

UNIVERSITÉ D'ANGERS

ÉCOLE DOCTORALE STIM  
SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE L'INFORMATION  
ET DE MATHÉMATIQUES

# THÈSE

pour obtenir le titre de

**Docteur en Sciences**

de l'Université d'Angers

**Mention : INFORMATIQUE**

Présentée et soutenue par

**Kamel BELKHELLADI**

**STRATÉGIES D'ÉCHANGE D'INFORMATIONS DANS UN  
SYSTÈME DE CALCUL DISTRIBUÉ POUR  
L'OPTIMISATION DES PROBLÈMES COMBINATOIRES**

Soutenue publiquement le 15 Février 2010

Devant le jury ci-dessous :

<i>Rapporteurs :</i>	Van-Dat CUNG	- Professeur, INP (Grenoble)
	Alain BUI	- Professeur, PRISM (Versailles)
<i>Directeur :</i>	Pierre CHAUVET	- Dr-Hdr, LISA-IMA (Angers)
<i>Co-Directeur :</i>	Arnaud SCHAL	- Enseignant-Chercheur, ISAIP (Dijon)
<i>Examineurs :</i>	Atulya K. NAGAR	- Professeur, FBCS (Liverpool, UK)
	Flavien BALBO	- Maître de conférences, LAMSADE (Paris 9)
	Xavier GANDIBLEUX	- Professeur, LINA (Nantes)

ED 503

# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
1.1	Contexte de l'étude . . . . .	1
1.2	Objectifs de la thèse . . . . .	4
1.2.1	Un algorithme génétique parallèle pour le CARP(CSM-PGA) . . . . .	4
1.2.2	Une plate-forme orienté-agent pour la conception de métaheuristiques parallèles(MAF-DISTA) . . . . .	5
1.3	Plan de la thèse . . . . .	5
1.4	Publications . . . . .	7
<b>2</b>	<b>Optimisation combinatoire et métaheuristiques parallèles</b>	<b>13</b>
2.1	Introduction . . . . .	15
2.2	Classification des métaheuristiques . . . . .	16
2.3	Classification des métaheuristiques parallèles . . . . .	18
2.3.1	La classification de Crainic et Toulouse (1998) . . . . .	18
2.3.2	La classification de Cung <i>et al.</i> (2002) . . . . .	19
2.3.3	La classification de Gras <i>et al.</i> (2003) . . . . .	20
2.4	Mesures de performance des métaheuristiques parallèles . . . . .	21
2.5	La coopération dans les métaheuristiques parallèles . . . . .	23
2.5.1	La nature des informations à partager . . . . .	23
2.5.2	Le moment où l'information est partagée . . . . .	24
2.5.3	Les processus entre lesquels l'information est partagée . . . . .	24
2.5.4	La co-évolution . . . . .	24
2.6	Plate-formes pour les métaheuristiques parallèles . . . . .	25
2.6.1	Les approches de conception des métaheuristiques parallèles . . . . .	25
2.6.2	Les critères d'évaluation d'une plate-forme . . . . .	26
2.6.3	État de l'art des plate-formes de métaheuristiques parallèles . . . . .	29
2.7	Bilan et conclusion . . . . .	34
<b>3</b>	<b>Les systèmes d'agents mobiles et les métaheuristiques parallèles</b>	<b>37</b>
3.1	Introduction . . . . .	39
3.2	Notions de base sur les systèmes multi-agents . . . . .	39
3.2.1	Définition de la notion d'agent et de système multi-agent . . . . .	39
3.3	Concepts de base des agents mobiles . . . . .	41
3.3.1	Évaluation distante . . . . .	41
3.3.2	Code à la demande . . . . .	42
3.3.3	Agents mobiles . . . . .	42
3.4	Définition d'un agent mobile . . . . .	43
3.5	Environnement d'exécution d'agents mobiles . . . . .	43
3.6	Services requis pour l'exécution d'agents mobiles . . . . .	44
3.6.1	Structure d'un agent mobile . . . . .	44
3.6.2	Création d'agents mobiles . . . . .	44

3.6.3	Migration d'un agent . . . . .	45
3.6.4	Service de nommage . . . . .	46
3.6.5	Service de localisation . . . . .	46
3.6.6	Communications entre les agents . . . . .	47
3.6.7	Exécution d'un agent . . . . .	47
3.6.8	Sécurité de l'agent . . . . .	48
3.6.9	Tolérance aux pannes . . . . .	49
3.6.10	Traçabilité . . . . .	50
3.6.11	Cycle de vie et contrôle de l'agent . . . . .	50
3.7	Le calcul distribué et les agents mobiles . . . . .	51
3.8	L'approche agent et les métaheuristiques parallèles . . . . .	52
3.9	Conclusion . . . . .	53
<b>4</b>	<b>Stratégies d'échange d'informations</b>	<b>57</b>
4.1	Introduction . . . . .	59
4.2	La coopération dans les métaheuristiques parallèles . . . . .	59
4.2.1	La nature des informations à partager . . . . .	60
4.2.2	Le moment où l'information est partagée . . . . .	61
4.2.3	Les processus entre lesquels l'information est partagée . . . . .	61
4.2.4	La co-évolution . . . . .	61
4.3	Stratégies d'échange d'informations . . . . .	62
4.3.1	Les stratégies de Middendorf et <i>al.</i> (2000) . . . . .	62
4.3.2	La stratégie d'immigration et intégration sélectives . . . . .	64
4.3.3	Stratégie d'ajustement des paramètres d'un AE par le biais d'échange . . . . .	65
4.4	Conclusion . . . . .	68
<b>5</b>	<b>CSM-PGA : Une approche client/serveur pour le CARP</b>	<b>69</b>
5.1	Introduction . . . . .	71
5.2	Analyse du problème expérimental (CARP) . . . . .	72
5.2.1	Définition du CARP . . . . .	72
5.2.2	Formulation mathématique du CARP . . . . .	72
5.3	Algorithme génétique pour le CARP . . . . .	74
5.3.1	Modélisation du CARP . . . . .	74
5.3.2	Codage des solutions . . . . .	75
5.3.3	Fonction objectif . . . . .	77
5.3.4	Sélection . . . . .	80
5.3.5	Opérateurs génétiques pour le CARP . . . . .	80
5.4	CSM-PGA pour le CARP . . . . .	83
5.5	Implémentation de CSM-PGA . . . . .	83
5.5.1	Contrôle des communications et stratégie de reconstruction . . . . .	85
5.5.2	Les caractéristiques du modèle proposé . . . . .	85
5.6	Expérimentations et évaluation des performances . . . . .	87
5.6.1	Une stratégie de tests . . . . .	87
5.6.2	Paramétrage de l'application . . . . .	87
5.6.3	Mise en œuvre d'un robot de test . . . . .	89

5.6.4	Tests et résultats . . . . .	91
5.7	Conclusion . . . . .	95
<b>6</b>	<b>MAF-DISTA : Une plate-forme d'agents mobiles pour le calcul distribué</b>	<b>105</b>
6.1	Introduction . . . . .	107
6.2	Choix de la plate-forme multi-agents . . . . .	107
6.3	Architecture générale de MAF-DISTA . . . . .	109
6.3.1	Le problème de la centralisation des connaissances . . . . .	116
6.3.2	Vers un système standard . . . . .	118
6.4	MAF-DISTA pour le CARP . . . . .	122
6.5	Simulations et résultats . . . . .	125
6.5.1	Résultats sur les instances de DeArmon . . . . .	126
6.5.2	Résultats sur les instances de Belenguer et Benavent . . . . .	126
6.5.3	Résultats sur les instances d'Eglese . . . . .	126
6.5.4	Comparaison des résultats de MAF-DISTA à la littérature . . . . .	127
6.5.5	Performance de MAF-DISTA et effet du nombre d'agents . . . . .	127
6.5.6	L'effet de la charge CPU sur l'accélération des calculs . . . . .	129
6.6	Les agents mobiles et leur efficacité dans MAF-DISTA . . . . .	131
6.7	Conclusion . . . . .	132
<b>7</b>	<b>Application de MAF-DISTA à la résolution du problème de collecte des conteneurs enterrés</b>	<b>135</b>
7.1	Introduction . . . . .	137
7.2	UWCOP - Problème de tournées de collecte des conteneurs enterrés . . . . .	138
7.2.1	Présentation du problème . . . . .	138
7.2.2	Formulation du problème . . . . .	139
7.2.3	Stratégie de résolution . . . . .	142
7.3	MAF-DISTA pour UWCOP . . . . .	144
7.3.1	Algorithme génétique pour le VRP . . . . .	144
7.4	Simulations et résultats . . . . .	148
7.4.1	Planification des tournées . . . . .	148
7.4.2	Tests sur le terrain . . . . .	148
7.5	Bilan . . . . .	149
<b>8</b>	<b>Application de MAF-DISTA à la résolution du problème de planification et ordonnancement multi-produit</b>	<b>157</b>
8.1	Introduction . . . . .	159
8.2	ETPSP . . . . .	159
8.2.1	Présentation du problème . . . . .	159
8.3	MAF-DISTA pour ETPSP . . . . .	160
8.3.1	Algorithme génétique pour le ETPSP . . . . .	161
8.4	Simulations et résultats . . . . .	164
8.4.1	Performance du modèle d'ajustement des paramètres . . . . .	167
8.4.2	L'effet de la charge CPU sur l'accélération des calculs . . . . .	167
8.5	Conclusion . . . . .	168

<b>9 Conclusion générale et perspectives</b>	<b>173</b>
9.1 Bilan . . . . .	173
9.2 Perspectives . . . . .	174
<b>A Les algorithmes parallèles</b>	<b>177</b>
A.1 Mesures de performance des algorithmes parallèles . . . . .	177
A.1.1 L'accélération . . . . .	177
A.1.2 L'efficacité . . . . .	177
A.1.3 L'iso-efficacité . . . . .	178
<b>B Sélection, croisement et mutation</b>	<b>179</b>
B.1 Croisement et mutation uniformes . . . . .	179
B.1.1 Croisement uniforme . . . . .	179
B.1.2 Mutation uniforme . . . . .	179
B.2 La sélection . . . . .	179
B.2.1 Sélection proportionnelle . . . . .	180
B.2.2 Sélection par tournoi . . . . .	183
<b>C Path-Scanning, Augment-Merge et l'Algorithme d'Ulusoy</b>	<b>185</b>
C.1 Introduction . . . . .	185
C.2 Path-Scanning . . . . .	185
C.2.1 Principe . . . . .	185
C.2.2 Algorithme . . . . .	185
C.2.3 Complexité . . . . .	186
C.3 Augment-Merge . . . . .	187
C.3.1 Principe . . . . .	187
C.3.2 Algorithme . . . . .	187
C.3.3 Complexité . . . . .	189
C.4 Algorithme d'Ulusoy . . . . .	190
C.4.1 Principe . . . . .	190
C.4.2 Algorithme . . . . .	190
C.4.3 Complexité . . . . .	192
<b>D Étude de la charge du DF</b>	<b>193</b>
D.1 Introduction . . . . .	193
D.2 Étude de l'influence des entrées du DF sur le temps de réponse . . . . .	193
D.2.1 Protocole de test . . . . .	193
D.2.2 Résultats . . . . .	194
D.3 Étude de l'influence de la diversité des entrées du DF sur le temps de réponse	194
D.3.1 Protocole de test . . . . .	194
D.3.2 Résultats . . . . .	195
D.4 Étude de l'influence de la fréquence des demandes sur le temps de réponse . .	195
D.4.1 Protocole de test . . . . .	195
D.4.2 Résultats . . . . .	196
D.5 Étude de l'influence du nombre d'interrogeurs sur le temps de réponse . . .	196

---

D.5.1	Protocole de test . . . . .	196
D.5.2	Résultats . . . . .	196

<b>Bibliographie</b>	<b>199</b>
----------------------	------------

---

## Résumé

---

Ce manuscrit décrit les travaux de recherche effectués au cours de ma thèse, au sein de l'équipe informatique et recherche opérationnelle du laboratoire CREAM<sup>1</sup>, en collaboration avec le laboratoire LISA<sup>2</sup>, et avec le soutien du Conseil Général de la ville d'Angers. Ces travaux de recherche se situent à l'intersection des domaines de l'optimisation combinatoire et des systèmes multi-agents. Ils s'inscrivent dans la continuité des propositions de modèles ou de plates-formes pour les métaheuristiques parallèles.

Ce rapport réunit différentes notions du parallélisme, du paradigme multi-agents et des métaheuristiques afin d'apporter des méthodes de résolution performantes (robustes et auto-adaptatives) à des problèmes d'optimisation combinatoire réels. Il démontre que l'introduction de stratégies de parallélisation et d'échange d'informations à un algorithme à population permet à ce dernier d'améliorer considérablement ses facultés de recherche de solutions. En outre, l'utilisation des agents mobiles permet une exploitation optimale des ressources de calcul inutilisées dans un organisme (laboratoire, entreprise) et de favoriser ainsi l'autonomie des processus de calcul pour pouvoir gérer les éventuelles pannes dans un réseau. Le succès de cette approche dans la résolution d'un problème de tournées de véhicules et d'un problème d'ordonnancement de production, montre l'intérêt pratique de ces méthodes et leurs retombées économiques potentielles.

Ce travail de recherche représente l'une des premières explorations des possibilités offertes par deux domaines fort prometteurs de l'intelligence artificielle distribuée et de la recherche opérationnelle. L'union de méthodes auto-adaptatives et d'une puissance de calcul imposante pourrait fort bien se révéler un outil performant pour la résolution de problèmes d'une telle envergure.

**Mots clés :** Optimisation combinatoire, agents, échange d'informations.

---

<sup>1</sup>Centre de Recherche et d'Étude des Applications de Mathématiques, Université Catholique de l'Ouest

<sup>2</sup>Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Automatisés, Université d'Angers

---

## Information exchange strategies in distributed computing systems

**Abstract :** This thesis describes my *PHD* work carried out within the computer science and operations research group of the CREAM<sup>3</sup> laboratory, in collaboration with the LISA<sup>4</sup> laboratory, and the support of Angers's General Council. The reported work belongs at the same time to the multi-agent system (MAS), parallelism and metaheuristics domains, and more precisely to develop an intelligent distributed computing system and to compare different information exchange strategies in a distributed memory architecture for parallel computing (Networked PCs).

This thesis combines different notions of parallelism, multi-agent paradigm and metaheuristics to provide a high performance method to solve real combinatorial problems. It proves that including information exchange and parallelisation strategies to a population-based algorithm can improve its ability. Instead of using expensive parallel computing facilities, in this work we propose to implement a parallel computation model on easily available networked PCs, and present a multi-agent framework to support parallelism. In this model, agents can easily be programmed to initiate the execution of actions autonomously, and they can dynamically move from machine to machine to discover services and communicate with other agents. To evaluate the proposed approach, different kinds of experiments have been conducted to assess the developed system mainly on a vehicle routing problem and an industrial scheduling problem. Results obtained show the efficiency of our approach.

**Keywords :** Combinatorial optimization, agents, information exchange strategies.

---

---

<sup>3</sup>Centre de Recherche et d'Étude des Applications de Mathématiques, Université Catholique de l'Ouest

<sup>4</sup>Laboratoire d'Ingénierie des Systèmes Automatisés, Université d'Angers