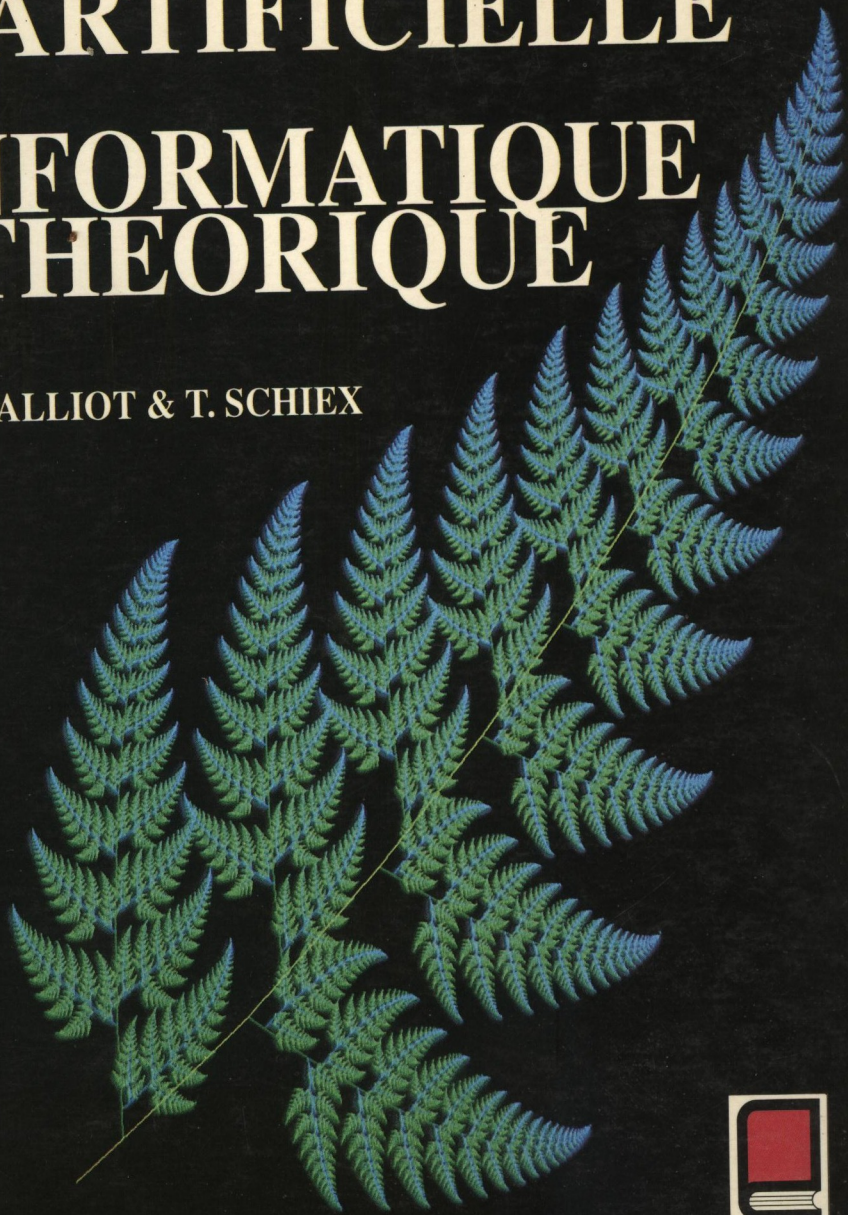


INTELLIGENCE & ARTIFICIELLE & INFORMATIQUE THEORIQUE

J.-M. ALLIOT & T. SCHIEX



INTELLIGENCE
IA
ARTIFICIELLE



CÉPADUÉS
ÉDITIONS

Table des matières

Avant-propos	21
1 Définir l'Intelligence Artificielle	25
1.1 Qu'est-ce que l'intelligence artificielle ?	25
1.2 Historique	26
1.2.1 La préhistoire : 1945-1955	26
1.2.2 Les débuts : 1955-1970	27
1.2.3 La spécialisation : 1970-1980	28
1.2.4 Une reconnaissance : 1980-1990	29
1.3 Les différentes approches de l'IA	30
1.3.1 L'approche cognitive	31
1.3.2 L'approche pragmatiste	32
1.3.3 L'approche connexionniste	33
1.3.4 Convergence de ces approches ?	34
1.4 Notre définition de l'IA	35
1.5 Problèmes typiques d'IA	36
1.5.1 Les problèmes spécifiés et difficiles	37
1.5.2 Problèmes recouvrant un domaine précis	38
1.5.3 Autres domaines liés à l'IA	39
I Logique mathématique, résolution	41
2 Le calcul propositionnel	43
2.1 Méthodologie	43
2.2 Introduction informelle	44
2.3 Définitions	44
2.4 Théorie des modèles	45
2.4.1 Introduction	45
2.4.2 Définition formelle en calcul propositionnel	46
2.4.3 Application pratique : les tables de vérité	47
2.4.4 Tautologies	48
2.4.5 Substitution	49
2.4.6 La notion de conséquence valide	49
2.5 Théorie de la démonstration	51
2.5.1 Axiomatique du calcul propositionnel	51
2.5.2 Démonstrations	53

2.5.3	Déduction	53
2.6	Propriétés fondamentales	54
2.6.1	Adéquation	54
2.6.2	Consistance	54
2.6.3	Complétudes	55
2.6.4	Décidabilité	56
2.6.5	Remarques	56
3	Le calcul des prédicats	57
3.1	Introduction	57
3.2	Définitions	58
3.2.1	Variables liées, variables libres	59
3.2.2	Clôture d'une formule	60
3.3	Théorie de la démonstration	60
3.3.1	Axiomatique du calcul des prédicats	61
3.3.2	Démonstration – Déduction	62
3.3.3	Théorème de la déduction	62
3.4	Théorie des modèles	62
3.4.1	Introduction informelle	62
3.4.2	Interprétation	62
3.4.3	Formule valide	64
3.4.4	Exemple de table de vérité	64
3.4.5	Satisfiabilité, insatisfiabilité et conséquence	65
3.4.6	Le problème des domaines infinis	66
3.5	Propriétés fondamentales	66
3.5.1	Adéquation - Consistance	66
3.5.2	Complétude	66
3.5.3	Décidabilité	67
3.5.4	Remarques	67
4	Les machines de Turing	69
4.1	Introduction	69
4.2	Machine de Turing déterministe	70
4.3	Notion de calcul	72
4.3.1	Calcul d'un argument et fonction calculable	72
4.3.2	Exemple : $f(x) = x + 1$	73
4.4	Réalisation pratique	74
4.5	Les machines de Turing non déterministes	75
4.6	Remarques	75
5	Les systèmes formels	77
5.1	Un peu d'histoire	77
5.2	Les problèmes des mathématiques	79
5.2.1	Les malheurs de la géométrie euclidienne	79
5.2.2	L'infini	80
5.2.3	Les ensembles	80
5.2.4	Les paradoxes	82
5.3	Intuitionnistes contre formalistes	83

5.3.1	Les intuitionnistes	83
5.3.2	Les formalistes	84
5.4	L'arithmétique formelle	85
5.5	Décidabilité, complétude et consistance	88
5.5.1	Décidabilité et calculabilité	88
5.5.2	Construction d'une fonction non-calculable	89
5.5.3	Indécidabilité de \mathbb{N}	92
5.5.4	Incomplétude de \mathbb{N}	92
5.5.5	Non démontrabilité de la consistance de \mathbb{N}	94
5.6	Les conséquences	95
5.7	Faut-il jeter la logique ?	96
6	Calcul propositionnel et résolution	99
6.1	Introduction	99
6.2	Principe de déduction	99
6.2.1	Résultats préliminaires	99
6.2.2	Interprétation du résultat	100
6.2.3	Les arbres sémantiques	100
6.2.4	Algorithme de Quine	101
6.2.5	Algorithme de réduction	101
6.3	Formes normales	102
6.3.1	Théorème de normalisation	102
6.3.2	Exemple	103
6.3.3	Vocabulaire	103
6.3.4	Algorithme de Davis et Putnam	104
6.3.5	L'évaluation sémantique	105
6.3.6	Révision rapide	108
6.4	Principe de résolution	109
6.4.1	Théorème de résolution	109
6.4.2	Application	110
6.5	Les clauses de Horn	110
6.5.1	Résultats généraux	110
6.5.2	Clauses de Horn et résolution	111
6.5.3	Exemple de résolution	111
6.5.4	Interprétation intuitive	112
7	Calcul des prédicats et résolution	113
7.1	Introduction	113
7.2	Formes normales	113
7.2.1	Formes prénexes	113
7.2.2	Exemple	114
7.3	Skolémisation	115
7.3.1	Formes de Skolem	115
7.3.2	Algorithme de Skolémisation	115
7.3.3	Exemple	115
7.3.4	Démonstration	116
7.3.5	Forme standard	116
7.4	Théorème de Herbrand	116

7.5	Unification	118
7.5.1	Substitution	118
7.5.2	Unification	120
7.6	Principe de résolution	120
7.6.1	Algorithme et exemple d'application	121
8	Les logiques non-classiques	125
8.1	Logiques faibles	125
8.1.1	La logique absolue A	125
8.1.2	La logique positive P	126
8.1.3	La logique minimale M	127
8.1.4	La logique intuitionniste J	127
8.2	Introduction aux logiques modales	128
8.3	Les modalités	128
8.4	Logique aléthique	129
8.4.1	Le système T	130
8.4.2	Le système S4	130
8.4.3	Le système S5	131
8.5	Théorie des modèles	131
8.5.1	Les tables de vérité	131
8.5.2	Sémantique des mondes possibles	131
8.5.3	Interprétation intuitive	132
8.5.4	Un modèle de S4	132
8.5.5	Un modèle de S5	133
8.6	Adéquation, consistance, complétude	133
8.7	Une logique modale du premier ordre	134
8.8	Interprétation des logiques modales	134
8.8.1	Une logique de la connaissance	134
8.8.2	Une logique de la croyance	135
8.9	Extensions	135
8.10	Les logiques temporelles	135
8.10.1	Approche intuitive	135
8.10.2	Premiers éléments	136
8.10.3	L'ultériorité	137
8.10.4	Ordre partiel des dates	138
8.10.5	Ordre total des dates	138
II	Éléments d'informatique théorique	139
9	Théorie des langages formels	141
9.1	Introduction	141
9.2	Définitions générales	141
9.3	Systèmes de réécriture	143
9.4	Grammaires	143
9.4.1	Éléments de base	143
9.4.2	Exemples	145
9.4.3	Formes normales	145

9.5	Les systèmes de Post	146
9.5.1	Une axiomatique du calcul propositionnel	147
9.5.2	Propriétés	147
9.6	Algorithme de Markov	148
10	La calculabilité	151
10.1	Introduction	151
10.2	Problème de reconnaissance	151
10.3	Le problème de correspondance de Post	152
10.3.1	Énoncé intuitif du problème	152
10.3.2	Démonstration de l'indécidabilité	152
10.3.3	Autres résultats sur le PCP	155
10.3.4	Autres résultats liés au PCP	156
10.4	Les solutions d'équations diophantiennes	156
10.4.1	Définitions	156
10.4.2	Résultats fondamentaux	157
10.4.3	Le dixième problème de Hilbert	158
10.4.4	Conséquences	159
10.5	Caractère aléatoire d'un programme	160
10.5.1	Hasard et calculabilité	160
10.5.2	Probabilité d'arrêt d'un programme	162
10.5.3	Complexité organisée	162
11	La complexité	163
11.1	Introduction	163
11.2	Définitions fondamentales	163
11.2.1	Problèmes de décision et langages	163
11.3	Problèmes faciles et intraitables	166
11.3.1	Problèmes polynomiaux	166
11.3.2	Les problèmes prouvés intraitables	168
11.3.3	Conclusion	168
11.4	Résultats généraux sur les problèmes NP	168
11.4.1	Problèmes NP	168
11.4.2	Problèmes NP-complets	169
11.4.3	Le théorème de Cook	171
11.4.4	Exemples de problèmes NP-complets	176
11.4.5	Preuve de NP-complétude	179
11.5	Schémas d'approximation	180
11.5.1	Principes généraux	180
11.5.2	Le problème du voyageur de commerce	181
11.5.3	Problèmes admettant des ε -approximations	182
11.6	Problèmes pseudo-polynomiaux	182
11.7	La cryptographie : une application	184
11.8	Complexité en terme d'espace	185
11.9	Autres classes	186

12	λ-calcul	189
12.1	Introduction	189
12.2	Définitions	190
12.2.1	Variables libres ou liées	191
12.3	Calcul sur les termes du λ -calcul	192
12.3.1	Substitution	192
12.3.2	α -équivalence	193
12.3.3	β -réduction	194
12.3.4	Formes normales	194
12.3.5	Théorème de Church-Rosser	195
12.3.6	Ordre de réduction	196
12.3.7	β -équivalence	197
12.3.8	Extensionnalité et η -réduction	198
12.4	Expression de fonctions récursives	199
12.4.1	Les combinateurs de point fixe	200
12.5	Utilisation du λ -calcul	202
12.5.1	Les booléens et opérations booléennes	202
12.5.2	Les doublets	203
12.5.3	Les nombres entiers	205
12.6	Termes du λ -calcul typé	208
12.6.1	λ -calcul simplement typé	208
12.6.2	Affectation de type en λ -calcul non typé	211
12.6.3	Un système de typage polymorphique	215

III Techniques de l'Intelligence Artificielle 219

13	Méthodes faibles	221
13.1	Introduction	221
13.2	Espaces d'états	221
13.2.1	Principes généraux	222
13.2.2	Exemples	222
13.3	Systèmes de production	224
13.3.1	Raisonnement en chaînage avant	224
13.3.2	Raisonnement en chaînage arrière	225
13.3.3	Monotonie et commutativité	225
13.3.4	Exemples	226
13.4	Représentation formelle	228
13.4.1	Arbres	228
13.4.2	Graphes	229
13.4.3	Graphes ET-OU	229
13.5	Stratégies de résolution	230
13.5.1	Algorithme du British Museum	230
13.5.2	Recherche en profondeur et retour-arrière	231
13.5.3	Recherche en largeur	232
13.5.4	La notion d'heuristique	233
13.5.5	L'escalade	233
13.5.6	Recherche <i>meilleur en premier</i> : graphe OU	234

13.5.7	Recherche <i>meilleur en premier</i> : graphe ET-OU	238
13.6	Analyse d'un problème	238
13.6.1	Calculabilité et complexité du problème	239
13.6.2	Problèmes décomposables	239
13.6.3	Problèmes prévisibles	240
13.6.4	Problèmes ignorables ou récupérables	241
13.6.5	Optimisation ou satisfiabilité	242
13.7	Conclusion	242
14	Problèmes de satisfaction de contraintes	243
14.1	Introduction	243
14.2	Langage et notations	245
14.3	Sémantique	247
14.4	Énoncés de problèmes	251
14.4.1	Algorithme standard pour la satisfaction	252
14.5	Consistances locales et filtrage	254
14.5.1	Filtrages	254
14.5.2	Arc-consistance	255
14.5.3	Chemin-consistance	259
14.6	Sophistiquer l'algorithme backtrack	260
14.6.1	Ordres et heuristiques	262
14.6.2	Backtrack intelligent	265
14.6.3	Mémorisation de contraintes	267
14.6.4	Méthodes prospectives	269
14.6.5	Méthodes hybrides	271
14.7	Classes polynomiales et décomposition	272
14.7.1	Classes polynomiales structurelles	272
14.7.2	Classes polynomiales micro-structurelles	273
14.7.3	Décomposition	273
14.8	Extensions du cadre classique	276
14.8.1	Satisfaction partielle	276
14.8.2	CSP dynamiques	277
14.9	Quelques problèmes	278
15	La programmation des jeux	281
15.1	Introduction	281
15.2	Principe minimax (négamax)	282
15.2.1	Fonctions d'évaluation	283
15.2.2	Algorithme minimax	283
15.2.3	Algorithme α - β	285
15.3	L'algorithme SSS*	287
15.4	L'algorithme Scout	292
15.5	Othello	294
15.5.1	Les ouvertures	294
15.5.2	Les finales	295
15.5.3	Le milieu de partie	295
15.5.4	Contrôle du temps et α - β	296
15.5.5	Paralléliser un algorithme α - β	297