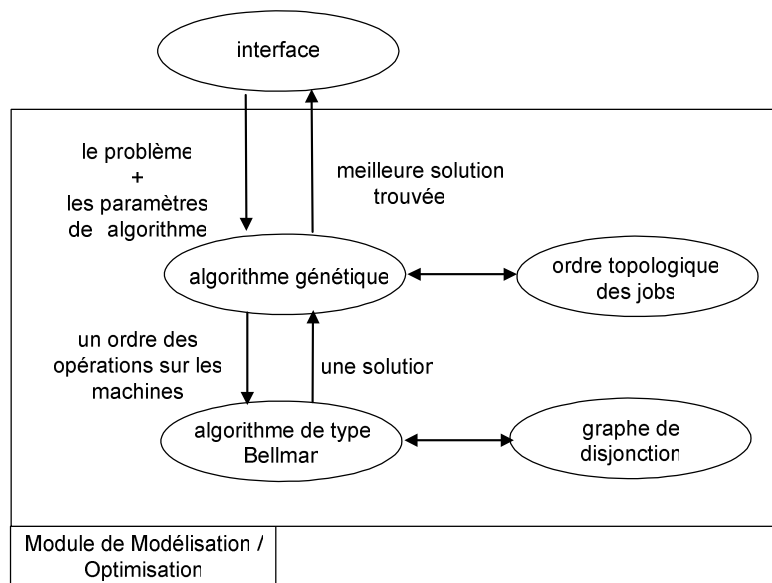
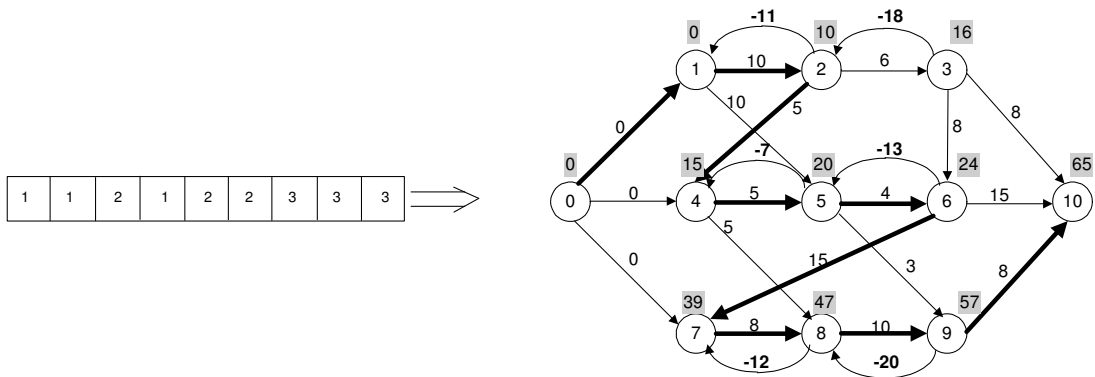


Figure 4-16. Schéma d'optimisation de type algorithme génétique

Il utilise un chromosome à valeurs dupliquées introduit en 1995 par Bierwirth [BIE, 95]. Le principe de codage est donné sur la figure 4-17.





**Figure 4-17. Un chromosome et la modélisation de la solution sous la forme d'un graphe disjointif orienté**

La détection des doubles se fait sur le graphe disjointif orienté et non pas sur le chromosome lui-même. La signature associée au chromosome est donnée par :  $\sum_i t_i^2 \pmod K$ . Le test sur la présence de doublons peut se faire en  $O(I)$  en utilisant un tableau DOUBLE. Le schéma global inclut des redémarrages (restarts) ainsi qu'une recherche locale. L'algorithme de principe est très proche de celui déjà utilisé pour le CARP (listing 4-1).

```

Construire P la population initiale avec  $nc$  individus
npi := 0 ; // numéro de l'itération courante
ni := 0 ; // nombre d'itérations successives sans amélioration
Repeat
  Choisir P1 et P2 par tournoi binaire
  Appliquer le croisement GOX pour obtenir un fils C
  Choisir un élément k dans l'intervalle [1,int(nc/2)]
  Si random < pm alors
    Appliquer la mutation à C et stocker le résultat dans S
    Si S n'est pas un double alors C := S;
  FinSi
  Si C n'est pas un double alors
    Si f(C) < f(P(nc)) alors
      npi := 0
    Sinon
      npi := npi + 1;
    FinSi;
  P[k] := C;
  Retrier la population P
FinSi
Si npi=np alors
  Effectuer un restart;
  npi := 0;
FinSi;
ni := ni + 1
Jusqu'à ce que (ni = mni) ou (f(P(nc)) = LB).

```

#### Listing 4-1. Algorithme de principe de l'algorithme génétique

#### Résultats obtenus

Dans les tableaux ci-dessous les instances sont dénommées  $N_x$  où  $N$  est le nom de l'instance de la OR-library définissant les jobs.  $x$  est un coefficient multiplicateur servant à la définition des time-lags maximaux. Tous les time-lags maximaux d'un job ont pour durée  $xm$ , où  $m$  est la durée moyenne des opérations du job. Comme les time-lags maximaux constituent la difficulté majeure du problème, les tests ont été réalisés avec des time-lags minimaux nuls. Le tableau 4-12 donne un exemple de résultats obtenus.

```

Opt   : Valeur optimale calculée par programmation linéaire
Sm    : Solution moyenne des 4 réplifications
Ecart : Ecart à l'optimum en pourcentage. Ecart = 100(Sm-Opt)/Opt
Im    : Itération moyenne de la dernière amélioration
Tm    : Temps moyen de la dernière amélioration
TTm   : Temps moyen total de l'algorithme
S*    : Meilleure solution trouvée au cours des 4 réplifications
I*    : Itération dernière amélioration (meilleure réplification)

```

Opt.	Resultats moyens sur 4 rép.					Meilleure des 4 rép.			
	Sm	Ecart(%)	Im	Tm	TTm	S*	Ecart(%)	I*	
la01_0	971	1018,25	4,87	1050392	149	280	971	0,00	511024
la02_0	937	968	3,31	921937	131	288	937	0,00	429503
la03_0	820	873,5	6,52	1181668	144	288	820	0,00	243932
la04_0	887	953,25	7,47	1374486	196	285	923	4,06	900095
la05_0	777	819	5,41	1186175	144	256	797	2,57	72014
		<b>Moyenne=</b>	<b>5,51</b>		<b>153</b>		<b>Moyenne=</b>	<b>1,33</b>	
la01_0,5	758	881	16,23	1075561	149	278	867	14,38	511636
la02_0,5	742	883,5	19,07	590076	80	285	872	17,52	230630
la03_0,5	679	735,75	8,36	1452165	211	293	685	0,88	585881
la04_0,5	703	792	12,66	763496	104	273	769	9,39	331708
la05_0,5	622	696,25	11,94	1029703	135	260	678	9,00	513089
		<b>Moyenne=</b>	<b>13,65</b>		<b>136</b>		<b>Moyenne=</b>	<b>10,24</b>	
la01_1	683	762,5	11,64	1226916	164	265	723	5,86	680175
la02_1	686	739	7,73	1126142	150	267	723	5,39	446195
la03_1	640	669,25	4,57	1299305	206	278	641	0,16	284607
la04_1	646	688	6,50	1114102	151	273	662	2,48	125350
la05_1	593	623,25	5,10	759611	92	244	615	3,71	235834
		<b>Moyenne=</b>	<b>7,11</b>		<b>153</b>		<b>Moyenne=</b>	<b>3,52</b>	
la01_2	666	666,5	0,08	755385	86	230	666	0,00	269722
la02_2	655	691,75	5,61	1394085	167	238	683	4,27	795287
la03_2	597	651,25	9,09	1195673	150	253	648	8,54	768426
la04_2	590	635,75	7,75	700388	83	245	631	6,95	151229
la05_2	593	593	0,00	346945	36	207	593	0,00	130221
		<b>Moyenne=</b>	<b>4,51</b>		<b>104</b>		<b>Moyenne=</b>	<b>3,95</b>	

Tableau 4-12. Exemple de résultats

L'algorithme génétique permet de prendre en compte le cas du no-wait job-shop. Dans le tableau 4-13, les résultats sont comparés aux résultats proposés dans deux articles récents sur le no-wait job-shop publiés en 2002 et 2003 [MAS, 02] [SCH, 03]. L'algorithme génétique donne des résultats qui sont en moyenne à 4,2% de la meilleure solution connue sur ces grandes instances. Les résultats de l'algorithme sont mêmes meilleurs que ceux de l'algorithme VNS proposé par Schuster dans [SCH, 03] et ceux des règles de priorité proposées par Mascis dans [MAS, 02].

Instances	Meill. hour.	GA				VNS [18]			GASA [18]				pdrs [17]	
		S*	Sm	Tm	%	Sm	Tm	%	S*	Sm	Tm	%	Sm	%
la06_0_0	1339	1392	1410	341	3	1431	<1	6	1339	1407	3	0	1758	23
la07_0_0	1240	1329	1360	600	6	1366	<1	9	1240	1333	2	0	1609	22
la08_0_0	1296	1385	1449	327	6	1390	<1	6	1296	1400	2	0	1580	17
la09_0_0	1447	1504	1560	327	3	1586	<1	8	1447	1525	3	0	2430	40
la10_0_0	1338	1386	1432	562	3	1527	<1	12	1338	1435	2	0	1506	11
la11_0_0	1825	1903	1937	961	4	1915	<1	4	1825	1883	6	0	2226	18
la12_0_0	1631	1705	1728	806	4	1694	<1	3	1631	1686	5	0	1935	15
la13_0_0	1766	1843	1875	877	4	1907	<1	7	1766	1848	6	0	1867	5
la14_0_0	1805	1887	1943	1159	4	2313	<1	21	1805	1916	6	0	2381	24
la15_0_0	1829	1931	1960	1188	5	1898	<1	3	1829	1932	6	0	2134	14
	Moy.				4,2			7,9				0		18,9

Tableau 4-13. Evaluation de l'algorithme génétique sur des instances de no-wait job-shop

### 4.3.4 Proposition d'un schéma d'optimisation basé sur des règles de priorité [CAU, 05b]

#### Principe

Le principe de génération de solutions, introduite par Giffler et Thomson en 1960 [GIF, 60] repose sur 4 étapes principales (listing 4-2).

```

U := O           // Opérations non encore ordonnancées
S := Ø          // Opérations ordonnancées
Tant que U ≠ Ø faire
    E := Eligible(U,S);      // Opérations éligibles
    Evaluate ti, ∀i ∈ E      // Evaluation de la date
    F := Restriction(E,U,S) // Déterminer F un sous-ensemble de E
    o := Rule(F)             // Choix d'une opération
    S := Update(S,O)        // Ajout de o dans S
    U := U - {o}            // Suppression de o dans U
Fin Tant Que

```

#### Listing 4-2. Algorithme de principe pour la génération de solutions avec des règles de priorité

Il s'agit dans un premier temps de déterminer l'ensemble des solutions éligibles par rapport aux opérations déjà placées dans l'ordonnancement en cours de construction et d'évaluer la date de début au plus tôt de chaque opération.  $F$  est un ensemble construit en fonction du type de solutions recherchées (semi-actives, sans délais...). Une règle de priorité permet ensuite de choisir une opération  $o$  (un grand nombre de règles sont applicables [HAU, 89]). La dernière étape consiste à ajouter l'opération  $o$  dans  $S$  et de supprimer  $o$  de l'ensemble  $U$ .

La difficulté pour appliquer un tel schéma au problème du job-shop avec time-lag réside dans le fait que l'ajout d'une opération dans un ordonnancement en cours de construction peut entraîner la remise en cause partielle ou totale de l'ordonnancement déjà construit. Dans cette optique une procédure de réparation a été proposée dans [CAU, 05b]

#### Résultats obtenus

Les résultats mettent en évidence la difficulté liée à la génération de solutions réalisables et montrent la qualité très médiocre des solutions obtenues par des heuristiques constructives.

Dans le tableau 4-14 la colonne "Canonical Schedule" fait référence aux solutions où toutes les opérations d'un job sont placées, puis suivies de toutes les opérations d'un autre job...etc... ceci aboutissant trivialement à une solution réalisable (respectant tous les time-lags). La colonne "Sequence" fait référence à des solutions générées aléatoirement et la colonne Rules à des solutions générées par le schéma présenté précédemment avec une procédure de réparation.

		canonical	sequence		Rules
inst		sched.	dev	# feas.	dev
la01-05	0	75,9%	nf	0%	52,1%
	0,5	121,4%	nf	0%	75,1%
	1	132,0%	nf	0%	53,9%
	2	145,1%	nf	0%	33,6%
	average:	129,8%		0,0%	54,1%
car05-08	0	9,6%	nf	0%	15,2%
	0,5	10,3%	nf	0%	13,2%
	1	9,8%	nf	0%	13,5%
	2	7,7%	nf	0%	14,3%
	average:	9,4%	nf	0,0%	14,0%
la06-08	0	71,5%	nf	0%	61,1%
	0,5	104,1%	nf	0%	63,2%
	1	126,3%	nf	0%	56,6%
	2	130,2%	nf	0%	58,5%
	10	167,2%	23,8%	10%	8,5%
average:	119,8%	nf	2,0%	49,6%	

**Tableau 4-14. Mise en évidence de la difficulté d'obtention de solutions réalisables de "bonne qualité" (nf : No Feasible solution) sur les instances de Laurence**

Ce tableau met en évidence, d'une part qu'il est très difficile d'obtenir une solution réalisable en tirant de manière aléatoire les solutions, et d'autre part que les solutions évidentes (Canonical Schedules) sont des solutions de très mauvaise qualité.

La génération de solutions basées sur des règles de priorité permet d'obtenir des solutions intéressantes bien que très éloignées de la solution optimale : elle ouvre la voie à un couplage avec des méthodes itératives de recherche.

#### 4.3.5 Conclusion sur les travaux réalisés pour le job-shop

Les travaux entrepris sur le job-shop ont comme objectif l'extension du modèle pour permettre l'étude d'ateliers de type HSP et SFP. Une première étape a été franchie dans cette direction avec une étude poussée des time-lags. Les méthodes proposées ont l'ambition d'être générales et de pouvoir traiter n'importe quel type de problèmes comportant des time-lags. Actuellement nous nous intéressons aux contraintes de transport, en repartant des travaux de P. Brucker entre autres. Nos travaux sur le job-shop et ses extensions sont les plus récents et notre objectif à terme consiste à modéliser les problèmes des HSP et des SFP comme des job-shops (avec extensions) et à proposer des schémas d'optimisation.

## 4.4 Bilan des travaux sur les ateliers à ressources de transport

Les points les plus développés concernent les HSP et les SFP et nos travaux récents incluent le job-shop avec comme objectif de parvenir au job-shop avec transport. A l'exception du

HSP, les études réalisées portent uniquement sur le cadre déterministe. Il semble important de développer :

- les travaux sur le job-shop avec time-lags pour finalement aboutir au job-shop avec transport ;
- les travaux sur les SFP afin de prendre en compte plusieurs chariots.

Le cadre stochastique devrait être aussi une préoccupation importante pour déterminer des solutions, soit robustes, soit flexibles en repartant, par exemple, des travaux sur la notion de groupes.

## 5 Les problèmes de l'optimisation stochastique

Nous avons choisi de présenter notre démarche d'analyse des problèmes stochastiques car les problèmes déterministes ont déjà fait l'objet de présentations nombreuses et très détaillées. Les modèles stochastiques d'ordonnement existent, mais ils ne sont pas nombreux et ceci est probablement dû à "la complexité extrême du problème" [DOL, 00]. Récemment Gérard Fleury dans son mémoire d'habilitation dresse un panorama quasi-exhaustif des méthodes stochastiques applicables à la résolution des problèmes d'ordonnement/planification. Il situe chaque méthode à la fois dans son cadre théorique (conditions théoriques de convergence par exemple) et dans son cadre applicatif. Concernant les méthodes exactes, un très grand nombre d'états de l'art sont disponibles pour presque tous les problèmes théoriques (flow-shop, job-shop,...).

Pour notre part, nous consacrons ce chapitre aux méthodes générales applicables à la détermination de solutions robustes. Il ne s'agit pas d'un état de l'art, mais d'une présentation de notre méthodologie de travail sur ce type de problèmes.

### 5.1 Introduction

Les problèmes auxquels nous nous intéressons se ramènent à la minimisation d'une fonction sur un espace d'états fini, et sont en général *NP*-Complets. Derrière la minimisation d'une fonction, on retrouve en général deux types de problèmes, généralement concrets, et ayant un intérêt pratique important.

D'une part ceux pour lesquels la fonction à optimiser est aléatoire et qui peut avoir un impact temporel hautement non linéaire. Ce peut être, par exemple, dans un problème d'atelier, des fluctuations des temps d'usinage ou de transport, ou bien une demande imparfaitement connue.... Parfois, l'impact des aléas peut être négligé, et l'on se contente de résultats en moyenne, éventuellement assortis d'un écart-type. Par contre, dans d'autres systèmes, des effets hautement non linéaires rendent stratégique l'obtention de solutions à la fois robustes aux aléas et de bonne qualité, ce qui constitue généralement deux exigences contradictoires.

D'autre part, on retrouve les problèmes multi-objectifs qui ont pour ambition l'obtention non pas d'une solution mais d'un ensemble de solutions comparables. Par exemple, dans un atelier, il s'agit de minimiser le temps de production, tout en limitant les en-cours et en maximisant le taux d'occupation des machines ou en répartissant la charge. Ce sont des problèmes déterministes difficiles à résoudre par des méthodes classiques, et pour lesquels on

peut envisager des méthodes d'optimisation "moins classiques" tels que l'optimisation particulière, scatter search, algorithme de fourmis...

Les méthodes existantes sont, à des rares exceptions près, prévues pour un problème particulier et exploitent en général les caractéristiques de ce problème. Il y a un fort besoin d'élargir leur champ d'application : ajouter de nouvelles contraintes, lever des hypothèses restrictives d'applications, affiner la modélisation des phénomènes vus comme stochastiques... tout ceci dans le but d'étendre ces méthodes au cas stochastique, si possible.

Qu'il s'agisse d'un problème de conception ou d'exploitation du système on se ramène à la minimisation d'une fonction sur un espace d'états fini mais généralement de très grande cardinalité.

Soit  $\mathcal{X}$  un ensemble fini (ensemble des états)

Soit  $h$  une fonction déterministe définie sur  $\mathcal{X}$  à valeurs dans  $\mathbb{N}$  ou bien dans  $\mathbb{N} \cup \{+\infty\}$

Soit  $\eta$  est une fonction aléatoire, définie sur  $\mathcal{X}$ , à valeurs dans  $\mathbb{N} \cup \{+\infty\}$  représentant le bruit.

On définit  $H$  une fonction aléatoire définie sur  $\mathcal{X}$ , à valeurs dans  $\mathbb{N} \cup \{+\infty\}$ , par :

$$\forall x \in \mathcal{X}, H(x) = h + \eta(x)$$

Ainsi, on peut considérer que le problème à résoudre est le suivant :

Rechercher un état optimal, c'est-à-dire un état  $x$  tel que :

$$\forall y \in \mathcal{X}, P\{H(x) \leq H(y)\} \geq P\{H(x) \geq H(y)\}$$

La présence de valeurs infinies dans la fonction correspond à des solutions irréalisables ou qui génèrent des coûts de mises en œuvre tellement élevés que ces solutions n'ont pas d'intérêt pratique.

**Notons :**

$X$  l'ensemble fini des états que peut prendre un système soumis à des aléas.

Le hasard est modélisé par l'espace probabilisé  $(\Omega, \mathcal{F}, P)$  ( $\Omega$  peut être infini).

$H(x, \omega)$  peut représenter, par exemple, le temps de production lorsque le système est dans l'état  $x$  et qu'il est soumis aux événements aléatoires modélisés par  $\omega$ .

$T: X \rightarrow [0; \infty]$  est défini par : pour tout état  $x$ ,  $T(x)$  est la borne inférieure essentielle de  $H(x, \cdot)$  c'est-à-dire  $T(x) = \text{SUP}\{t / P(H(x, \cdot) \leq t) = 0\}$ .



$T(x)$  ne peut généralement pas être réalisé à cause des événements aléatoires qui perturbent la production, et parce que nous utilisons des valeurs moyennes pour les temps de cycle, les temps de transport. On peut d'ailleurs avoir  $P\{H(x,.) \leq T(x)\} = 0$  aussi bien que  $P\{H(x,.) \leq T(x)\} > 0$  selon que  $P\{H(x,.) = T(x)\} = 0$  ou que  $P\{H(x,.) = T(x)\} > 0$ .

Il est alors possible de distinguer les états du tableau 5-1 dans lequel  $\varepsilon$  est fixé et  $0 < \varepsilon < 1$ .

Ensemble	Etat x	Caractéristique
$X_0$	non bloquant	$P\{H(x,.) = \infty\} = 0$
$\overline{X_0}$	bloquant	$0 < P\{H(x,.) = \infty\} \leq 1$
$I$	toujours bloquant	$P\{H(x,.) = \infty\} = 1$
$X_\varepsilon (0 < \varepsilon < 1)$	$\varepsilon$ -peu-bloquant	$P\{H(x,.) = \infty\} < \varepsilon$

**Tableau 5-1. Les différents états possibles**

Suivant les cas, il est alors possible de rechercher une ou plusieurs solutions  $\varepsilon$ -peu-bloquantes dans l'ensemble de toutes les solutions possibles.

Il existe un très grand nombre de méthodes (exactes ou approchées) permettant d'optimiser des fonctions discrètes, même dans le cas peu favorable où le nombre d'états à envisager est très grand. Par contre, il peut être noté que le nombre de travaux portant sur l'optimisation stochastique de telles fonctions est bien moins important, sans doute à cause de la très grande difficulté de modélisation et de résolution.

Sans chercher à être exhaustif, les méthodes peuvent être regroupées en thèmes suivants :

- les techniques de programmation stochastique et dynamique ;
- les modèles linéaires stochastiques et quadratiques ;
- la programmation dynamique ;
- les métaheuristiques.

Une présentation détaillée des méthodes de programmation linéaire stochastique et de leurs champs d'application est donnée dans [ROC, 02]

Les techniques de programmation stochastique et dynamique proposent une démarche qui consiste à prendre une décision à un instant précis au cours du temps et ensuite à prendre en compte les conséquences de cette décision à un instant suivant. On parle de 'Recourse

Decision' en anglais. Les décisions prises prennent en compte les informations devenues maintenant disponibles. C'est sur ce point particulier qu'on utilise une modélisation sous forme de variable aléatoire. Des techniques numériques sont nécessaires pour permettre une représentation correcte et adaptée des conséquences d'une décision.

Généralement, des hypothèses de convexité sont nécessaires pour qu'une telle approche puisse être mise en œuvre. De plus, les probabilités liées aux conséquences d'une décision sont supposées indépendantes de la décision prise. Les techniques de modélisation sous forme de programme linéaire stochastique sont applicables chaque fois que les différents éléments du modèle sont linéaires ou linéarisables. Les hypothèses nécessaires à la mise en œuvre de telles méthodes portent essentiellement sur la convexité de la fonction. Des remarques similaires sont aussi valables pour les modèles quadratiques.

La mise en œuvre de telles approches passent aussi par l'utilisation d'algorithmes de coupe (cutting plane algorithm), de relaxation lagrangienne, de génération de colonnes...

A l'opposé de ces approches exactes de résolution, on peut citer les méthodes itératives de minimisation de variables aléatoires. Les algorithmes existants exploitent la structure du problème et nécessitent des hypothèses restrictives sur les lois de probabilité (loi normale, uniforme...) pour être dans un cadre où la convergence puisse être prouvée. Gérard Fleury, en 1993, est l'auteur d'un algorithme d'optimisation d'une variable aléatoire dont on peut démontrer la convergence en probabilité sans faire d'hypothèses très restrictives sur le système et la modélisation des événements aléatoires. Une première démonstration est proposée dans [FLE, 93] puis une deuxième plus détaillée dans [FLE, 99b].

## 5.2 Difficultés de l'optimisation stochastique avec des algorithmes itératifs

Il est assez curieux de remarquer que dans le cadre de l'optimisation d'une variable aléatoire, les idées les plus simples sont rarement les meilleures ou sont même complètement mauvaises. Contrairement au cas déterministe la comparaison de deux solutions  $x$  et  $y$  n'est pas triviale car la relation " $x < y$  Si  $H(x) < H(y)$ ", qui se lit  $x$  est préférable à  $y$  si le coût de  $x$  est inférieur à celui de  $y$ , est une relation "aléatoire". Pour être précis, on devrait écrire  $H(x, \omega)$  formule dans laquelle  $\omega$  symbolise les aléas. Chaque évaluation de  $H(x, \omega)$  donne lieu à une nouvelle valeur. La manière la plus naturelle de traiter ce problème consiste alors à remplacer la fonction  $H$ , qui est la réalisation d'une variable aléatoire, par une fonction déterministe  $h$  représentative de la fonction initiale.

Cette transformation n'est pas très difficile dans la plupart des problèmes étudiés en optimisation combinatoire. En effet, généralement,  $H$  dépend d'un grand nombre de variables aléatoires  $Q_i$  qui peuvent être remplacées par leurs valeurs moyennes  $q_i$ . Cette

technique peut s'avérer inappropriée lorsque les aléas ont des effets fortement non linéaires sur  $H$ . Dans ce cas, une solution  $x$  peut devenir non réalisable avec une probabilité qu'on ne peut plus négliger.

Dans l'exemple d'un atelier de traitement de surfaces (HSP) une solution devient très facilement irréalisable dès lors qu'une variation même minime d'un temps de transport provoque une ou plusieurs violations des temps de trempe des produits.

Dans ce cas, une bonne idée, a priori, consiste à remplacer  $H$  par une estimation de sa moyenne (si elle existe)  $h = \overline{H}$  ou bien par une autre fonction déterministe. Mais lorsque  $H$  prend des valeurs infinies ou très grandes, il est utile, comme nous l'avons souligné dans le paragraphe 5.1, de rechercher des solutions  $x$  ayant une faible probabilité d'atteindre ces valeurs, *i.e.* telles que  $P\{H = \infty\}$  soit nulle ou tout au moins inférieure à une valeur fixée à l'avance  $\varepsilon$ .

Une idée consiste à estimer  $\overline{H}$  par exemple avec  $\overline{H(x,n)}$  où  $n$  est le nombre de répliques pour la solution  $x$ . Cela implique que le nombre  $n$  est un nombre suffisamment grand pour que  $\overline{H(x,n)}$  soit une estimation correcte de la moyenne  $\overline{H(x)}$ .

L'algorithme de base, très coûteux en temps de calcul, possède un schéma proche de celui donné sur la figure 5-1.

- 
1. Calculer une solution initiale  $x$
  2. Calculer  $\overline{H(x,n)}$
  2. **Répéter**
  - 3.1. Générer une solution  $y$
  - 3.2. Calculer  $\overline{H(y,n)}$
  - 3.3. **Si**  $\overline{H(y,n)} \leq \overline{H(x,n)}$  **Alors**  
 $x \leftarrow y$
  - 3.5. **FinSi**
  4. **Jusqu'à ce que** (un critère d'arrêt soit vérifié)
  5. **Renvoyer**  $x$  comme résultat
- 

**Figure 5-1. Principe général d'un algorithme de minimisation d'une variable aléatoire**

On peut remarquer qu'un grand nombre de métaheuristiques dérivées du recuit simulé possèdent des extensions (similaires à celle présentée sur la figure 5-1) pour traiter les

problèmes stochastiques comme par exemple [TSU, 97] [BRA, 98]. En 2001, Jensen [JEN, 01] propose une introduction très intéressante aux problèmes de robustesse.

### 5.3 Proposition de schémas d'optimisation

La principale difficulté de mise en œuvre de schémas d'optimisation dans le cadre stochastique réside dans le coût de chaque itération de ces algorithmes. Pour obtenir une estimation satisfaisante de  $\overline{H(x)}$ , un nombre important de répliques doivent être réalisées si on veut une estimation correcte.

Une avancée significative est réalisée par l'algorithme ASOVA [FLE, 93] [FLE, 99b]. Cet algorithme augmente la valeur de  $n$  au fur et à mesure des itérations, faisant ainsi décroître la probabilité de se tromper en acceptant la transition  $x \leftarrow y$  tout en ménageant le temps de calcul. Dans l'algorithme qui suit il est possible de borner  $N(n)$ .

Si l'on ne sait pas expliciter les états  $\varepsilon$ -peu bloquants, il suffit de faire  $n$  simulations stochastiques indépendantes avec  $n$  tel que  $\varepsilon^n < 0.01$  par exemple, et de rejeter  $x$  dès qu'il a présenté un blocage. Ceci peut nécessiter un grand nombre d'appels au modèle de simulation stochastique !

La figure 5-2 donne l'algorithme de principe pour l'optimisation stochastique d'une variable aléatoire. Dans cet algorithme trois états sont mémorisés :

l'état courant  $x_n$  de coût  $q_n$  en  $N(n)$  essais

l'état record  $u_n$  de coût record  $r_n$  en  $N(n)$  essais

l'état candidat  $y$  voisin de  $x$ .

Les états  $x_n$  et  $u_n$  n'ont pas montré de blocage en  $N(n)$  essais indépendants.

Dans l'algorithme de la figure 5-2, nous utilisons le qualificatif "candidat" pour  $y$ , de "record" pour  $u_n$  et de "courant" pour  $x_n$ .

Choisir un état  $x_0$  tel que une fois on ait eu  $H(x_0) < \infty$ .

$r_0 \leftarrow H(x_0)$        $q_0 \leftarrow H(x_0)$        $u_0 \leftarrow x_0$        $N(0) \leftarrow 1$

**Tant que** nécessaire faire

    Tirage aléatoire de  $y$  dans  $V(x_n)$

**Répéter**  $N(n)$  fois      Tirage de  $H(y)$       **Fin Répéter**

**Si** (il n'y a pas eu de blocage en  $N(n)$  essais) **alors**

$w \leftarrow$  minimum des valeurs  $H(y)$  obtenues

        Tirer  $s \leftarrow H(y)$

**Si** ( $s$  est fini) **alors** (pas eu de blocage pour le candidat en  $N(n)+1$  essais)

            Tirer  $t \leftarrow H(u_n)$

**Si**  $t$  est fini **alors** (pas de blocage du record en  $N(n)+1$  essais)

**Si**  $\text{minimum}(s,w) \leq \text{minimum}(t,r_n)$  **alors**

**Si**  $\text{minimum}(s,w) < \text{minimum}(t,r_n)$  **alors**

                        (nouveau record en  $N(n)+1$  essais)

$u_{n+1} \leftarrow y$        $r_{n+1} \leftarrow \text{minimum}(s,w)$

**Sinon**

$u_{n+1} \leftarrow u_n$        $r_{n+1} \leftarrow \text{minimum}(t,r_n)$

**FinSi**

$x_{n+1} \leftarrow y$        $q_{n+1} \leftarrow s$

**Sinon**

                    (même record en  $N(n)+1$  essais)

$u_{n+1} \leftarrow u_n$        $r_{n+1} \leftarrow r_n$

**Si** ( $s \leq q$ ) **alors** (nouvel état courant)

$x_{n+1} \leftarrow y$        $q_{n+1} \leftarrow s$

**Sinon**

$x_{n+1} \leftarrow x_n$        $q_{n+1} \leftarrow q_n$

**FinSi**

**FinSi**

**Sinon**

                    (le record ne convient pas en  $N(n)+1$  essais, le candidat convient)

                    (nouveau record, nouveau record en  $N(n)+1$  essais)

$u_{n+1} \leftarrow y$        $r_{n+1} \leftarrow \text{minimum}(s,w)$

$x_{n+1} \leftarrow y$        $q_{n+1} \leftarrow s$

**FinSi**

$N(n) \leftarrow N(n)+1$

**Sinon**

            (le candidat a eu un blocage en  $N(n)+1$  essais et aucun en  $N(n)$  essais)

            (même record, même record en  $N(n)$  essais)

$u_{n+1} \leftarrow u_n$        $r_{n+1} \leftarrow r_n$

$q_{n+1} \leftarrow q_n$        $x_{n+1} \leftarrow x_n$

**FinSi**

**FinSi**

**FinTantQue**

Figure 5-2. Algorithme pour l'optimisation stochastique d'une variable aléatoire [FLE, 93] [FLE, 99b]

Ce type d'algorithme a été utilisé pour la résolution du Stochastic HSP [FLE, 01] et pour la résolution d'un problème d'ordonnancement de type flow-shop hybride [FLE, 99a].

Afin de donner aux solutions les propriétés de robustesse souhaitées, les études peuvent être réalisées avec une fonction objectif prenant en compte :  $\sigma_H(x, n)$  une estimation de l'écart type sur le coût de la solution ainsi que  $\overline{H(x, n)}$  une estimation de la valeur moyenne du coût. Ces deux critères peuvent alors, de manière classique en ordonnancement, être combinés dans une fonction coût unique du type  $F(x) = \alpha_1 \times \overline{H(x, n)} + \alpha_2 \times \sigma_H(x, n)$ . En choisissant judicieusement les valeurs de  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  on peut ainsi contrôler l'importance relative des deux critères. En choisissant  $\alpha_2 = 1$  et  $\alpha_1$  tel que le  $Min(\alpha_1 \times \overline{H(x, n)}) > Max(\alpha_2 \times \sigma_H(x, n))$ , on se place facilement dans le contexte d'une optimisation hiérarchique stricte.

Mais d'autres critères peuvent être envisagés, en particulier s'il existe des solutions  $\varepsilon$ -peu-bloquantes. Dans ce cas, s'il n'existe pas de solution non bloquante, on peut parvenir à identifier une solution très peu bloquante, c'est-à-dire une solution ayant une probabilité de blocage faible. L'utilité d'une telle approche pour le HSP est évidente.

Une approche complémentaire consiste à remplacer les évaluations des critères  $(\sigma_H(x, n), \overline{H(x, n)})$  par les valeurs réelles  $(\sigma_H(x), \overline{H(x)})$ . Si on dispose d'une expression mathématique, alors le problème stochastique se ramène à un problème déterministe et tous les algorithmes "classiques" sont utilisables pour la détermination de solutions robustes.

C'est cette approche que nous avons privilégiée lors de nos études récentes pour la détermination de solutions robustes. Pour les problèmes de tournées sur arcs, il est possible de considérer que les quantités à collecter sont la somme de petites quantités indépendantes. S'il s'agit de déchets ménagers, les petites quantités sont les déchets des maisons individuelles par exemple. Sous l'hypothèse que les quantités à collecter sur chaque arc sont des variables aléatoires indépendantes, il est possible d'exprimer analytiquement  $\sigma_H(x)$  et  $\overline{H(x)}$ . L'hypothèse d'indépendance exclut les phénomènes tels que les jours fériés par exemple. Mais cela ne constitue pas une limitation, car les collectes qui suivent ces jours "spéciaux" sont des tournées spécifiques où le nombre de camions et le nombre de passages sont adaptés à la hausse importante et locale des quantités à collecter. Le schéma d'optimisation proposé pour le CARP (déterministe) peut alors être utilisé pour la recherche de solutions robustes aux fluctuations des quantités à collecter.

On peut noter que des réflexions parallèles aux nôtres sont menées actuellement [CAB, 04]

## 5.4 Conclusion

L'optimisation de variables aléatoires permet de mieux prendre en compte la réalité des phénomènes. L'obtention de solutions robustes permet de simplifier grandement le pilotage d'un système en évitant de trop fréquents calculs de solutions.

Appréhender des solutions stochastiques est particulièrement difficile car il s'agit d'évaluer généralement une moyenne, un écart-type ou tout autre information statistique jugée pertinente pour l'étude. L'une des difficultés réside dans l'identification de critères statistiques appropriés ainsi que dans leur évaluation.

L'estimation de valeurs statistiques, comme la moyenne par exemple, au travers de  $n$  répliquions indépendantes, est une technique très coûteuse en temps de calcul. Une approche pertinente consiste à remplacer ces estimations par les valeurs exactes calculées au travers d'expressions mathématiques. Si les variables suivent une loi connue, il est alors relativement aisé dans certains cas, d'obtenir des formules mathématiques pour la moyenne et l'écart-type par exemple.

Les méthodes utilisables dans les cas stochastiques sont peu nombreuses et sont généralement très consommatrices de temps de calcul. La démarche que nous tentons de promouvoir est fondée sur des formules mathématiques pour travailler avec des valeurs exactes à la place de leur estimation et sur l'utilisation d'algorithmes "classiques" d'optimisation.

Nous avons souligné, au début de notre exposé, que nous considérons comme important de valider, de comparer différents modèles d'un même problème. L'utilisation de méthodes exactes pour la résolution de problèmes stochastiques paraît importante pour estimer, sur de petites instances, la performance des méthodes proposées par rapport à une solution optimale. Leur mise en œuvre est généralement limitée à cause des hypothèses simplificatrices nécessaires, ou bien à cause de la combinatoire. Il s'agit d'une voie que nous n'avons pas encore explorée mais qui semble intéressante. Par exemple, sur les problèmes de SFP (Systèmes Flexibles de Production), on dispose d'un modèle linéaire très complet dont les résultats peuvent être comparés avec ceux obtenus par d'autres méthodes. Il serait intéressant de compléter l'étude dans le cadre stochastique en adoptant la même démarche que celle mise en œuvre dans le cas déterministe.







## 6 Développement de systèmes d'aide à la décision

### 6.1 Introduction

Dans les chapitres précédents, nous avons présenté notre contribution à la résolution de problèmes d'ordonnancement dans le cadre des systèmes de production. Nous avons essayé de définir différentes démarches de résolution pour la plupart fondées sur des couplages entre algorithmes stochastique/règles de priorité, branch-and-bound/règles de priorité, algorithme stochastique/méthode de plus court chemin, avec comme support des différents algorithmes une représentation du problème sous la forme d'un graphe et/ou d'un modèle de simulation.

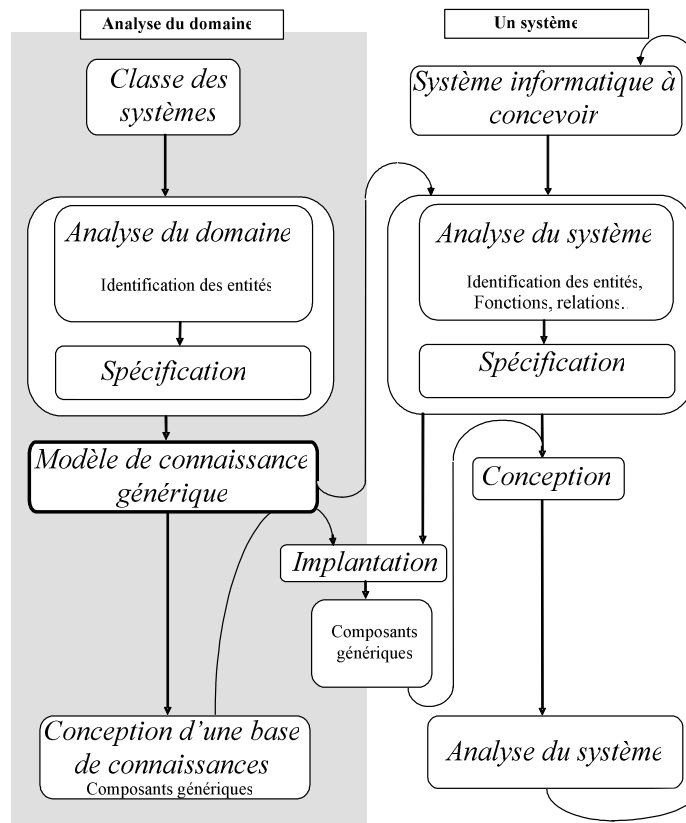
Dans ce chapitre, nous présentons un ensemble de modèles qui résume notre expérience dans le domaine de la réalisation d'outils d'aide à la décision. Ces modèles pourraient être utilisés dans le développement ou l'intégration de tels systèmes au sein d'un système d'information plus vaste. Les éléments de base de notre réflexion à ce sujet ont fait l'objet d'une publication en 2003 dans la revue IJCIM [GOU, 03] et concernent la conception d'un système de pilotage d'une ligne de traitement de surfaces. Cette réflexion s'est ensuite enrichie dans le cadre d'une étude réalisée pour la société Pyram et a abouti au développement d'un système d'aide à la conception de tournées. Le système développé est basé sur le modèle théorique du VRP hétérogène et a donné lieu à deux publications [SOU, 05] LAC, 05b]. L'étude réalisée est une étude de faisabilité.

### 6.2 Notion d'environnement de modélisation

Les travaux réalisés dans le cadre des systèmes d'aide à la décision s'inscrivent dans la continuité des travaux menés dans l'équipe sur les méthodologies de modélisation [BRE, 90] [GOU, 91] [KEL, 92] et poursuivis dans les thèses de [RUC, 94] et [TCH, 97] par exemple.

Ces travaux s'appuient sur deux éléments (figure 6-1) :

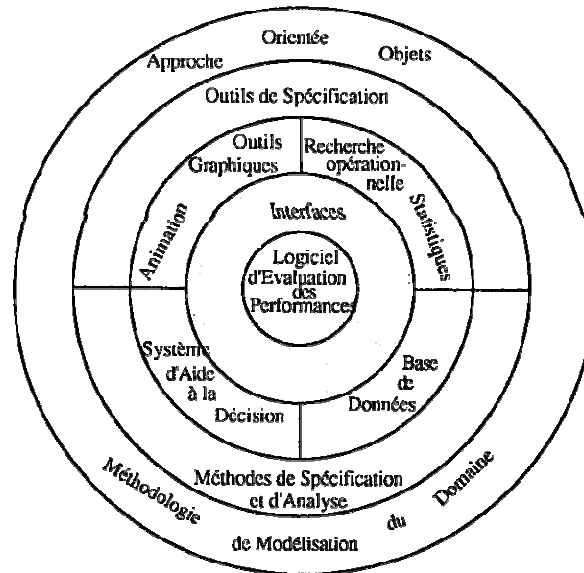
- lors de l'étude d'une classe de systèmes, il est souhaitable de formaliser la connaissance acquise et de la spécifier: il s'agit d'une analyse du domaine.
- l'étude d'un nouveau système peut s'appuyer sur la connaissance formalisée pour la classe de systèmes.



**Figure 6-1. Analyse du domaine et étude d'un système particulier selon la méthodologie ASCI**

La démarche ASCI (Analyse, Spécification Conception Implémentation a été construite à la suite de nombreuses études concernant la modélisation et l'évaluation des systèmes complexes (systèmes industriels, systèmes de transport,...). L'idéal est de parvenir à la conception d'un environnement de modélisation (ce terme est à prendre ici au sens large) qui implémente les différents outils nécessaires à toutes les étapes de la méthodologie.

La méthodologie préconise une représentation sous la forme d'une cible (figure 6-3) qui correspond à la notion d'atelier de génie logiciel pour la modélisation et l'évaluation des performances. L'obtention d'un tel environnement est un idéal difficile à atteindre, nécessitant beaucoup de temps et qui requiert une grande expertise du domaine.



**Figure 6-2. Environnement de modélisation pour l'évaluation de performance**

La mise en œuvre d'ASCI repose sur l'utilisation de méthodes de spécification tels que les modèles E/A (Entités/Associations), SADT (Structured Analysis and Design Technic) [IGL, 93] ou approche objets. Ces méthodes permettent de construire un modèle de connaissance générique pour un domaine particulier. C'est l'application d'une telle démarche qui a permis la création des modèles E/A proposés dans [RUC, 94] et qui spécifie le fonctionnement de certaines entités telles que les stations ou les chariots. Il est évident que l'obtention de ces modèles ne peut se faire qu'après de nombreuses applications de la méthodologie qui, à chaque fois qu'elle est appliquée, doit permettre de mettre à jour les modèles génériques. Le cœur de l'environnement peut différer d'un problème à l'autre [TCH, 97].

### 6.3 Notre contribution

Nous avons appliqué la démarche ASCII pour définir un environnement, d'une part pour la conception de systèmes d'aide à la décision intégrés à un système de gestion et d'autre part pour la conception de systèmes d'Aide à la Conception de tournées. Pour chacune de ces études, nous avons formalisé la connaissance des experts industriels en dégageant les points que ceux-ci considéraient comme importants. Le but final est de définir les éléments à mettre en œuvre au sein de ces environnements afin d'atteindre les objectifs de modélisation.

La première étude concerne l'intégration d'un outil d'aide à la décision à un système de gestion. Nous proposons trois vues complémentaires : une vue fonctionnelle (sous la forme d'une cible), une autre sous la forme de modèles SA/RT [HAT, 91]) et finalement une vue dynamique, basée sur les réseaux de Petri [ROZ, 93]. La deuxième étude concerne la proposition d'un système d'Aide à la Conception de Tournées. Nous proposons une

description fonctionnelle d'un tel système en mettant en évidence les liens entre les différents modules.

Dans les deux cas, les études ont donné lieu à la réalisation de maquettes informatiques dont les fonctionnalités ont été validées par les experts industriels.

## 6.4 Proposition d'un système d'aide à la décision intégré à un système de gestion

Un système d'aide à la décision doit être capable de fournir des solutions utilisables par le logiciel de supervision du système modélisé lequel a pour tâche de faire exécuter ce planning au logiciel de pilotage des entités physiques du système (figure 6-3). Nous mettons en évidence les données issues du système d'information de l'entreprise que nous résumons sous le terme générique de base de données. En pratique, il faut comprendre le terme base de données comme une connexion à un logiciel intégré présent dans l'entreprise (par exemple SAP-Software Application Product). Les informations arrivant alors sont les commandes clients, validées dans le logiciel de gestion intégré et qu'il faut satisfaire en lançant la production. Sur la figure 6-3, les flèches sans légende représentent des échanges d'informations qui ont lieu le plus souvent en mode interactif sous la forme d'un dialogue homme/machine.

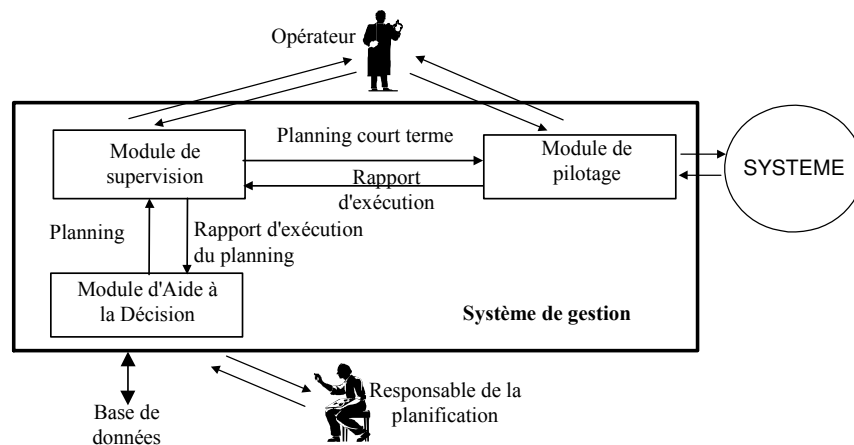


Figure 6-3. Intégration d'un outil d'Aide à la Décision dans un système de gestion

D'un point de vue fonctionnel, il est possible de représenter le système comme une cible avec, en son centre, le système dont on souhaite assurer le pilotage (figure 6-4). L'intérêt de cette représentation est de mettre en évidence les fonctionnalités des modules.

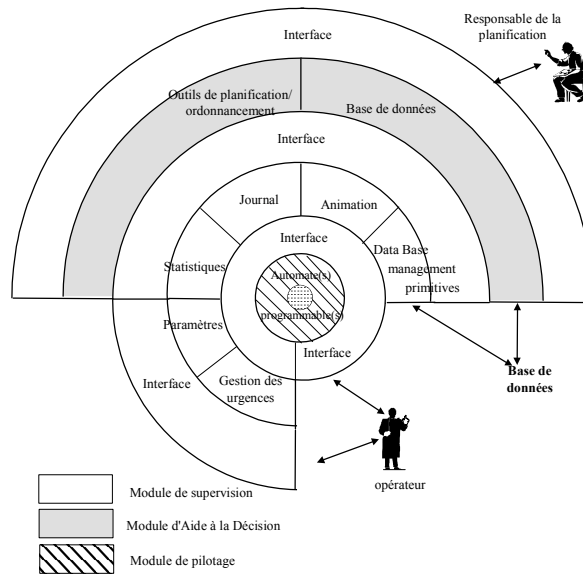


Figure 6-4. Vue fonctionnelle

La figure 6-5 est le modèle simplifié du Réseau de Petri que nous proposons dans [GOU, 03]. Dans cette version simplifiée, nous faisons apparaître que le modèle d'aide à la décision peut être sollicité de trois manières différentes :

- pour réaliser une planification à la demande du responsable de la planification, cas qu'on pourrait nommer "normal" ;
- pour traiter une planification qui doit prendre la suite de la planification précédente ce qui rajoute la contrainte de prise en compte de l'état courant ;
- pour traiter une planification car un événement imprévu (aléa, panne) s'est produit.

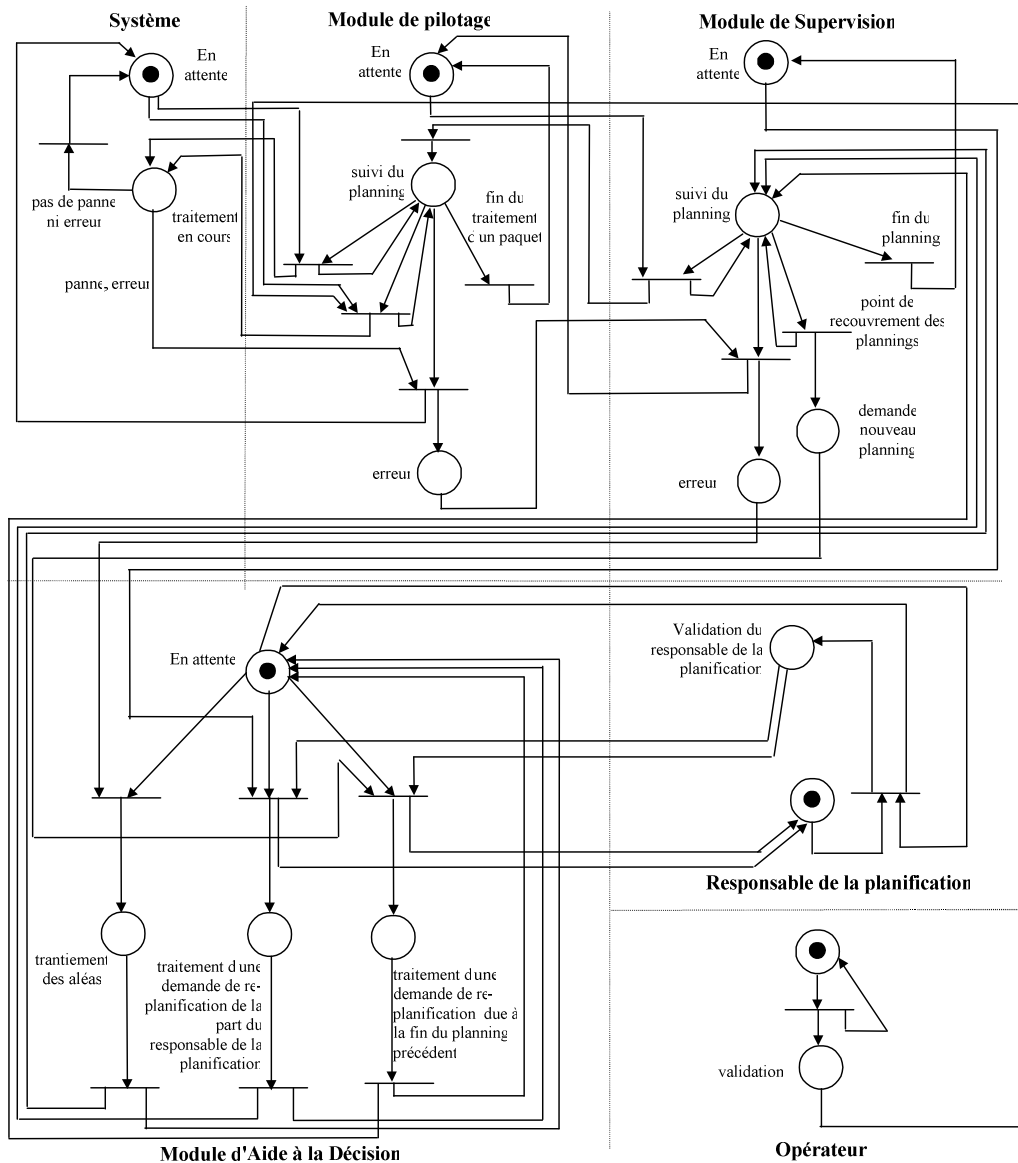


Figure 6-5. Modèle simplifié de la dynamique des modules

Il faut souligner qu'un système d'aide à la décision devrait (comme le montre la figure 6-4) permettre d'utiliser l'expérience du responsable de la planification. Celui-ci devrait pouvoir proposer (construire) des solutions en utilisant l'interface, tester des hypothèses dans des temps de calcul acceptables. Pour faciliter ce dialogue, il est évident que toute méthode proposant, non pas une solution mais plusieurs, possède un avantage indéniable.

Une solution validée, passant par un module de supervision et de pilotage, va finalement être mise en œuvre sur le système. Mais le calcul d'une solution à la demande d'un responsable de

la planification n'est qu'un seul cas parmi les trois que nous avons identifiés dans le fonctionnement d'un module d'aide à la décision. Les deux autres cas importants sont :

- la capacité du module de décision de recalculer (dans des temps de calcul très brefs) une solution, en réponse à un événement aléatoire survenu pendant la mise en œuvre du planning ;
- la capacité du module de décision à calculer un planning, tout en prenant en compte la fin du planning précédemment calculé.

Le premier point justifie amplement les recherches effectuées pour le calcul de solutions robustes ou flexibles. Une solution robuste limite le nombre de calculs à effectuer suite à un aléa, et une solution flexible simplifie les algorithmes à utiliser lors de la modification d'un planning déjà calculé et partiellement réalisé.

Pour être opérationnel, un module d'aide à la décision doit comprendre des outils de recherche opérationnelle, mais aussi des outils de dialogue avec l'utilisateur (manipulation graphique de solution, outils de spécification graphique) et s'appuyer sur une couche base de données performante qui permettra de stocker les informations sur le système, mais aussi les solutions envisagées par le responsable de la planification.

La présence des modules de supervision et de pilotage dépend, bien sûr, du type de problème étudié. S'il s'agit de problèmes de dimensionnement, le système d'aide à la décision n'a pas de connexion directe avec les modules gérant le système. Les schémas précédents doivent être instanciés en fonction du problème traité.

Dans [GOU, 03] un outil d'aide à la décision pour la gestion d'une ligne de traitement de surfaces a été présenté. Cet outil, développé en Pascal, est fondé sur un couplage entre un algorithme stochastique pour le calcul de l'ordre d'entrée des pièces, une règle de priorité pour la gestion des mouvements du robot et un modèle de simulation. Le module de supervision est développé en LabView.

## **6.5 Proposition d'un système d'Aide à la Conception de tournées**

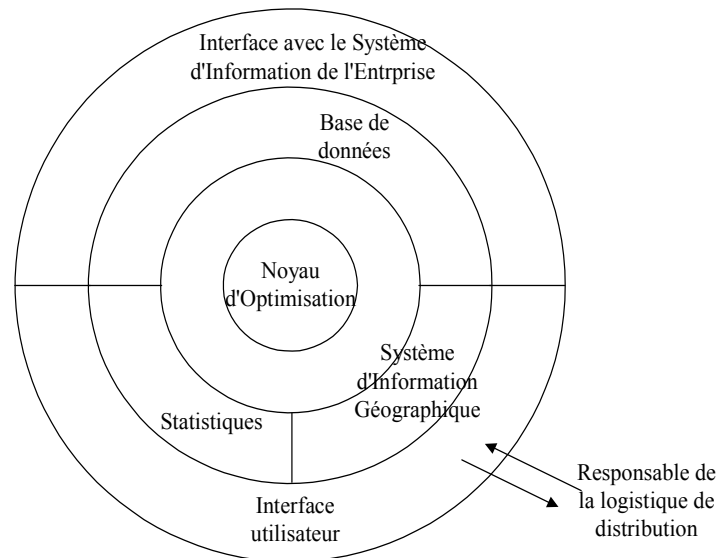
Cette partie présente un système d'aide à la conception de tournées tel qu'il a été décrit par la société Pyram lors d'une étude de faisabilité [LAC, 05b]. De cette dernière sont ressortis, les points suivants :

- Tout système doit être intégré au système d'information de l'entreprise afin de disposer en permanence de données actualisées et de permettre une mise à jour périodique du système d'information avec les solutions calculées par le système d'aide à la conception de tournées.
- Le système doit permettre le calcul de solutions de bonne qualité sans contrainte spécifique de temps. Cependant il doit aussi pouvoir générer des solutions dans des temps de calcul très courts dans le cas de demandes imprévues (aléas).



- Le système doit offrir une interface graphique simple et efficace permettant une manipulation intuitive des solutions.

La figure 6-6 donne une vision fonctionnelle d'un système d'aide à la conception de tournées telle qu'elle nous est apparue lors de la collaboration avec Pyram.



**Figure 6-6. Vision fonctionnelle d'un système d'aide à la conception de tournées**

Dans le cadre de la collaboration avec la société Pyram, le système proposé repose sur :

- le logiciel MapPoint 2004 pour la visualisation des tournées ;
- MicroSoft Access pour la partie base de données ;
- un noyau d'optimisation basé sur un algorithme génétique (cf. section 3.4.5) qui traite le problème du VRP hétérogène ;
- une interface graphique développée en C++.

La figure 6-7 est une copie d'écran de l'interface utilisateur du système d'aide à la conception de tournées. Le système développé dans le cadre de cette étude de faisabilité atteint un grand nombre des objectifs initialement définis, en particulier :

- le système autorise une manipulation intuitive des informations (tournées, données clients...) par une simple utilisation de la souris ;
- le système est connecté directement à l'ERP Précix de la société dont il extrait les informations via le réseau et dans lequel il met à jour les données relatives aux tournées et aux chauffeurs (temps de conduite...) ;
- le noyau d'optimisation est capable de fournir de nouvelles solutions en quelques secondes par l'utilisation d'heuristiques (Path Scanning...) ;

Le fait que le système repose sur le modèle théorique du VRP hétérogène n'est pas une limitation à l'utilisation du logiciel dans la mesure où l'interface permet au responsable logistique de "retoucher" simplement les solutions. La principale contrainte que le système actuel néglige concerne les fenêtres horaires de livraison client. Une extension souhaitable du système serait d'intégrer ces fenêtres horaires de passage lors du calcul des solutions.

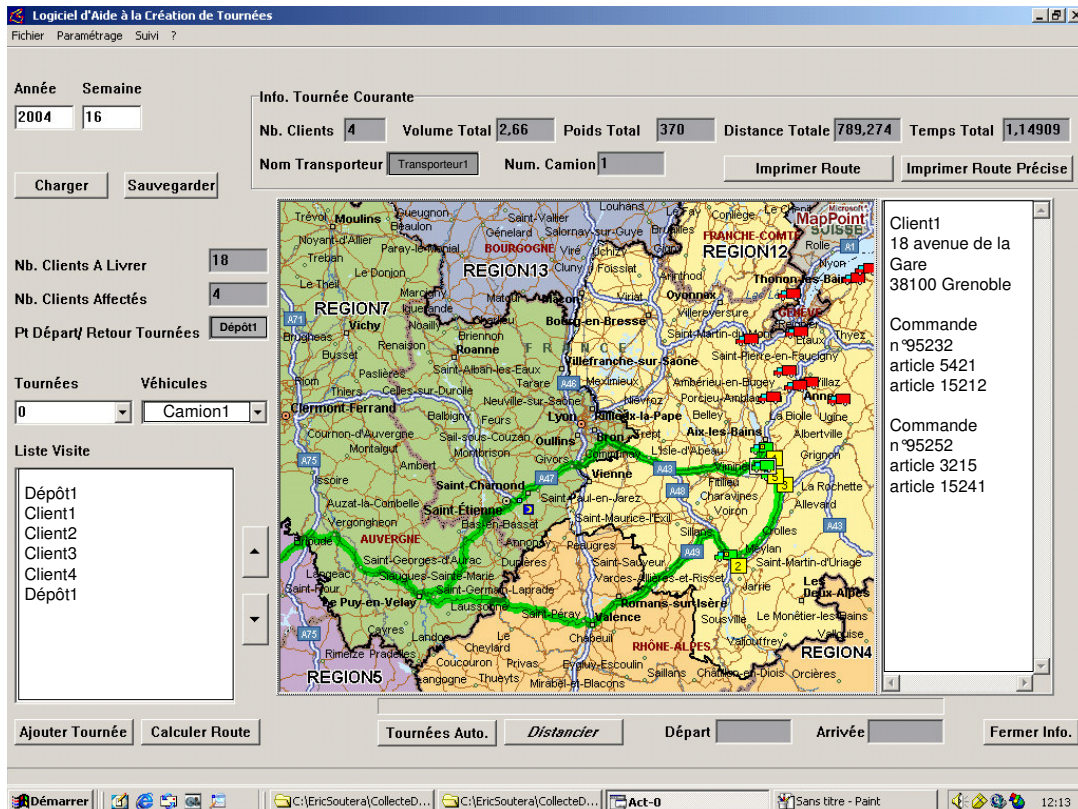


Figure 6-7. Copie d'écran du système d'aide à la conception de tournées

## 6.6 Bilan sur les systèmes d'aide à la décision

La conception d'un système d'aide à la décision est un travail long et difficile, qui ne relève pas seulement de la recherche opérationnelle. Elle comporte aussi une partie développement informatique nécessaire à une intégration efficace au sein du système d'information de l'entreprise. Il s'agit d'une tâche délicate mais c'est un gage d'utilisation sur le long terme du système proposé. Ainsi, la deuxième étude, décrite au paragraphe 6.5, ne pourrait être poursuivie que dans le cadre d'une équipe projet regroupant à la fois : une société de services extérieure assurant le suivi et la maintenance du logiciel (ce qui inclut aussi la formation du personnel), le fournisseur de l'ERP Précix pour une adaptation des bases de données de l'ERP aux nouvelles informations à stocker et les informaticiens de la société Pyram pour la maintenance journalière du système.



## 7 Conclusion

Nos travaux de recherche ont débuté en 1994 et ont été réalisés, dans un premier temps au LIMOS (Laboratoire d'Informatique de Modélisation et d'Optimisation des Systèmes) de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, en tant que thésard sous la direction conjointe de Michel Gourgand et Gérard Fleury, puis en tant qu'ATER.

Nommé Maître de Conférences à l'Université de Technologie de Troyes en 1999, nous avons intégré le Laboratoire d'Optimisation des Systèmes Industriels (LOSI) dirigé par Chengbin Chu. Ce laboratoire est devenu l'équipe OSI (Optimisation des Systèmes Industriels) du laboratoire ISTIT (Institut des Sciences et Technologies de l'Information de Troyes).

Depuis septembre 2001, nos recherches ont lieu au LIMOS dans l'équipe Modélisation et Aide à la Décision et ceci en tant que Maître de Conférences de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, rattaché à l'IUT de Montluçon.

Un court bilan de nos activités de recherche les plus récentes est présenté ci-dessous :

En ce qui concerne les **problèmes de tournées**, nous avons travaillé essentiellement sur des problèmes de tournées sur arcs et plus particulièrement sur le CARP (Capacitated Arc Routing) qui permet de modéliser par exemple l'inspection de lignes à haute tension ou le ramassage des déchets ménagers. Nous avons proposé une méthode de résolution de type algorithme génétique qui est aujourd'hui, à notre connaissance, la meilleure méthode de résolution du problème.

Ces travaux ont été étendus aux CARP périodique et stochastique, dans le souci de s'approcher encore davantage des problèmes concrets à résoudre. Ces deux extensions n'avaient pas fait l'objet de publications précédemment. Parallèlement, un travail sur l'optimisation multi-objectifs appliquée au CARP, fondée sur un schéma d'optimisation de type NSGA-II, a permis d'intégrer la recherche d'ensembles de solutions "équivalentes".

Il s'agit maintenant de promouvoir une autre extension, afin de proposer la résolution du CARP stochastique avec une approche multi-critères.

Dernièrement, en collaboration avec un étudiant du CNAM en stage, nous avons abordé le problème du VRP hétérogène. L'étude des problèmes posés par une flotte de véhicules différents est très importante de part ses applications pratiques mais aussi par l'intérêt scientifique de ce problème plus difficile que le VRP homogène.

En ce qui concerne les **problèmes de gestion des flux internes**, nous nous sommes intéressés aux ateliers à ressources de transport limitantes. La gestion d'un moyen de transport ajoute

des contraintes spécifiques lors de la résolution des problèmes. Dans le HSP, il s'agit de respecter des durées minimales et maximales de séjour de produits dans des cuves ; dans les SFP il s'agit de trouver une gestion respectant des contraintes telles que les capacités des stocks d'entrée/sortie. Le modèle théorique sous-jacent est de type job-shop avec transport, auquel il faut ajouter des contraintes supplémentaires.

Pour ce type de problèmes, il s'agit de résoudre conjointement le problème d'ordonnancement des pièces en entrée et la gestion des moyens de manutention. On peut remarquer que le problème de gestion des mouvements des moyens de manutention est un Dynamic VRP et qu'il est rarement résolu comme tel dans la littérature.

Pour le problème du HSP, nous avons développé une approche s'appuyant sur un couplage entre un algorithme stochastique pour déterminer un ordre d'entrée des pièces, et un modèle de simulation à événements discrets pour évaluer cet ordre en gérant le robot par une règle de priorité. Cette approche a été étendue au cas stochastique, avec un algorithme spécifique pour calculer les dates d'entrée.

Pour les SFP, le problème est voisin de celui du HSP avec, en plus, des contraintes spécifiques sur les stations à cause de stocks d'entrée/sortie de capacité limitée, ainsi qu'un nombre maximal de pièces simultanément "autorisées" dans le système. Nous avons proposé deux approches basées sur des couplages :

- une approche couplant un algorithme stochastique de type recuit simulé avec un modèle de simulation à événements discrets. L'algorithme stochastique permet de déterminer un "bon" ordre d'entrée des pièces dans des temps raisonnables alors que la résolution des mouvements du robot est réalisée de manière heuristique par une règle de priorité.
- une approche couplant un algorithme de type "branch-and-bound" avec un modèle de simulation à événements discrets et une règle de priorité pour la gestion du chariot. L'algorithme de "branch-and-bound" permet de calculer l'ordre d'entrée optimal des pièces, compte tenu de la règle heuristique de gestion du robot utilisée dans le modèle de simulation (FIFO, STT...).

Ces deux approches sont complétées par une approche de type simulation réflexive qui permet, grâce à un modèle de simulation, d'énumérer toutes les solutions de gestion du robot, connaissant un ordre d'entrée fixé des pièces. Les résultats de ce modèle de simulation ont été comparés et validés avec les résultats d'un modèle linéaire en nombre entier. Ce modèle, pour la première fois à notre connaissance, formalise le problème sans aucune hypothèse simplificatrice sur le système.

Comme le modèle théorique sous-jacent à ces deux problèmes de gestion d'atelier à ressources de transport limitantes, est un job-shop avec transport, nos travaux ont débuté par l'étude du job-shop avec time-lags, ce qui permet de prendre en compte partiellement les

opérations de transport. Les méthodes de résolution envisagées s'appuient sur un graphe de disjonction dans lequel l'ordre des opérations sur les machines est déterminé par un algorithme stochastique, et les dates de réalisation des opérations par un algorithme de plus court chemin de type Bellman.

D'un point de vue méthodologie de travail, nous nous appuyons le plus souvent sur des techniques de couplage en décomposant le problème en sous-problèmes et en associant à chaque sous-problème sa propre méthode de résolution fondée sur une modélisation (partielle parfois) particulière du problème. Les modèles utilisés sont variés : ils vont des modèles de simulation à événements discrets jusqu'au graphes. L'étude des problèmes en prenant en compte leur aspect stochastique est aussi une préoccupation majeure de nos travaux, car cela nous semble correspondre à un besoin important dans le cadre du développement d'outils d'aide à la décision. La prise en compte de l'aspect stochastique des problèmes à résoudre apparaît à la fois dans nos travaux sur les problèmes de tournées mais aussi dans l'étude des ateliers à ressources de transport limitantes.

Les résultats de nos recherches ont été diffusés à travers des publications dans des différentes revues scientifiques et dans des actes de conférences. Le nombre de publications est de 9 revues et de 4 articles dans la série Lecture Notes in Computer Science suite à des conférences. Le nombre d'articles dans des conférences en langue Anglaise dépasse les 30 auxquels viennent s'ajouter des articles dans des conférences en langue Française.

Nous nous sommes investi dans des tâches administratives d'organisation de manifestations scientifiques ainsi que dans des travaux d'éditions. En collaboration avec Alexandre Dolgui, nous avons réalisé un numéro spécial de la revue Journal of Intelligent Manufacturing. La fonction de vice-président du comité d'organisation de la conférence MOSIM à Troyes en 2001, nous a donné une expérience enrichissante sur l'organisation de manifestations scientifiques. La conférence MOSIM avait réuni 300 chercheurs pendant 3 jours. Nous sommes de nouveau impliqué dans l'organisation de conférences avec MOSIM'06.

Enfin, en tant que membre de la commission de spécialistes de l'Université de Clermont-Ferrand I, nous participons activement à la vie scientifique de Clermont-Ferrand.

Nous avons participé activement à deux projets : un projet stratégique de l'Université de Troyes et un projet PICASSO financée par Egide. Ces deux projets nous ont permis de développer le travail en équipe, ce qui se traduit dans notre dossier par un nombre important de publications co-signées avec des chercheurs appartenant à d'autres laboratoires.

Nous nous sommes investi dans les activités d'enseignement en réalisant des cours avec des publics très divers (étudiants de l'Université de Technologie de Troyes, étudiants en licence d'informatique, étudiants à l'IUT, auditeurs du CNAM). Cette démarche pédagogique a débouché sur la réalisation d'un livre de graphes destiné aux étudiants. Nous avons également participé aux travaux d'étudiants de DEA, à des encadrements de stages et de projets. Cet investissement a abouti à la rédaction d'articles co-signés. En tant que participant à la "Convention de partenariat entre l'Université de Clermont-Ferrand et l'Université Ferhat Abbas de Sétif", nous participerions à la mise en place du LMD à l'université Ferhat Abbas de Sétif.

Enfin, notre implication dans le cadre de contrats industriels montre notre intérêt pour le transfert de technologie et le travail en collaboration avec les entreprises.

## 8 Perspectives à moyen et long terme

Compte tenu des résultats obtenus, nos travaux s'orientent dans les directions suivantes :

Pour **les problèmes de tournées**, outre les perspectives évidentes qui concernent la mise au point de nouvelles méthodes, l'idéal serait de disposer d'un modèle mixte arcs et nœuds, permettant la résolution conjointe de problèmes de tournées sur nœuds et sur arcs. Ce modèle devrait idéalement permettre la résolution de problème mixte dans le cas d'une flotte hétérogène et si possible dans un cadre stochastique.

Pour **les problèmes de tournées**, les problèmes de dimensionnement de la flotte de véhicules directement liés au problème de localisation de "hubs" ou de centre d'enfouissement pour les problèmes de collecte de déchets ménagers, devraient attirer notre attention. En effet, les solutions retenues lors de la phase de conception (de la chaîne logistique) influencent fortement les solutions qu'on peut déterminer en phase d'exploitation. L'idéal serait d'intégrer les paramètres opérationnels dès la phase de conception de la chaîne.

Pour la **gestion des flux internes**, il s'agit pour nous de compléter les modèles existants sur les SFP en particulier. En effet, la problématique des SFP nous semble regrouper un grand nombre de contraintes difficiles à formaliser et à prendre en compte lors de la recherche de solutions. L'idéal serait de disposer pour les SFP de modèles généraux englobant, entre autres, les configurations à plusieurs chariots. Ceci ouvrirait des perspectives nouvelles tant au niveau des modèles que des méthodes à imaginer et à concevoir pour la résolution. Ici aussi il faudrait intégrer lors de la conception des systèmes, des éléments relatifs à la phase d'exploitation, ce qui permettrait d'optimiser plus facilement la gestion des ressources de transport.

Le travail engagé depuis peu sur le job-shop laisse entrevoir des possibilités d'extensions des modèles du job-shop et du flow-shop afin de prendre en compte des contraintes largement répandues dans les systèmes.



En ce qui concerne les **méthodes**, nous orientons nos réflexions dans les directions suivantes :

Les **couplages** basés sur des modèles différents nous semblent être une voie prometteuse (l'algorithme génétique proposé pour le CARP est basé sur deux modèles : un graphe modélisant le réseau, un graphe auxiliaire pour le découpage des tours géants). Ce qui nous semble intéressant ce n'est pas tant la méthode que l'utilisation conjointe de plusieurs méthodes qui conduisent à un schéma d'optimisation performant (recherche locale performante avec une gestion efficace des clones, un croisement adapté au problème...).

Compte tenu qu'il est parfois difficile pour un responsable d'exploitation de définir avec précision les critères de sélection d'une bonne solution, toutes les méthodes permettant de fournir non pas une solution mais plusieurs ont, à notre avis, un intérêt certain. Dans cette voie, les techniques d'optimisation multi-objectifs présentent de nombreux avantages.

L'idéal serait de combiner à la fois les techniques d'optimisation multi-objectifs avec les techniques employées dans le cadre stochastique pour obtenir dans le cas d'un algorithme de type NSGA (par exemple) des fronts de Pareto stochastiques.

Un autre point que nous souhaitons approfondir concerne la validation des modèles entre eux ce qui sous-entend que les modèles sont réalisés sous les mêmes hypothèses simplificatrices. L'expérience que nous avons sur les SFP nous pousse à croire que c'est un point important à développer et ceci quel que soit le problème étudié. Ceci nous semble d'autant plus vrai que la validation sur le terrain est souvent difficile et onéreuse.

D'autres part, il nous paraît intéressant d'explorer d'autres types de métaheuristiques (scatter-search,...) qui, sur certains problèmes, ont déjà fourni de meilleurs résultats que des algorithmes de type tabou ou des algorithmes génétiques. A terme, des méthodes de résolution de type relaxation lagrangienne par exemple, devraient s'ajouter aux méthodes que nous utilisons.

## 9 Références bibliographiques

- [AUG, 98] Augerat P., J.M. Belenguer, E. Benavent, A. Corberán and D. Naddef. "Separating capacity constraints in the CVRP using tabu search". European Journal of Operational Research. Vol. 106, p. 546-557, (numéro spécial sur les méthodes taboues), 1998.
- [BAL, 95] Balas E., J.K. Lenstra and A. Vazacopoulos. "The one-machine Problem with Delayed Precedence Constraints and its use in job-shop Scheduling". Management Science, Vol.41(1), p. 94-109, 1995.
- [BAP, 01] Baptiste P., Bloch C. and Varnier C. "Ordonnancement des Lignes de Traitement de Surfaces". Ordonnancement de la Production, Traité IC2, Information Commande Communication, section Productique, Editions Hermès-Systemes Pour l'Ingénieur, Ch. 9, p. 259-293, 2001.
- [BEC, 04] Bécart M., P. Lacomme, A. Moukrim and N. Tchernev, "Proposition de résolution exacte d'un MILP pour les systèmes flexibles de production du type jobshop avec transport", 5ème conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation, "Modélisation et simulation pour l'analyse et l'optimisation des systèmes industriels et logistiques", IRCCyN, Ecole des Mines de Nantes, 1-3 Septembre 2004.
- [BEC, 03] Bécart M., P. Lacomme, A. Moukrim and N. Tchernev, "Mixed Integer Linear Model for FMS scheduling based on AGVs : job-shop with a Single Transport Robot", INOC'03, 27-29 Octobre 2003, p. 55-60, Evry/Paris, France, ISSN: 1762-5734, 2003.
- [BEL, 03] Belenguer J.M. and E. Benavent. "A cutting plane algorithm for the capacitated arc routing problem". Rapport de Recherche, Département de Statistiques et de Recherche Opérationnelle, Université de Valencia (Espagne), Computer and Operations Research, Vol. 30(5), p. 705-728, 2003.
- [BEL, 00] Belenguer J.M., M.C. Martínez and E. Mota.. "A Lower Bound for the Split Delivery Vehicle Routing Problem, Operations Research", Vol. 48 (5), p. 801-810, 2000.
- [BEL, 98] Belenguer J.M. and E. Benavent. "The capacitated arc routing problem: valid inequalities and facets". Computational Optimization and Applications, Vol. 10, p. 165-187, 1998.
- [BEN, 98] Benavent E. and D. Sole. "The directed rural postman problem with turn penalties". Transportation Science, Vol. 33(4), p. 408-418, 1999.
- [BEN, 92] Benavent E., V. Campos and A. Corberan. "The capacitated arc routing problem: lower bounds". Networks, Vol. 22, p. 669-690, 1992.
- [BER, 96] Bertsimas D.J. and Simchi-Levi Davis. "A new Generation of Vehicle Routing Research: Robust Algorithms, addressing Uncertainty". Operations Research, Vol. 44(2). p. 286-304. March-April 1996.

- [BIE, 95] Bierwirth C. "A generalized permutation approach to jobshop scheduling with genetic algorithms". *OR spektrum*, Vol. 17, p. 87-92, 1995.
- [BIL, 95] Bilge, U. and G. Ulusoy. "A Time Window Approach to Simultaneous Scheduling of Machines and Material Handling System in an FMS". *Operations Research*, Vol. 43(6), p. 1058-1070, 1995.
- [BRA, 04] Brauner N., P. Castagna, M-L. Espinouse, G. Finke, Ph. Lacomme, P.Martineau, A. Moukrim, A. Soukhal, C. Tacquard et N. Tchernev. "Les Systèmes Flexibles de Production". Soumis à JESA en 2004.
- [BRA, 98] Branke J. "Creating robust solutions by means of evolutionary algorithms". In: Eiben AE, Bäck T, Schoenauer M and Schwefel HP. *Parallel Problem Solving from Nature (PPSN'98)*, LNCS 1498, Springer, Berlin, p. 119-128, 1998.
- [BRE, 90] Breugnot D., M. Gourgand and P. Kellert, "SIGMA : An Intelligent and Graphical System for the Modelling of Assembly Systems", *Proceedings of the 1990 ESS (Ghent, Belgium)*, p. 225-230, 1990.
- [BRO, 84] Browne J., D. Dubois, K. Rathmill, S.P. Sethi and E. Stecke. "Classification of Flexible manufacturing systems". *FMS Magazine*, Vol. 2, p. 114-117, 1984.
- [BRU, 01] Brucker P. "Scheduling Algorithms". Third Edition. Springer. ISBN. 3-540-41510-6. 2001.
- [BRU, 99a] Brucker P. and S. Knust. "Complexity results for single-machine problems with positive finish-start time-lags". *Computing*, Vol. 63, p. 299-316, 1999.
- [BRU, 99b] Brucker P., T. Hilbig and J. Hurink. "A branch and bound algorithm for a single-machine scheduling with positive and negative time-lags". *Discrete Applied Mathematics*, Vol. 94, p. 77-99, 1999.
- [CAB, 04] Caballero R., Cerdá E., del Mar Muñoz M. and Rey Lourdes. "Stochastic approach versus multiobjective approach for obtaining efficient solutions in stochastic multiobjective programming problems". *European Journal of Operational Research (EJOR)*, Vol. 158, p. 633-648, 2004.
- [CAM, 99] Campbell J.F. and A. Langevin. "A survey of arc routing applications for roadway snow and ice control". *Rapport de recherche du GERAD G-99-03*, janvier 1999, Université de Montréal, Canada, 1999.
- [CAN, 00] Cândida Mourão M. and M. Teresa Almeida. "Lower-bounding and heuristic methods for a refuse collection vehicle routing problem". *European Journal of Operational Research*, Vol. 121, p. 420-434, 2000.
- [CAU, 05a] Caumont A., P. Lacomme, A. Moukrim et N. Tchernev "Proposition d'un modèle linéaire mixte pour la résolution optimale du "job input sequencing and material device scheduling" dans les SFP avec un seul chariot". Document interne. Laboratoire d'Informatique (LIMOS). 2005.

- [CAU, 05b] Caumond A., P. Lacomme and N. Tchernev. "Feasible schedules generation with an extension of the Giffler and Thomson algorithm for the jobshop with timelags". International Conference on Industrial Engineering and System Management (IESM), Marrakech-Morocco. 2005.
- [CAU, 05c] Caumond A., P. Lacomme et N. Tchernev. "Proposition d'un algorithme génétique pour le job-shop avec time-lags", 6ème congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, Tours, p. 183-200, ISBN 2-86906-196-X, 14-16 Février 2005.
- [CAU, 04] Caumond A., M. Gourgand, P. Lacomme and N. Tchernev. "Metaheuristiques pour le problème de jobshop avec timelags :  $J_m | I_{i,sj(i)} | C_{\max}$ ". 5ième Conférence Francophone de MODélisation et SIMulation (MOSIM), IRCCyN - Ecole des Mines de Nantes, p. 939-946, 1-3 Septembre 2004.
- [CHE, 95] Cheng C. and S. Smith. "Applying Constraint Satisfaction Techniques to Job Shop Scheduling". Tech. Report CMU-RI-TR-95-03, Robotics Institute, Carnegie Mellon University, January, 1995.
- [CHE, 76] Chen P.P. "The Entity-Relationship Model towards a unified view of data". ACM Transactions on Database Systems, Vol. 1(1). p. 9-36, 1976.
- [COR, 00] Corberàn A., R. Marti and A. Romero. "Heuristics for the mixed rural postman problem". Computers and Operations Research, Vol. 27, p. 183-203, 2000.
- [DEA, 81] DeArmon J.S. "A Comparison of Heuristics for the Capacitated Chinese Postman Problem". Master's Thesis, The University of Maryland at College Park, MD, USA, 1981.
- [DEP, 04] Deppner F. "Ordonnancement d'atelier avec contraintes temporelles entre opérations". Thèse de Doctorat de l'institut National Polytechnique de Lorraine (spécialité : Informatique). Soutenue le 6 mai 2004.
- [DOL, 00] Dolgui A. "Conception et gestion des systèmes de production : nouvelles méthodes et application". Habilitation à diriger des Recherches, présentée à l'Université de Compiègne, soutenue le 22 décembre 2000.
- [EGL, 94] Eglese R.W. "Routing winter gritting vehicles". Discrete Applied Math., 48(3), p. 231-244, 1994.
- [ESP, 01] Espinouse M-L, P. Lacomme, A. Moukrim and N. Tchernev. "Bornes inférieures pour l'ordonnancement intégré de la production et du transport dans les FMS avec un seul chariot filoguidé". Conférence MODélisation et SIMulation (MOSIM). ISBN 1-56555-212-1. p. 541-548, Université de Technologie de Troyes (UTT), 25-27 avril 2001. 2001.
- [ESP, 00] Espinouse M-L, P. Lacomme, A. Moukrim and N. Tchernev. "A Branch and bound approach for the job input sequencing and devices dispatching in FMS based on AGVs". Congrès IFAC/IFIP/IEEE Management & Conduite en Production & Logistique (MCPL'2000), p. 67-72, 5-8 juillet 2000.
- [FIN, 96] Finta L. and Z. Liu. "Single Machine Scheduling Subject to Precedence Delays". Discrete Applied Mathematics and Combinatorial Operations Research and Computer Science (DAMATH), Vol. 70, p. 247-266. 1996.

- [FLE, 05a] Fleury G., P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Cherif. "Improving robustness of solutions to arc routing problems". Journal of the Operational Research Society (JORS). Accepté pour publication. 2005.
- [FLE, 05b] Fleury G., P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Chérif. "Stochastic Capacitated Arc Routing Problem". Document de travail interne. Article en cours de rédaction.
- [FLE, 02a] Fleury G., P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Chérif. "Robustness evaluation of solutions for the Capacitated Arc Routing Problem". Conference, 2002 AI, Simulation and Planning in High Autonomy Systems, p. 290-295, Libon (Portugal), 7-10 April 2002, Fernando J. Barros and Norbert Gambiasi (Ed.), Conference AIS, ISBN 1-56555-242-3, 2002.
- [FLE, 02b] Fleury G., P. Lacomme, C. Prins et W. Ramdane-Chérif. "Etude de la robustesse des solutions pour le CARP". 4ième Congrès de la société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, ROADEF, Télécom Paris, 20-22 Février, p. 178-179, 2002.
- [FLE, 01] Fleury G., M. Gourgand and P. Lacomme. "Meta-Heuristics for the Stochastic Hoist Scheduling Problem". International Journal of Production Research (IJPR), Vol. 39(15). p. 3419-3457. 2001.
- [FLE, 99a] Fleury G., M. Gourgand et P. Lacomme. "Le Couplage-Triple Stochastique pour la prise en compte des événements aléatoires dans les systèmes industriels de production". RAIRO-JESA-APII, Vol. 33(1-2), p. 9-42. 1999.
- [FLE, 99b] Fleury G., J-Y. Goujon, M. Gourgand and P. Lacomme. "Multi-Agents Approach and Stochastic Optimization : Random Events in Manufacturing Systems". Journal of Intelligent Manufacturing. Vol. 10(1), p. 81-101. Mars 1999.
- [FLE, 97] Fleury G., J-Y Goujon, Michel Gourgand et Philippe Lacomme. "Une contribution à l'optimisation des systèmes de production : le Couplage-Triple". RAIRO-JESA-APII, Vol 31(9-10), p. 1411-1445. 1997.
- [FLE, 96] Fleury G., J-Y. Goujon, M. Gourgand and P. Lacomme. "A Hoist-Scheduling Problem Solved with an Opportunistic Approach". Symposium on Discrete Events and Manufacturing Systems. CESA'96 IMACS MultiConference on Computational Engineering in Systems Applications. p. 473-478. Lille. 9-12 juillet. 1996.
- [FLE, 93] Fleury G. "Méthodes stochastiques et déterministes pour les problèmes NP-Difficiles". Thèse de docteur en informatique. Université Blaise Pascal. Clermont-Ferrand II. 1993.
- [FON, 03] Fondrevelle. J. "Résolution exacte d'un problème d'ordonnancement en présence de contraintes maximales entre opérations d'un même job : cas du flow-shop de permutation". Conférence MOdélisation Optimisation et SIMulation (MOSIM), p. 437-444, Toulouse, 23 au 25 avril 2003.
- [FRE, 78] Frederickson G.N., M.S. Hecht and C.E. Kim. "Approximation algorithms for some routing problems". SIAM Journal on Computing, Vol. 7(2), p. 178-193, 1978.

- [FON, 05] Fondrevelle J., A. Oulamara and M.C. Portmann. "Permutation flowshop scheduling problems with maximal and minimal time lags". *Computers & Operations Research*. A paraître.
- [GIF, 60] Giffler B. and J.L. Thompson. "Algorithms for solving production scheduling problems". *Operations Research*, Vol. 8, p. 487-503, 1960.
- [GOL, 83] Golden B.L, J.S. DeArmon and E.K. Baker. "Computational experiments with algorithms for a class of routing problems". *Computers and Operation Research*, Vol. 10(1), p. 47-59, 1983.
- [GOL, 81] Golden B.L. and R.T. Wong, 1981. "Capacitated arc routing problem"s. *Networks*, Vol. 11, p. 305-315, 1981.
- [GOU, 03] Gourgand M., P. Lacomme and M. K. Traoré. "Design of a monitoring environment for manufacturing systems management and optimization, *International Journal of Integrated Manufacturing*" (IJCIM). Vol 16(1), p. 61-80. 2003.
- [GOU, 00] Gourgand M., P. Lacomme and N. Tchernev, "Simulation Based Scheduling with WIP Consideration for FMS using Trip-Based Material Handling Systems", p. 481-488, *International European Simulation Multi-Conference (ESM'2000)*, Gent, Belgium, 23-26 May, 2000.
- [GOU, 99] Gourgand M., P. Lacomme and N. Tchernev, "Job Input Sequencing and Device Dispatching in a Single Device Automated Guided Vehicle Systems", *International Conference on Industrial Engineering and Production Management (IEPM'99)*, p. 438-447, Glasgow, July 12-15, 1999.
- [GOU, 97] Goujon J-Y et P. Lacomme. "Hoist Scheduling Problem: Modèle Objets". *Rapport Interne du Laboratoire d'Informatique. Rapport Interne HSP/2/LIMOS présenté au groupe Bermudes. Bulletin de liaison numéro 2, Besançon, 31 Janvier 1997.*
- [GOU, 91] Gourgand M. et P. Kellert. "Conception d'un environnement de modélisation des systèmes de production". *3ème Congrès International de Génie Industriel*, p. 191-203, Tours, 1991.
- [HAL, 96] Hall N.G. and C. Sriskandarajah. "A survey of machine scheduling problems with blocking and no-wait in process". *Operations Research*, Vol. 44(3), p. 510-525, 1996.
- [HAT, 91] Hatley, D.J. and I.A. Pirbhai, "Stratégies de spécification des systèmes temps réels" Masson. 1991.
- [HAU, 89] Haupt R. "A survey of Priority Rule-Based Scheduling". *OR Spektrum*, Vol. 11, p. 3-16, 1989.
- [HER, 00] Hertz A., G. Laporte and M. Mittaz. A Tabu Search Heuristic for the Capacitated Arc Routing Problem. *Operations Research*, Vol. 48(1), p. 129-135, 2000.
- [HER, 99] Hertz A., G. Laporte and P. Nanchen Hugo. "Improvement procedures for the undirected rural postman problem", *INFORMS Journal on Computing*, Vol. 11(1), p. 53-62, 1999.
- [HIR, 92] Hirabayashi R., Y. Saruwatari and N. Nishida. "Tour construction algorithm for the capacitated arc routing problem", *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, Vol. 9, p. 155-175, 1992.
- [IGL, 93] I.G.L.Technology. "SADT : un langage pour communiquer". Eyrolles, Paris, 1993.

- [JEN, 01] Jensen M.T. "Robust and Flexible Sheduling with Evolutionary Computation". PhD Dissertation, Department of Computer Science, University of Aarhus, Denmark, 2001.
- [KEL, 92] Kellert P. "Définition et mise en œuvre d'une méthodologie orientée objets pour la modélisation des systèmes de production", INFORSID, Clermont-Ferrand, p. 415-436, 1992.
- [KUS, 85] Kusiak A. "Flexible manufacturing systems: a structural approach". International Journal of Production Research, Vol. 23, p. 1057-1073, 1985.
- [LAA, 92] Laarhoven V., E. Aarts and J.K. Lenstra. "Jobshop schedluing by simulated annealing". Operations Research, Vol. 40(1), p. 113-125, 1992.
- [LAC, 05a] Lacomme P., A. Moukrim and N. Tchernev, "Simultaneous job input sequencing and vehicle dispatching in a single-vehicle automated guided vehicle system: a heuristic branch and bound approach coupled with a discrete event simulation model". International Journal of Production Research. Accepted pour publication. 2005.
- [LAC, 05b] Lacomme P. and E. Soutera. "Computerized Decision-making System based on Hybrid Genetic Algorithm for Heterogeneous VRP resolution". International Conference on Industrial Engineering and Systems Management (IESM). Marrakech, Morocco. 16-19 mai 2005.
- [LAC, 04a] Lacomme P., C. Prins and A. Tanguy. "First Competitive Ant Colony Scheme for the CARP". Fourth International Workshop on Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, September 5-8, Brussels (Belgique), 2004.
- [LAC, 04b] Lacomme P., C. Prins and W. Ramdane-Cherif, "Competitive Memetic Algorithms for Arc Routing Problems". Annals of Operations Research, Vol 131. p. 159-185. 2004.
- [LAC, 04c] Lacomme P., E. Kindler, I. Křivý and A. Tanguy. "Reflective simulation model for optimization of FMS", October 25-27, European Simulation and Modelling Conference, ESMC'04, Unesco, Paris, p. 94-98, ISBN 90-77381-14-7, 2004.
- [LAC, 03a] Lacomme P., C. Prins and A. Tanguy. "Optimisation par colonies de fourmis pour les tournées sur arcs". 4ième conférence Francophone de MOdélisation et SIMulation MOSIM, "Organisation et Conduite d'Activités dans l'Industrie et les Services", ISBN 3-936150-24-9, 23-25 avril 2003, p. 505-511, Toulouse, France.
- [LAC, 03b] Lacomme P., C. Prins et M. Sevaux, "Algorithmes de graphes – 2ème Edition avec programmes en Pascal/Delphi", Editeur : Eyrolles. ISBN : 2-212-11385-4, 2003.
- [LAC, 03c] Lacomme P., C. Prins and M. Sevaux, "Multiobjective Capacitated Arc Routing Problem", in C.M. Fonseca, P.J. Fleming, E. Zitzler, K. Deb and L. Thiele (eds.), Evolutionary multi-criterion optimization (Proceedings of EMO 2003), LNCS 2632, p. 550-564, Springer, ISBN 3-540-01869-7, 2003.
- [LAC, 02] Lacomme P., C. Prins and W. Ramdane-Chérif. "Evolutionary Algorithms for Multiperiods Arc Routing Problems". IPMU'2002 (Ninth International Conference IPMU, Information Processing and Management of Uncertainty in Knowledge-Based System), ISBN 2-95166453-2-5, p. 845-852, Vol II, July 1-5, 2002, Annecy (FRANCE), 2002.

- [LAC, 01a] Lacomme P., C. Prins and W. Ramdane-Cherif. "A Genetic Algorithm for the Capacitated Arc Routing Problem and Its Extensions". EURO-GP 2001 (4th European Conference on Genetic Programming), Côme, Italie, 18-20 avril 2001. Actes parus dans la série Lecture Notes in Computer Science, E.J.W. Boers et al. (Eds), EvoWorkshop 2001, LNCS 2037, p. 473-483, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001.
- [LAC, 01b] Lacomme P. et C. Prins. "Logistique du transport : problèmes de tournées complexes". Document interne à l'Université de Technologie de Troyes. Réalisé dans le cadre de l'appel à Projets Stratégiques. 2001.
- [LAC, 01c] Lacomme P., C. Prins and W. Ramdane-Chérif, "An integer linear model for general arc routing problems", 13th European Simulation Symposium, Simulation in Industry, Marseille, France, p. 427-431, October 18-20, ISBN 90-77039-02-3 2001.
- [LAC, 00] Lacomme P. and N. Tchernev, "A Mean Tardiness Minimization Approach to Simultaneous Job Input Sequencing and Vehicles Dispatching in as FMS". 16th Imacs World Congress 2000, on Scientific Computation, Applied Mathematics and Simulation in Lausanne, Switzerland August 21-25, 2000.
- [LAC, 99] Lacomme P., N. Tchernev and C. Chu (pas d'ordre alphabétique des auteurs), "An Efficient Framework for Job Input Sequencing and Vehicle Dispatching in a Flexible Manufacturing System based on AGV transport", 7th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA'99), p. 653-662, Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) Barcelona, Catalonia, Spain October 18-22<sup>nd</sup>, 1999.
- [LAC, 98] Lacomme P. "Optimisation des systèmes industriels de production : méthodes stochastiques et approche multi-agents ", Thèse de l'Université Blaise Pascal de Clermont-Ferrand, 1998.
- [LAP, 02] Laporte G., F.V. Louveaux and L.V. Hamme. "An Integer L-Shape Algorithm for the Capacitated Vehicle Routing Problem with Stochastic Demands". Operations Research, Vol. 50(3), p. 415-423, 2002.
- [LI, 92] Li L.Y.O. "Vehicle routing for winter gritting". Ph.D. Department of OR and OM, Lancaster University, Lancaster, UK, 1992.
- [MAC, 93] MacCarthy and Liu J. "A New Classification Scheme For Flexible Manufacturing Systems". International Journal of Production Research, Vol. 31 (2), p. 299-309, 1993.
- [MAN, 03] Manier M-A and C. Bloch. "A Classification for Hoist Scheduling Problems". International Journal of Flexible Manufacturing Systemx, Vol. 15(1), p. 37-55, 2003.
- [MAS, 02] Mascis A. and D. Pacciarelli. "Job-Shop scheduling with blocking and no-wait constraints". European Journal of Operational Research, Vol. 143, 498-517, 2002.
- [MIT, 59] Mitten .G. "Sequencing n jobs in two machines with arbitrary time-lags". Management Science, Vol. 5, p. 293-298, 1959.



- [MUN, 98] Munier A., M. Queryanne and A.S. Schulz. "Approximation Bounds for a General Class of Precedence Constrained Parallel Machine Scheduling Problems". in R.E. Bixby, E.A. Boyd and R.Z. Rios-Mercado (Eds.), *Integer Programming and Combinatorial Optimization (Processings of the Sixth International IPCO Conference)*, Lecture Notes in Computer Science, Vol. 1412, Springer, Berlin, p. 367-382, 1998.
- [NOW, 96] Nowicki E. and C. Smutnicki. "A fast taboo search algorithm for the job-shop problem". *Management Science*, Vol. 42(6), p. 797-813, 1996.
- [PAN, 77] Panwalkar S.S. and W. Iskander. "A survey of Scheduling Rules". *International Journal of Operation Research*, Vol. 25(1), p. 45-61, Jan./Feb. 1977.
- [PEA, 91] Pearn W.L. "Augment-insert algorithms for the capacitated arc routing problem". *Computers and Operations Research*, Vol. 18(2), p. 189-198, 1991.
- [PEA, 89] Pearn W.L. "Approximate solutions for the capacitated arc routing problem". *Computers and Operations Research*, Vol. 16(6), p. 589-600, 1989.
- [PEA, 88] Pearn W.L. "New lower bounds for the capacitated arc routing problem". *Networks*, Vol. 18, p. 181-191, 1988.
- [PRO, 92] Proth J.M. "Conception et gestion des systèmes de production". *Presse Universitaire de France*, 1992.
- [RAM, 02] Ramdane-Chérif W. "Problèmes d'optimisation en tournées sur arcs". Thèse de l'Université de Technologie de Troyes, soutenue le 12 décembre 2002.
- [RAY, 96] Raymond K.C. and W.B. Powell. "An Algorithm for Multistage Dynamic Networks with Random Arc Capacities with an Application to Dynamic Fleet Management". *Operations Research*, Vol. 44( 6), Nov/Dec. 1996.
- [REM, 93] Rembold U., B.O. Nnaji and A. Storr. "Computer Integrated Manufacturing and Engineering". Addison-Wesley, 1993.
- [ROC, 02] Rockafellar R.T. "Optimization under uncertainty". *Lecture notes*, University of Washington, 2002.
- [ROZ, 93] Rozenberg, G. "Advances in Petri Nets", *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 674, ISBN 3-540-56689-9, 1993.
- [RUC, 94] Ruch S. "Un environnement de modélisation multi-domaine des systèmes à flux discrets". Thèse de l'Université Blaise Pascal. Soutenue le 17 octobre 1994.
- [SCH, 03] Schuster C.J. and J.M. Framinan. "Approximative procedures for no-wait job shop scheduling". *Operations Research Letters*, Vol. 31, p. 308-318, 2003.
- [SRI, 94] Srinivas N. and D. Kalyanmoy. "Multiobjective Optimization Using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms Evolutionary Computation". Vol. 2 (3), p. 221-248, 1994.

- [SNI, 01] Sniezek J., L. Bodin, L. Levy and M. Ball. "The capacitated arc routing problem with vehicle/site dependencies: the Philadelphia experience", chapitre à paraître dans Vehicle routing, livre coordonné par P. Toth et D. Vigo, Kluwer, 2001.
- [SOU, 01] Soukhal A., "Ordonnancement simultané de moyen de transformation et de transport", Université François Rabelais, Tours, Décembre, 2001.
- [SOU, 05] Soutera E. et P. Lacomme. "Un Système d'Aide à la Décision basé sur un Algorithme Génétique pour le Vehicle Routing Problem", 6ème congrès de la Société Française de Recherche Opérationnelle et d'Aide à la Décision, Tours, p. 332-333, 14-16 Février 2005.
- [STE, 85] Stecke K.E. and J. Browne. "Variation in Flexible manufacturing systems according to the Relevant Types of Automated materials Handling". Material Flow, Vol. 2, p. 179-185, 1985.
- [TCH, 97] Tchernev N. "Modélisation du processus logistique dans les systèmes flexibles de production". Thèse de l'Université Blaise Pascal, septembre 1997.
- [TSU, 97] Tsutsui A. and A. Ghosh. "Genetic Algorithms with a Robust Solution Searching Scheme". IEEE Transactions on Evolutionary Computation, Vol. 1(3), p. 201-208, 1997.
- [TUN, 00] Tung D.V. and A. Pinnoi. "Vehicle-routing for waste collection in Hanoi". European Journal Of Operational Research, Vol. 125, p. 449-468, 2000.
- [YAN, 95] Yang D.L. and M.S. Chern. "A two machines flowshop sequencing problem with limited waiting time constraints". Computers and Industrial Engineering Conference, Vol. 28(1). p. 63-70, 2003.
- [YIH, 94] Yih Y. "An algorithm for hoist scheduling problems". International Journal of Operational Research, Vol. 32 (3), p. 501-516, 1994.



## 10 Sélection de cinq publications

### 10.1 Description des publications

Pour conclure ce document, nous proposons dans un document annexe cinq publications que nous pensons être représentatives de nos activités de recherche. Ce choix a été difficile et nous donnons dans ce chapitre un résumé de nos travaux présentés en revue ainsi que dans la série LNCS. Les articles sont présentés selon l'ordre chronologique inverse. Il s'agit des publications réalisées depuis 1999 date de notre nomination comme Maître de Conférences.

#### 1. Journal of the Operational Research Society (JORS) - 2005

**Ref.:**

Fleury G., P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Cherif. "Improving robustness of solutions to arc routing problems". Journal of the Operational Research Society (JORS). Accepté pour publication. 2005.

**Abstract:**

This paper considers the stochastic capacitated arc routing problem (SCARP), obtained by taking random demands in the CARP. For real-world problems, it is important to create solutions that are insensitive to changes in demand, because these quantities are not deterministic but randomly distributed. This paper provides the basic concept of a new technique to compute such solutions, based upon the best method published for CARP: a hybrid genetic algorithm (HGA). The simulation analysis was achieved with the well-known DeArmon's, Eglese's and Belenguer's instances. This intensive evaluation process was carried out with 1000 replications providing high-quality statistical data. The results obtained prove that there is a great interest to optimize not only the solution cost but also the robustness of solutions. This work is a step forward to treat more realistic problems including industrial goals and constraints linked to demand variations.

**Keywords:**

Vehicle routing; genetic algorithms; optimisation; stochastic capacitated arc routing problem; sensitivity analysis; robustness

#### 2. Computers and Operations Research- 2005

**Ref.:**

Lacomme P., C. Prins and M. Sevaux, "A genetic algorithm for a bi-objective capacitated arc routing problem". Computers and Operations Research. Accepté pour publication. 2005.

**Abstract:**

The capacitated arc routing problem (CARP) is a very hard vehicle routing problem for which the objective in its classical form—is the minimization of the total cost of the routes. In addition, one can seek to minimize also the cost of the longest trip.

In this paper, a multi-objective genetic algorithm is presented for this more realistic CARP. Inspired by the second version of the Non-dominated sorted genetic algorithm framework, the procedure is improved by using good constructive heuristics to seed the initial population and by including a local search procedure. The new framework and its different flavour is appraised on three sets of classical CARP instances comprising 81 files.

Yet designed for a bi-objective problem, the best versions are competitive with state-of-the-art metaheuristics for the single objective CARP, both in terms of solution quality and computational efficiency: indeed, they retrieve a majority of proven optima and improve two best-known solutions.

**Keywords:**

Capacitated arc routing problem; Multi-objective optimization; Metaheuristic; Genetic algorithm

**3. International Journal of Production Research (IJPR) - 2005**

**Ref.:**

Lacomme P., A. Moukrim and N. Tchernev, "Simultaneous job input sequencing and vehicle dispatching in a single-vehicle automated guided vehicle system: a heuristic branch and bound approach coupled with a discrete event simulation model". International Journal of Production Research. Accepté pour publication .2005.

**Abstract:**

This paper addresses the scheduling problem in automated manufacturing environments, whose problem encompasses all the decisions related to the allocation of resources over the time horizon in order to best satisfy some set of objectives. It concentrates more particularly on the job-input sequencing and vehicle dispatching problems in a manufacturing environment using a single-vehicle automated guided vehicle system. The problem is solved using a branch-and bound coupled with a discrete event simulation model. The branch-and-bound focuses on the job-input sequencing problem to determine the order in which the jobs enter the manufacturing system. The discrete event simulation model evaluates this job sequence under given vehicle and machine dispatching rules. The discrete event simulation model permits one to take into account all the working constraints: the maximal number of jobs simultaneously allowed in the system, the input/output buffers with infinite capacities, the dynamic behaviour of the system under study and, thus, the impact of vehicle blocking and congestion as well as the impact of the machine blocking. A benchmark test is performed to investigate the system performances and the makespan depending on the job input sequencing, the vehicle and machine dispatching. The framework is benchmarked on 20 instances under different vehicle dispatching rules.

**Keywords:**

Flexible Manufacturing System, AGV, branch-and-bound, simulation, lower-bound

#### 4. European Journal of Operational Research - 2005

**Ref.:**

Lacomme P., C. Prins and W. Ramdane-Cherif. "Evolutionary algorithms for periodic arc routing problems". European Journal of Operational Research, Vol 165. p. 535-553. 2005.

**Abstract:**

The capacitated arc routing problem (CARP) involves the routing of vehicles to treat a set of arcs in a network. In many applications, the trips must be planned over a multiperiod horizon, giving a new problem called periodic CARP (PCARP). The paper describes several versions encountered in practice and suggests a simple classification, enabling the definition of a very general PCARP. For instance, the demand for each arc treatment may depend on the period or on the date of the previous visit. The proposed solution method is a memetic algorithm based on a sophisticated crossover, able to simultaneously change tactical (planning) decisions, such as the treatment days of each arc, and operational (scheduling) decisions, such as the trips performed for each day. Two versions are appraised on two sets of PCARP instances derived from standard CARP files. The results show significant savings compared to one insertion heuristic and a more elaborate two-phase method.

**Keywords:**

Capacitated arc routing problem; periodic arc routing, memetic algorithm

#### 5. Computers and Operations Research- 2005

**Ref.:**

Belenguer J-M., E. Benavent, P. Lacomme and C. Prins, "Lower and upper bounds for the mixed capacitated arc routing problem". Computers and Operations Research. Accepted pour publication. 2005.

**Abstract:**

This paper presents a linear formulation, valid inequalities, and a lower bounding procedure for the mixed capacitated arc routing problem (MCARP). Moreover, three constructive heuristics and a memetic algorithm are described. Lower and upper bounds have been compared on two sets of randomly generated instances. Computational results show that the average gaps between lower and upper bounds are 0.51% and 0.33%, respectively.

**Keywords:**

Capacitated arc routing problem; Mixed graph; Lower bound; Cutting plane; Heuristic; Memetic algorithm; Waste collection

## **6. Annals of Operations Research (AOR) - 2004**

### **Ref.:**

Lacomme P., C. Prins and W. Ramdane-Cherif. "Competitive Memetic Algorithms for Arc Routing Problems". Annals of Operations Research. Vol 131. p. 159-185. 2004.

### **Abstract:**

The Capacitated Arc Routing Problem or CARP arises in applications like waste collection or winter gritting. Metaheuristics are tools of choice for solving large instances of this NP-hard problem. The paper presents basic components that can be combined into powerful memetic algorithms (MAs) for solving an extended version of the CARP (ECARP). The best resulting MA outperforms all known heuristics on three sets of benchmark files containing in total 81 instances with up to 140 nodes and 190 edges. In particular, one open instance is broken by reaching a tight lower bound designed by Belenguer and Benavent, 26 best-known solutions are improved, and all other best-known solutions are retrieved.

### **Keywords:**

Capacitated Arc Routing Problem, CARP, metaheuristic, memetic algorithm

## **7. Lecture Notes in Computer Science (LNCS) - 2004**

### **Ref.:**

Fleury G., P. Lacomme and C. Prins. "Evolutionary Algorithms for Stochastic Arc Routing Problems", Lecture Notes in Computer Science, Publisher: Springer-Verlag Heidelberg, ISSN: 0302-9743, Volume 3005 / 2004, Title: Applications of Evolutionary Computing: EvoWorkshops 2004: EvoBIO, EvoCOMNET, EvoHOT, EvoISAP, EvoMUSART, and EVOSTOC, Coimbra, Portugal, April 5-7, 2004. Proceedings, ISBN: 3-540-21378-3, p. 501 - 512. 2004

### **Abstract:**

The Capacitated Arc Routing Problem (CARP) is a combinatorial optimization problem in which vehicles with limited capacity must treat a set of arcs in a network, to minimize the total cost of the trips. The SCARP is a stochastic version with random demands on the arcs. The management rules used for instance in waste collection enable to derive mathematical expressions for objectives like the expected total cost. A memetic algorithm (MA) for the SCARP is proposed and compared with two deterministic versions based on average demands. All solutions are evaluated by simulation, to see how they are affected by random fluctuations of demands. This evaluation confirms the expected cost computed by the MA and shows its ability to provide robust solutions, without significant enlargement of the cost of planned trips.

### **Keywords:**

Stochastic Capacitated Arc Routing Problem

## 8. Lecture Notes in Computer Science (LNCS) - 2004

### Ref.:

Lacomme P, C. Prins and A. Tanguy. "First Competitive Ant Colony Scheme for the CARP", Lecture Notes in Computer Science, Publisher: Springer-Verlag Heidelberg, ISSN: 0302-9743, ISBN 3-540-22672-9, Volume 3005 / 2004, Title: Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence : 4th International Workshop, ANTS 2004,, Brussels, Belgium, September 5-8, 2004. Proceedings, p. 426 - 427. 2004 Springer Publication

### Abstract:

The CARP consists on determining a set of vehicle trips with minimum total cost. Each trip starts and ends at the depot, each required edge of the site graph is serviced by one single trip, and the total demand handled by any vehicle does not exceed the capacity  $Q$ . The most efficient metaheuristics published so far are a sophisticated taboo search method (CARPET) of Hertz et al. [1] and a hybrid genetic algorithm proposed by Lacomme et al. [2]. In the beginning, no collective memory is used and ants use only heuristic information. Pheromone deposition is proportional to the fitness that can be defined for minimization objectives as the inverse of the solution quality or solution cost. Local search can also be applied to increase the convergence rate. The process is iterated until a lower bound is reached or a maximal number of iterations is carried out.

### Keywords:

CARP, Ant Colony

## 9. Lecture Notes in Computer Science (LNCS) - 2003

### Ref.:

Lacomme P., C. Prins and M. Sevaux, "Multiobjective Capacitated Arc Routing Problem", in C.M. Fonseca, P.J. Fleming, E. Zitzler, K. Deb and L. Thiele (eds.), Evolutionary multi-criterion optimization (Proceedings of EMO 2003), LNCS 2632, p. 550-564, Springer, ISBN 3-540-01869-7, 2003.

### Abstract:

The Capacitated Arc Routing Problem (CARP) is a very hard vehicle routing problem raised for instance by urban waste collection. In addition to the total route length (the only criterion minimized in the academic problem), waste management companies seek to minimize also the length of the longest trip. In this paper, a bi-objective genetic algorithm is presented for this more realistic CARP, never studied before in literature. Based on the NSGA-II template, it includes two-key features: use of good constructive heuristics to seed the initial population and hybridization with a powerful local search procedure. This genetic algorithm is appraised on 23 classical CARP instances, with excellent results. For instance, for a majority of instances, its efficient solutions include an optimal solution to the academic CARP (minimization of the total route length).

### Keywords:

Capacitated Arc Routing Problem, CARP, metaheuristic, memetic algorithm



## **10. International Journal of Computer Integrated Manufacturing (IJCIM) - 2003**

### **Ref.:**

Gourgand M., P. Lacomme and M. K. Traoré. "Design of a monitoring environment for manufacturing systems management and optimization" International Journal of Integrated Manufacturing" (IJCIM). Vol 16(1). p. 61-80. 2003.

### **Abstract:**

Because manufacturing systems are highly computer-based, efficient monitoring tools are required to achieve various goals: the reactivity of the system, the optimization of the production rate and the quality follow-up. A monitoring environment is defined as a set including: a programmable controller for the physical system handling, a monitoring control system for the production management and a decisional system for the computation of control operations. This paper focuses on a generic framework to facilitate the design of any specific monitoring environment and to permit the integration of optimization tools. We propose a methodology that can be used either to build this generic framework, or to create an instance of a specific monitoring environment. The generic framework is a generic monitoring environment composed of three generic models: a target-shaped model for the static view, a SA/RT (Structured Analysis method for Real Time systems) model to identify clearly the environment processes as well as the data flows and the control flows they exchange, and a Petri net for the dynamic issues. An industrial application is presented concerning the monitoring of an industrial surface treatment line being implemented on site, for which specific optimization tools have been realized and integrated.

### **Keywords:**

Monitoring environment, generic framework

## **11. International Journal of Production Research - 2001**

### **Ref.:**

Fleury G., M. Gourgand and P. Lacomme. "Meta-Heuristics for the Stochastic Hoist Scheduling Problem". International Journal of Production Research (IJPR). 39(15). p. 3419-3457. 2001.

### **Abstract:**

Experts look for solutions increasing the production delivery but industrial systems are generally disturbed by random events. In many cases, there is a lack of information about the random events consequences on the production time and on the quality of the manufactured products. Surface Treatment Lines are robotic cells with time window constraints and so random events can have important consequences on the production management. Products could be damaged by constraint violations and refused by the control quality department. Moreover, due to the structure of these systems, variations of the transportation times can induce unrecoverable situations (deadlock occurrences for example). Therefore, experts look for schedules preventing from random events consequences. One of the most difficult

operational problem in surface treatment lines is the proper coordination of the material handling resources management and the job input scheduling. Previous related research works concern the makespan minimization problem and do not take into account the random events consequences: this problem is denoted by Hoist Scheduling Problem (HSP). In this paper, we focus on the Stochastic Hoist Scheduling Problem which is the Hoist Scheduling Problem with random events implying variations of the transportation times. It appears that no previous work can be reported concerning such stochastic problems but only deterministic ones.

We propose a method based on stochastic meta-heuristics used to determine schedules of the production for which the random events consequences are low. An industrial study that highlights the efficiency of the method is proposed. This work has been achieved in a case of an agreement with a company which can not be named for confidential reasons

**Keywords:**

Stochastic Hoist Scheduling, random events, Meta-Heuristics

**12. Lecture Notes in Computer Science (LNCS) - 2001**

**Ref.:**

Lacomme P., C. Prins and W. Ramdane-Cherif, "A Genetic Algorithm for the Capacitated Arc Routing Problem and Its Extensions". EURO-GP 2001 (4th European Conference on Genetic Programming), Côme, Italie, 18-20 avril 2001. Actes parus dans la série Lecture Notes in Computer Science, E.J.W. Boers et al. (Eds), EvoWorkshop 2001, LNCS 2037, p. 473-483, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2001.

**Abstract:**

The NP-hard Capacitated Arc Routing Problem (CARP) allows to model urban waste collection or road gritting, for instance. Exact algorithms are still limited to small problems and metaheuristics are required for large scale instances. The paper presents the first genetic algorithm (GA) published for the CARP. This hybrid GA tackles realistic extensions like mixed graphs or prohibited turns. It displays excellent results and outperforms the best metaheuristics published when applied to two standard sets of benchmarks: the average deviations to lower bounds are 0.24% and 0.69% respectively, a majority of instances are solved to optimality, and eight best known solutions are improved. Keywords:

**Keywords:**

Capacitated Arc Routing Problem, CARP, genetic algorithm

**13. Journal of Intelligent Manufacturing - 1999**

**Ref.:**

Fleury G., J-Y. Goujon, M. Gourgand, P. Lacomme. "Multi-Agents Approach and Stochastic Optimization: Random Events in Manufacturing Systems". Journal of Intelligent Manufacturing, Vol. 10(1), p. 81-101. Mars 1999.

**Abstract:**

We propose a method to solve industrial problems and to take into account random events. It is called the triple coupling. It is based on stochastic algorithms, a simulation model and the

multi-agents model of artificial intelligence. The method we propose is easy to use and allows us to take into account most of the constraints found in manufacturing systems. Experts look for solutions to increasing the capacity of production. But the production can be disturbed by random events experienced by the system. Industrial experts need schedules which prevent the consequences of random events. Minimizing such consequences is very important to increasing system delivery. Capital investment is often very high in factories and the cost of the investment goes on regardless of whether the resources are running or not. The multi-agent approach is used to determine schedules for which the consequences of random events are low, and a stochastic algorithm is proposed which permits us to optimize a random variable. We prove that this algorithm finds, with probability one, the schedule of the production for which the consequences of random events are the lowest. We propose to measure the consequences of random events using an influence ratio. Our approach has been used to study the consequences of random events in Peugeot sand foundries of Sept-Fons (France). A benchmark test is presented to prove the efficiency of our solution. For the Peugeot sand foundry of Sept-Fond, random events increase the production time by about 20% compared with the production time without any random events occurring. We have determined schedules of production for which the consequences of random events are about 0.5%

**Keywords:**

Manufacturing systems, multi-agents technology, planning, random events, breakdowns, stochastic algorithms

**14. Journal Européen des Systèmes Automatisés - 1999**

**Ref.:**

Fleury G., M. Gourgand et P. Lacomme. "Le Couplage-Triple Stochastique pour la prise en compte des événements aléatoires dans les systèmes industriels de production". RAIRO-JESA-APII. Vol. 33(1-2), p. 9-42. 1999.

**Abstract:**

Les experts industriels sont à la recherche de solutions permettant d'accroître la capacité de production de leur système de production en prenant en compte les événements aléatoires qui perturbent leur fonctionnement. Nous proposons une méthode pour la prise en compte des événements aléatoires et la résolution des problèmes des systèmes industriels de production. Cette méthode repose sur un couplage, le Couplage-Triple, entre les algorithmes stochastiques, un modèle de simulation et un modèle multi-agents. L'approche multi-agents permet de déterminer un planning de la production peu sensible aux événements aléatoires. Nous proposons un algorithme d'optimisation stochastique pour l'optimisation d'une variable aléatoire. Nous donnons des résultats pour la fonderie Peugeot de Sept-Fons (France) : nous avons déterminé des plannings pour lesquels les conséquences des événements aléatoires (sur le temps de production) sont de 1% contre 15% auparavant. Les événements aléatoires pris en compte lors de cette étude sont des pannes et des variations de temps de cycle des machines et des transporteurs.

**Keywords:**

Systèmes Industriels de Production, Multi-Agents, Planification, Ordonnancement, événements Aléatoires, Pannes, Algorithmes Stochastiques

## 10.2 Les publications présentées en annexes

Fleury G., P. Lacomme, C. Prins and W. Ramdane-Cherif. "Improving robustness of solutions to arc routing problems". Journal of the Operational Research Society (JORS). Accepté pour publication. 2005.

Lacomme P., C. Prins and W. Ramdane-Cherif, "Competitive Memetic Algorithms for Arc Routing Problems". Annals of Operations Research. Vol 131. p. 159-185. 2004.

Lacomme P., C. Prins and M. Sevaux, "Multiobjective Capacitated Arc Routing Problem", in C.M. Fonseca, P.J. Fleming, E. Zitzler, K. Deb and L. Thiele (eds.), Evolutionary multi-criterion optimization (Proceedings of EMO 2003), LNCS 2632, p. 550-564, Springer, ISBN 3-540-01869-7, 2003.

Fleury G., M. Gourgand and P. Lacomme. "Meta-Heuristics for the Stochastic Hoist Scheduling Problem". International Journal of Production Research (IJPR). 39(15). p. 3419-3457. 2001.

Fleury G., M. Gourgand et P. Lacomme. "Le Couplage-Triple Stochastique pour la prise en compte des événements aléatoires dans les systèmes industriels de production". RAIRO-JESA-APII. Vol. 33(1-2), p. 9-42. 1999.

