



# THESE

Pour l'obtention du grade de  
**DOCTEUR**

**DISCIPLINE : PHYSIQUE**  
**SPECIALITE : ELECTRONIQUE - MICROELECTRONIQUE**

**EQUIPE : COMPOSANTS ET MICROELECTRONIQUE**

Présentée par

**Bachir BENHALA**

**Adaptation de l'Algorithme des Colonies de Fourmis  
pour l'Optimisation et le Dimensionnement des  
Circuits Intégrés Analogiques**

Directeur de thèse : Dr. Ali AHAITOUF  
Co-directeur de thèse : Dr. Abdellah MECHAQRANE

Soutenue le 12/01/2013 devant la Commission d'examen

Mr. Mohammed MEKNASSI	PES	FS Dhar El Mehraz	Fès	Président
Mr. Mustapha ALAMI	PES	INPT	Rabat	Rapporteur
Mr. Omar BOUATTANE	PES	ENSET	Mohammedia	Rapporteur
Mme. Fatima ERRAHIMI	PES	FST	Fès	Rapporteur
Mr. Nabih EL OUAZANI	PES	FST	Fès	Examineur
Mr. Mourad FAKHFAKH	PH	ENIS	Sfax	Examineur
Mr. Mohammed RAMDANI	HDR	ESOE	Angers	Examineur
Mr. Ali AHAITOUF	PES	FST	Fès	Directeur de thèse
Mr. Abdellah MECHAQRANE	PES	FST	Fès	Co-directeur de thèse

---

# Résumé

---

Les métaheuristiques trouvent en électronique un champ fertile d'application où la complexité de réalisation des circuits intégrés croît de jour en jour, ce qui rend leurs conceptions impossibles avec des méthodes conventionnelles.

L'optimisation par l'algorithme des colonies de fourmis (ACO) est une nouvelle classe d'algorithmes proposée pour résoudre les problèmes NP-difficile. Cette métaheuristique s'inspire du comportement collectif des fourmis. Celles-ci, bien qu'ayant individuellement des capacités cognitives limitées, sont capables collectivement de construire une solution au problème posé, en s'appuyant sur leur expérience collective.

Dans cette thèse, nous nous intéressons à l'application de la métaheuristique d'optimisation par colonie de fourmis pour résoudre des problèmes d'optimisation de dimensionnement des circuits électroniques analogiques et d'automatiser leur conception. Dans ce cadre, l'ACO a été adapté aux problèmes mono et multi-objectifs. Une étude de robustesse a d'abord été menée sur différentes fonctions mathématiques typiques de tests. Ensuite, les algorithmes proposés ont été appliqués pour optimiser des circuits analogiques standards, tel que, les convoyeurs de courant, les amplificateurs analogiques et des filtres analogiques. Les résultats trouvés sont ensuite comparés à ceux obtenus par d'autres techniques issues de la famille des métaheuristiques.

**Mots-clefs :** *Optimisation, métaheuristiques, algorithme des colonies de fourmis, CMOS, circuits intégrés analogiques, CCII, ICCII, Ampli-Op, OTA, filtres analogiques.*

---

# Table des matières

---

Remerciements . . . . .	I
Avant propos . . . . .	II
Glossaire . . . . .	III
Résumé . . . . .	IV
Abstract . . . . .	V
Liste des algorithmes . . . . .	VI
Liste des figures . . . . .	VII
Liste des tableaux . . . . .	IX
<b>Introduction générale . . . . .</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre 1 :</b>	
<b>Algorithme des colonies de fourmis . . . . .</b>	<b>5</b>
1.1. Introduction . . . . .	5
1.2. Optimisation mono-objectif . . . . .	6
1.2.1 Complexité théorique d'un problème . . . . .	6
1.2.2 Optimisation mono-objectif . . . . .	7
1.2.3 Métaheuristiques pour l'optimisation mono-objectif . . . . .	8
1.3. Algorithme des colonies de fourmis . . . . .	9
1.3.1 Optimisation naturelle : Pistes de phéromone . . . . .	9
1.3.2 Algorithme des colonies de fourmis et problème du voyageur de commerce . . . . .	10
1.3.3 Algorithme de base : le « Ant System » . . . . .	12
1.3.4 Variantes . . . . .	14
1.3.5 Choix des paramètres . . . . .	16
1.3.6 Formalisation et propriétés d'un algorithme des colonies de fourmis . . . . .	17
1.3.6.1 Formalisation . . . . .	17
1.3.6.2 Phéromones et mémoire . . . . .	18
1.3.6.3 Intensification/diversification . . . . .	18
1.3.6.4 Recherche locale et heuristique . . . . .	19
1.3.6.5 Parallélisme . . . . .	19

1.4. Optimisation multi-objectifs. . . . .	20
1.4.1 Définition du problème multi-objectifs . . . . .	20
1.4.2 Approche agrégative . . . . .	21
1.4.3 approche non-Pareto . . . . .	22
1.4.4 approche Pareto . . . . .	23
1.5. L'ACO en optimisation multi-objectifs. . . . .	23
1.5.1 L'algorithme « Multiple Objective Ant-Q ». . . . .	23
1.5.2 Les algorithmes BicriterionAnt et BicriterionMC . . . . .	24
1.5.3 L'algorithme « Pareto Ant Colony Optimization » . . . . .	25
1.5.4 L'algorithme « Multiple Ant Colony System » pour le problème de tournées de véhicules avec fenêtres de temps . . . . .	25
1.5.5 L'algorithme « Multiple Ant Colony System ». . . . .	25
1.5.6 L'algorithme « COMPETants » . . . . .	26
1.5.7 L'algorithme « Multi-objective Network ACO ». . . . .	26
1.5.8 L'algorithme « Crowding Population-based Ant Colony Optimization » . . . . .	27
1.6. Classification des algorithmes MOACO . . . . .	27
1.7. Evaluation les performances d'un algorithme . . . . .	30
1.7.1 La métrique Covariance . . . . .	30
1.7.2 La métrique Hypervolume . . . . .	30
1.7.3 La métrique Espacement. . . . .	31
1.8. Les métaheuristiques en électronique . . . . .	31
1.9. Conclusion. . . . .	32

## Chapitre 2 :

<b>Adaptation de l'ACO : Description et validation. . . . .</b>	<b>34</b>
2.1. Introduction . . . . .	34
2.2. Adaptation de l'ACO. . . . .	35
2.2.1 Principe de l'adaptation . . . . .	35
2.2.2 Algorithmes ACO et MOACO . . . . .	36
2.2.2.1 Algorithme en mono-objectif (ACO) . . . . .	36
2.2.2.2 Algorithme en multi-objectifs (MOACO). . . . .	39
2.3. Paramétrage et validation de l'ACO et du MOACO. . . . .	40
2.3.1 Algorithme ACO . . . . .	40

2.3.1.1 Paramétrage de l'ACO . . . . .	40
2.3.1.2 Evaluation de l'ACO. . . . .	42
2.3.1.2.1 Evaluation de la convergence. . . . .	43
2.3.1.2.2 Test de robustesse. . . . .	43
2.3.1.3 Critères d'arrêt et nombre de fourmis . . . . .	44
2.3.2 Algorithme MOACO. . . . .	46
2.3.2.1 Tests d'évaluation du MOACO. . . . .	46
2.3.2.2 Résultats des tests du MOACO . . . . .	47
2.3.2.3 Mesure de performances . . . . .	49
2.4. Conclusion. . . . .	53

**Chapitre 3 :**

<b>Application de l'ACO et du MOACO au dimensionnement de circuits analogiques en mode courant. . . . .</b>	<b>55</b>
3.1. Introduction . . . . .	55
3.2. Transistor MOS . . . . .	56
3.2.1 Modes de fonctionnement . . . . .	56
3.2.2 Modèle en régime de variation de petits signaux . . . . .	57
3.2.2.1 Modèle en base fréquence . . . . .	57
3.2.2.2 Modèle en haute fréquence. . . . .	58
3.3. Applications de l'ACO et du MOACO aux circuits en mode courant :	
Convoyeurs de courant. . . . .	60
3.3.1 Convoyeur de courant de seconde génération. . . . .	60
3.3.1.1 Fonction objectif et contraintes. . . . .	63
3.3.1.2 Résultats d'optimisation et comparaisons . . . . .	65
3.3.2 Convoyeur de courant inversé de seconde génération . . . . .	74
3.3.2.1 Fonction objectif et contraintes. . . . .	75
3.3.2.2 Optimisation et comparaison . . . . .	76
3.4. Filtre passe-bande à base de CCIIs . . . . .	79
3.4.1 Constitution . . . . .	79
3.4.1.1 Simulation d'une inductance . . . . .	79
3.4.1.2 Résistance négative . . . . .	79
3.4.1.3 L'architecture du filtre étudié . . . . .	80
3.4.2 Résultats . . . . .	80
3.5. Conclusion. . . . .	82

**Chapitre 4 :**

<b>Application de l'ACO et du MOACO au dimensionnement de circuits analogiques en mode tension . . . . .</b>	<b>83</b>
4.1. Introduction . . . . .	83
4.2. Applications de l'ACO et du MOACO aux circuits en mode tension : Amplificateurs. . . . .	83
4.2.1 Amplificateur opérationnel. . . . .	83
4.2.1.1 Performances et principe d'optimisation. . . . .	84
4.2.1.2 Résultats d'optimisation et comparaisons . . . . .	88
4.2.1.2.1 Le compromis optimal . . . . .	88
4.2.1.2.2 Comparaison de résultats. . . . .	90
4.2.1.2.3 Le multi-objectifs . . . . .	91
4.2.1.2.4 Comparaison de résultats. . . . .	92
4.2.2 Amplificateur opérationnel de transconductance . . . . .	93
4.2.2.1 Performances et contraintes . . . . .	94
4.2.2.2 Résultats d'optimisation et comparaisons . . . . .	98
4.3. Filtre Butterworth. . . . .	101
4.3.1. Filtre Butterworth du second ordre. . . . .	101
4.3.2 Filtre Butterworth 4 <sup>ème</sup> ordre. . . . .	102
4.3.3 Résultats d'optimisation . . . . .	103
4.4. Conclusion. . . . .	105
<b>Conclusion générale et perspectives. . . . .</b>	<b>106</b>
<b>Annexes A : Métaheuristiques . . . . .</b>	<b>108</b>
<b>Annexes B : Test mono-objectif . . . . .</b>	<b>117</b>
<b>Annexes C : Test multi-objectifs . . . . .</b>	<b>120</b>
<b>Annexes D : Transistor MOS. . . . .</b>	<b>121</b>
<b>Annexes E : détails des calculs . . . . .</b>	<b>125</b>
<b>Annexes F : Ensemble de travaux . . . . .</b>	<b>131</b>
<b>Références bibliographiques . . . . .</b>	<b>133</b>