

M

Johann Dréo - Alain Pétrowski
Patrick Siarry - Éric Taillard

Ouvrage coordonné par Patrick Siarry

Métaheuristiques pour l'optimisation difficile

Recuit simulé, recherche avec tabous, algorithmes évolutionnaires
et algorithmes génétiques, colonies de fourmis...

Avec trois études de cas détaillées

- Optimisation de réseaux UMTS (France Télécom R&D)
- Gestion de trafic aérien (ENAC)
- Optimisation de tournées de véhicules (ILOG)

EYROLLES

Métaheuristiques pour l'optimisation difficile

Table des matières

Avant-propos	1
I Présentation des principales métaheuristiques	19
1 La méthode du recuit simulé	21
1.1 Introduction	21
1.2 Présentation de la méthode	22
1.2.1 Analogie entre un problème d'optimisation et certains phénomènes physiques	22
1.2.2 Recuit réel et recuit simulé	23
1.2.3 Algorithme du recuit simulé	23
1.3 Approches théoriques	24
1.3.1 Convergence théorique du recuit simulé	25
1.3.2 Espace des configurations	26
1.3.3 Règles d'acceptation	27
1.3.4 Programme de recuit	27
1.4 Parallélisation de l'algorithme du recuit simulé	29
1.5 Quelques applications	31
1.5.1 Problèmes modèles d'optimisation combinatoire	32
1.5.2 Placement des circuits électroniques	34
1.5.3 Recherche d'un schéma équivalent en électronique	37
1.5.4 Applications pratiques dans des domaines divers	38
1.6 Avantages et inconvénients de la méthode	40
1.7 Suggestions pratiques simples pour démarrer	40
1.8 Bibliographie commentée	41
2 La recherche avec tabous	43
2.1 Introduction	43
2.2 Problème de l'affectation quadratique	44
2.3 Recherche avec tabous de base	46
2.3.1 Voisinage	46
2.3.2 Mouvements, voisinage	47
2.3.3 Évaluation du voisinage	49

2.4	Liste de mouvements candidats	51
2.5	Mémoire à court terme	52
2.5.1	Table de hachage	52
2.5.2	Liste d'attributs tabous	54
2.5.3	Durée des interdictions	55
2.5.4	Critères d'aspiration	61
2.6	Convergence de la recherche avec tabous	61
2.7	Direction de la recherche à long terme	64
2.7.1	Fréquence	64
2.7.2	Obligation d'effectuer des mouvements	66
2.8	Oscillations stratégiques	67
2.9	Conclusion	67
2.10	Bibliographie commentée	67
3	Les algorithmes évolutionnaires	69
3.1	De la génétique à l'ingénierie	69
3.2	L'algorithme évolutionnaire générique	71
3.2.1	Opérateurs de sélection	71
3.2.2	Opérateurs de variation	71
3.2.3	La boucle générationnelle	72
3.2.4	Résolution d'un problème simple	73
3.3	Opérateurs de sélection	75
3.3.1	Pression de sélection	75
3.3.2	Dérive génétique	76
3.3.3	Sélection proportionnelle	77
3.3.4	Sélection par tournois	82
3.3.5	Sélection déterministe	83
3.3.6	Sélection pour le remplacement	83
3.3.7	Fonction de performance	85
3.4	Opérateurs de variation et représentations	86
3.4.1	Généralités sur les opérateurs de variation	86
3.4.2	Représentation binaire	90
3.4.3	Représentation réelle	93
3.4.4	Exemples de représentations discrètes pour les problèmes de permutation	100
3.4.5	Représentation d'arbres syntaxiques pour la programmation génétique	105
3.5	Cas particulier des algorithmes génétiques	110
3.6	Considérations sur la convergence des algorithmes évolutionnaires	111
3.7	Conclusion	112
3.8	Glossaire	112
3.9	Bibliographie commentée	113

4 Les algorithmes de colonies de fourmis	115
4.1 Introduction	115
4.2 Comportements collectifs des insectes sociaux	116
4.2.1 Auto-organisation et comportement	116
4.2.2 Optimisation naturelle : pistes de phéromones	119
4.3 Optimisation par colonies de fourmis et problème du voyageur de commerce	121
4.3.1 Algorithme de base	122
4.3.2 Variantes	123
4.3.3 Choix des paramètres	126
4.4 Autres problèmes combinatoires	126
4.5 Formalisation et propriétés d'un algorithme de colonie de fourmis . . .	126
4.5.1 Formalisation	127
4.5.2 Phéromones et mémoire	128
4.5.3 Intensification/diversification	129
4.5.4 Recherche locale et heuristiques	129
4.5.5 Parallélisme	130
4.5.6 Convergence	130
4.6 Perspectives	130
4.6.1 Optimisation continue	131
4.6.2 Problèmes dynamiques	138
4.6.3 Métaheuristiques et éthologie	139
4.6.4 Liens avec d'autres métaheuristiques	139
4.7 Conclusion	141
4.8 Bibliographie commentée	141
 II Variantes, extensions et conseils méthodologiques	 143
5 Quelques autres métaheuristiques	145
5.1 Introduction	145
5.2 Quelques variantes du recuit simulé	146
5.2.1 Diffusion simulée	146
5.2.2 Recuit microcanonique	147
5.2.3 Méthode du seuil	148
5.2.4 Méthode du "grand déluge"	149
5.2.5 Méthode du "voyage de record en record"	150
5.3 Méthode du bruitage	151
5.4 Méthode de recherche distribuée	151
5.5 Méthode "Aliénor"	152
5.6 Méthode des essais particuliers	154
5.7 Méthode de l'estimation de distribution	158
5.8 Méthode GRASP	161
5.9 Méthode "Cross-Entropy"	162
5.10 Systèmes immunitaires artificiels	163

5.11	Méthode de l'évolution différentielle	165
5.12	Algorithmes inspirés des insectes sociaux	167
5.13	Bibliographie commentée	168
6	Extensions	171
6.1	Introduction	171
6.2	Adaptation aux problèmes à variables continues	171
6.2.1	Cadre général de l'optimisation continue "difficile"	171
6.2.2	Quelques métaheuristiques continues	177
6.3	Optimisation multimodale	187
6.3.1	Le problème	187
6.3.2	Nichage par la méthode du partage	188
6.3.3	Nichage par la méthode de surpeuplement déterministe	190
6.3.4	Procédure d'éclaircissement	192
6.3.5	Spéciation	194
6.4	Optimisation multiobjectif	196
6.4.1	Formalisation du problème	196
6.4.2	Méthodes exploitant le recuit simulé	198
6.4.3	Algorithmes évolutionnaires multiobjectifs	201
6.5	Optimisation évolutionnaire avec contraintes	206
6.5.1	Méthodes de pénalisation de la fonction de performance	207
6.5.2	Supériorité des individus réalisables	209
6.5.3	Méthodes de réparation	209
6.5.4	Opérateurs de variation respectant la structure des contraintes	211
6.5.5	Autres méthodes de prise en compte des contraintes	212
6.6	Conclusion	212
6.7	Bibliographie commentée	213
7	Techniques de modélisation et comparaison de méthodes	215
7.1	Introduction	215
7.2	Modélisation du problème	217
7.3	Choix du voisinage	218
7.3.1	Voisinages "simples"	218
7.3.2	Chaîne d'éjections	220
7.3.3	Décomposition en sous-problèmes : POPMUSIC	221
7.3.4	Conclusions sur la modélisation et le voisinage	223
7.4	Méthode d'amélioration, recuit, tabou... ?	225
7.5	Programmation à mémoire adaptative	225
7.5.1	Colonies de fourmis	226
7.5.2	Algorithmes évolutionnaires ou mimétiques	226
7.5.3	Recherche par dispersion	226
7.5.4	Construction de vocabulaire	228
7.5.5	Chemin de liaison	229
7.6	Comparaison d'heuristiques itératives	230
7.6.1	Comparaison de taux de succès	231

7.6.2	Comparaison de méthodes d'optimisation itérative	233
7.7	Conclusion	234
7.8	Bibliographie commentée	237
III	Études de cas	239
8	Étude de cas n°1 : optimisation de réseaux mobiles UMTS à l'aide des algorithmes génétiques	241
8.1	Introduction	241
8.2	Introduction aux réseaux radio mobiles	242
8.2.1	Réseau cellulaire	242
8.2.2	Caractéristiques du canal radio	243
8.2.3	Interface radio de l'UMTS	245
8.3	Définition du problème d'optimisation	250
8.3.1	Planification radio d'un réseau UMTS	250
8.3.2	Définition du problème d'optimisation	253
8.4	Application de l'algorithme génétique à la planification automatique	254
8.4.1	Codage	255
8.4.2	Opérateurs génétiques	255
8.4.3	Évaluation des individus	257
8.5	Résultats	257
8.5.1	Optimisation de la capacité	259
8.5.2	Optimisation des charges	260
8.5.3	Optimisation des interférences inter-cellulaires	262
8.5.4	Optimisation de la couverture	262
8.5.5	Optimisation de la probabilité d'accès	263
8.6	Conclusion	265
9	Étude de cas n°2 : algorithmes génétiques appliqués à la gestion du trafic aérien	267
9.1	Résolution de conflit en route	267
9.1.1	Complexité du problème de résolution de conflit	269
9.1.2	Méthodes de résolution existantes	270
9.1.3	Modélisation du problème	271
9.1.4	Mise en oeuvre de l'algorithme génétique	274
9.1.5	Étude théorique sur un exemple simple	278
9.1.6	Application numérique	281
9.1.7	Remarques	284
9.2	Gestion du roulage sur les grands aéroports	285
9.2.1	Modélisation	285
9.2.2	Fonction de coût	285
9.2.3	L'aéroport	286
9.2.4	Le trafic	287
9.3	Simulation	288

9.3.1	BB : méthode 1 contre n	289
9.3.2	GA et GA+BB : algorithmes génétiques	290
9.4	Résultats	291
9.4.1	Simulations	291
9.4.2	Comparaison des stratégies	292
9.4.3	Remarques	293
9.5	Conclusion	293
10	Étude de cas n°3 : programmation par contraintes et colonies de fourmis appliquées aux problèmes de tournées de véhicules	295
10.1	Introduction	295
10.2	Problèmes de tournées de véhicules et programmation par contraintes	296
10.2.1	Problèmes de tournées de véhicules	296
10.2.2	Programmation par contraintes	297
10.2.3	Programmation par contraintes appliquée au PDP : ILOG Dispatcher	303
10.3	Les colonies de fourmis	304
10.3.1	Comportement réel des fourmis	304
10.3.2	Colonies de fourmis, problème de tournées de véhicules et programmation par contraintes	305
10.3.3	Algorithme à base de fourmis avec "backtracking"	305
10.4	Résultats expérimentaux	312
10.5	Conclusion	314
	Conclusion	317
	Annexes	321
A	Modélisation du recuit simulé à l'aide du formalisme des chaînes de Markov	321
B	Exemple complet d'implémentation de recherche avec tabous pour l'affectation quadratique	329
	Bibliographie	335
	Index	353

Métaheuristiques pour l'optimisation difficile

Biologiste de formation, Johann Dréo a d'abord étudié les fourmis, avant de s'orienter vers un doctorat en informatique. Ses recherches portent sur les algorithmes d'optimisation inspirés du comportement des insectes sociaux.

Alain Pérowski est maître de conférences à l'INT (Institut national des télécommunications) d'Evry. Ses principaux domaines de recherche sont les systèmes complexes, les réseaux de neurones formels et le calcul évolutionnaire.

Patrick Siarry est ingénieur de l'École Supérieure d'Électricité et professeur à l'université Paris XII Val-de-Marne, où il dirige des travaux de recherche sur les méthodes heuristiques récentes pour l'«optimisation difficile».

Éric Taillard est professeur à l'École d'ingénieurs du Canton de Vaud et dirige l'Institut d'informatique appliquée. Ses thèses de doctorat et d'habilitation portent sur la recherche tabou et la programmation à mémoire adaptative.

► Les métaheuristiques et leurs applications

Les ingénieurs, les économistes, les décideurs se heurtent quotidiennement, quel que soit leur secteur d'activité, à des problèmes d'optimisation. Il peut s'agir de minimiser un coût de production, d'optimiser le parcours d'un véhicule ou le rendement d'un portefeuille boursier, de rationaliser l'utilisation de ressources, d'améliorer les performances d'un circuit électronique, de fournir une aide à la décision à des managers, etc.

Cet ouvrage présente une famille de techniques d'optimisation, appelées «métaheuristiques», adaptées à la résolution de problèmes pour lesquels il est difficile de trouver un optimum global ou de bons optimums locaux par des méthodes plus classiques.

► Un ouvrage de référence illustré d'études de cas

La première partie de l'ouvrage présente les principales métaheuristiques : recuit simulé, recherche avec tabous, algorithmes évolutionnaires et algorithmes génétiques, colonies de fourmis.

La deuxième partie décrit différentes variantes et extensions de ces méthodes, ainsi que de nouvelles voies de recherche. Y sont également proposés des conseils méthodologiques : techniques de modélisation, comparaisons de méthodes et choix de la méthode la mieux adaptée à un problème donné.

La troisième partie présente trois études de cas réels : optimisation de réseaux de mobiles UMTS (France Télécom R&D), gestion de trafic aérien (ENAC), optimisation de tournées de véhicules (ILOG).

► À qui s'adresse ce livre ?

- Aux élèves ingénieurs et étudiants en mathématiques appliquées, algorithmique, recherche opérationnelle, gestion de production, économie et finance, aide à la décision, etc.
- Aux ingénieurs, enseignants-chercheurs, informaticiens, industriels, économistes et décideurs ayant à résoudre des problèmes complexes d'optimisation et d'aide à la décision.

Code éditeur : G11368 • ISBN : 2-212-11368-4

EYROLLES