

Jean-Paul Haton • Nadjet Bouzid • François Charpillet
Marie-Christine Haton • Brigitte Lâasri
Hassan Lâasri • Pierre Marquis • Thierry Mondot
Amedeo Napoli

LE RAISONNEMENT EN INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

Modèles,
techniques et architectures
pour les systèmes
à bases de connaissances

INFORMATIQUE
ia
INTELLIGENCE ARTIFICIELLE

 InterEditions

TABLE DES MATIERES

Préface de Jacques Pitrat.....	15
Avant-propos	17
1 Introduction au raisonnement.....	19
1.1 Introduction.....	20
1.2 Les connaissances et leur représentation.....	22
1.2.1 Généralités	22
1.2.2 Les représentations logiques	25
1.2.3 Les réseaux sémantiques	25
1.2.4 Les règles de production.....	26
1.2.5 Les objets structurés	28
1.2.6 Conclusion	29
1.3 Le raisonnement en IA	30
1.3.1 Définition.....	30
1.3.2 Les grands types de raisonnement.....	31
1.3.3 Raisonnement et résolution de problèmes	32
1.4 Aspects du raisonnement.....	34
1.4.1 Logique et raisonnement.....	34
1.4.2 Approximation et raisonnement.....	35
1.4.3 Temps et raisonnement	37
1.4.4 Révision d'un raisonnement	38
1.4.5 Modèles et raisonnement	39
1.4.6 Analogie et raisonnement	41
1.4.7 Distribution du raisonnement	42
1.4.8 Explication du raisonnement	43
1.4.9 Planification et raisonnement	44
1.5 Architectures des systèmes de raisonnement	47
1.5.1 Parallélisation des raisonnements.....	48
1.5.2 Précompilation de bases de règles.....	49
1.5.3 Architectures multi-agents.....	50
1.5.4 Architectures connexionnistes	51
a Introduction	51
b Les modèles.....	52
c Perspectives	53

1.6 Conclusion.....	54
2 Logique mathématique.....	55
2.1 Introduction.....	56
2.2 La logique propositionnelle.....	56
2.2.1 Aspects syntaxiques.....	57
2.2.2 Aspects sémantiques.....	57
2.2.3 Déduction.....	59
a Définitions.....	59
b Le problème de la déduction.....	59
2.2.4 Quelques propriétés.....	62
2.3 La logique des prédicats du premier ordre.....	64
2.3.1 Aspects syntaxiques.....	64
2.3.2 Aspects sémantiques.....	65
2.3.3 Déduction.....	67
a Définitions.....	67
b Le problème de la déduction.....	68
2.3.4 Quelques propriétés.....	69
2.4 Calculabilité et décidabilité.....	70
2.5 Méthodes de preuve.....	72
2.5.1 Systèmes formels.....	72
a Définitions.....	73
b Adéquation et complétude.....	74
2.5.2 Méthodes de résolution.....	75
a Mise sous forme clausale.....	76
b Interprétation de Herbrand.....	78
c Principe de résolution sans variable.....	79
d Substitution et unification.....	81
e Principe de résolution.....	83
2.6 Conclusion.....	85
3 Logique mathématique et raisonnements.....	87
3.1 Logique, représentation des connaissances et raisonnements.....	88
3.1.1 Les points forts de la logique mathématique.....	88
a Clarté et puissance d'expression.....	88
b Rôle du raisonnement déductif.....	89
3.1.2 Les limitations de la logique mathématique.....	90
a Logique et connaissances incertaines.....	90
b Logique et connaissances contextuelles.....	91
c Logique et connaissances révisables.....	94
d Efficacité.....	101
3.2 Logique mathématique et construction d'hypothèses.....	108
3.2.1 Problématique de la construction d'hypothèses.....	109
a Définitions.....	110
b Les hypothèses intéressantes.....	112
3.2.2 Méthodes de construction d'hypothèses.....	117
a Construction d'hypothèses et déduction.....	118

b	Abduction	119
c	Généralisation inductive	122
3.3	Conclusion.....	128
4	Raisonnement approximatif	129
4.1	Introduction.....	130
4.2	Approche inférentielle générale.....	131
4.3	Probabilités et raisonnement bayésien.....	134
4.3.1	Théorie des probabilités	134
4.3.2	Théorème de Bayes	135
4.3.3	Systèmes de décision et d'inférence heuristique	136
4.3.4	Exemples de systèmes bayésiens.....	136
a	Décision sans et avec expérience.....	137
b	Le système expert PROSPECTOR	139
c	Réseaux bayésiens.....	142
4.3.5	Inférence logique et probabilités.....	142
4.3.6	Limites de l'approche probabiliste	143
a	Inconvénients	143
b	Insuffisances.....	143
4.3.7	Vers d'autres mesures de l'incertain	144
4.4	Théorie de Dempster-Shafer et raisonnement plausible	145
4.4.1	Mesures de crédibilité et de plausibilité	145
a	Définitions.....	145
b	Conséquences.....	145
c	Cas de l'ignorance totale	145
d	Lien avec les probabilités.....	146
e	Conclusion	146
4.4.2	Manipulation des masses de probabilité	146
a	Affectation des degrés de croyance.....	146
b	Règles de composition des degrés de croyance.....	147
4.4.3	Exemple d'utilisation des masses de probabilité.....	149
4.4.4	Conclusion	151
4.5	Possibilités et raisonnement possibiliste	151
4.5.1	Mesures de nécessité et de possibilité.....	151
a	Définitions.....	151
b	Conséquences.....	152
c	Le certain, l'incertain et l'ignorance	152
d	Lien avec les probabilités.....	152
4.5.2	Exemples de raisonnement possibiliste	153
a	MYCIN	153
b	Possibilités associées à des faits et des règles.....	156
c	«Raisonnement par défaut» en termes de possibilité	157
4.5.3	Les mesures «décomposables»	158
4.6	Logiques multivaluées.....	158
4.7	Calcul des petites variations	159
4.8	Ensembles flous et raisonnement	160
4.8.1	Le flou.....	160

4.8.2	Théorie des ensembles flous	161
	a Définition	161
	b Opérations élémentaires sur les ensembles flous	161
4.8.3	Propositions précises ou imprécises	162
	a Représentation du contenu d'une proposition	162
	b Distributions de possibilité	163
4.8.4	Adéquation entre deux propositions.....	166
	a Vérité d'une proposition étant donné une autre prop.	166
	b Mesure d'intersection relative.....	168
	c Evaluation de prémisses composées.....	170
4.8.5	Règles d'inférence floue.....	170
	a Principe de déduction (<i>entailment</i>).....	171
	b Principe de déduction dispositionnelle.....	171
	c Règle de conjonction de conclusions.....	171
	d Produit cartésien.....	172
	e <i>Modus ponens</i> généralisé.....	172
	f Règles d'inférence graduelle.....	173
4.8.6	Syllogismes flous	173
	a Syllogisme intersection/produit.....	173
	b Règle de transitivité	174
	c Syllogisme conjonction de conséquents	174
4.8.7	Notion de variable linguistique	174
4.8.8	«Matériel flou».....	175
4.9	Applications des possibilités.....	175
4.9.1	Un générateur de systèmes experts	175
	a Imprécision et incertitude dans les faits	176
	b Imprécision et incertitude dans les règles.....	176
4.9.2	Introduction du flou dans une base de données.....	176
4.9.3	Systèmes de classification.....	178
4.9.4	Des applications récentes	179
4.10	Conclusion	180
5	Raisonnement temporel et temps réel.....	183
5.1	Introduction	184
5.2	Les logiques modales temporelles	185
	5.2.1 Introduction.....	185
	5.2.2 La logique des instants.....	185
	a Le système temporel minimal	185
	b Les logiques linéaires	188
	c Les logiques avec branchements.....	189
	d Autres propriétés du temps.....	190
	5.2.3 La logique des intervalles.....	191
	5.2.4 Conclusion	191
5.3	Les gestionnaires de graphes temporels.....	192
	5.3.1 Introduction	192
	5.3.2 Les systèmes symboliques	193
	a Les systèmes fondés sur les intervalles	193

b Les systèmes ponctuels.....	199
5.3.3 Les systèmes numériques	201
a Les systèmes ponctuels	201
b Les systèmes fondés sur les intervalles.....	204
c Synthèse	207
5.4 Les analyseurs temporels	208
5.4.1 Introduction	208
5.4.2 Les logiques temporelles réifiées	209
a La théorie de J.F. Allen	209
b La théorie de D. McDermott.....	211
5.4.3 Influence et proportionnalité	213
5.4.4 La théorie de Y. Shoham	213
5.5 Raisonnement en temps réel	214
5.5.1 Problématique du temps réel	214
5.5.2 Caractères spécifiques	215
5.5.3 Amélioration des performances.....	216
a RETE	216
b TREAT	217
5.5.4 Techniques de raisonnement.....	218
a Filtrage des données.....	218
b Focalisation	219
c Réactivité	219
d Raisonnement en temps contraint.....	220
e Incomplétude, incertitude et imprécision.....	220
5.5.5 Architectures multi-bases de connaissances	220
5.6 Quelques applications	221
5.6.1 Les systèmes qui raisonnent avec le temps.....	221
a Diagnostic médical.....	221
b Planification et représentation du temps	222
5.6.2 Les systèmes temps réel.....	223
a Planification et réactivité.....	223
b Planification prenant en compte les évolutions.....	225
c Outils de développement.....	226
5.7 Conclusion.....	228
6 Raisonnement hypothétique et maintien de vérité	231
6.1 Introduction.....	232
6.2 L'approche TMS.....	233
6.2.1 Présentation	233
6.2.2 Notions de base.....	235
a Nœud	235
b Contexte	235
c Proposition	235
d Prémisses.....	235
e Hypothèse	235
f Etat.....	235
g Justification	236

6.2.3	Représentation des connaissances.....	236
	a Règle de défaut.....	237
	b Hypothèses mutuellement exclusives	239
	c Règles d'intégrité.....	241
6.2.4	Exemple de fonctionnement.....	242
6.2.5	Propagation des mises à jour.....	243
	a Propagation en l'absence de circuits.....	244
	b Propagation en présence de circuits	246
6.2.6	Résolution des contradictions.....	247
6.2.7	Conclusion	250
6.3	ATMS	251
6.3.1	Présentation	251
6.3.2	Définitions.....	252
	a Nœud.....	252
	b Proposition.....	252
	c Environnement.....	252
	d Justification	252
	e Dérivabilité d'un nœud	253
	f Contexte	253
	g Etiquette	253
	h Typologie des nœuds et notations.....	254
	i Interface de l'ATMS avec le module de raisonnement	255
6.3.3	Rôle d'un ATMS	255
6.3.4	Traitement des justifications.....	256
6.3.5	Traitement des contradictions	256
6.3.6	Traitement des disjonctions	257
6.3.7	Interprétation.....	257
6.3.8	Conclusion	259
6.4	Les extensions de l'ATMS.....	259
6.4.1	L'ATMS étendu de O. Dressler.....	260
	a Concepts de base	260
	b Interdépendance entre n et Out(n)	262
	c Dérivabilité	262
	d Notion d'appartenance à un contexte.....	263
	e Notion de μ -extension	264
	f Justifications non monotones.....	264
	g Négation et disjonction	266
	h Lien entre logique des défauts et ATMS étendu	266
	i Exemple	268
	j Critère de choix d'une μ -extension pour les défauts.....	269
6.4.2	NATMS	271
	a Présentation générale.....	271
	b Notion de négation d'une hypothèse.....	272
	c Codage de la disjonction.....	273
	d Lien avec la règle d'hypperrésolution	273
	e Négation hypothétique	273
6.4.3	X-TRA	273

a	Présentation générale.....	273
b	Structures de base du module de maintien de vérité.....	274
c	Dérivabilité dans X-TRA.....	277
d	Illustrations.....	279
e	X-TRA et le raisonnement temporel.....	280
f	Bilan.....	284
6.5	Conclusion.....	284
7	Raisonnement qualitatif.....	285
7.1	Présentation générale.....	286
7.1.1	Introduction.....	286
7.1.2	Pourquoi le raisonnement qualitatif ?.....	287
7.1.3	Objectifs des recherches.....	288
7.1.4	Un peu d'histoire.....	288
7.2	Les trois approches qualitatives fondamentales.....	289
7.2.1	Approche centrée contrainte.....	290
a	Introduction.....	290
b	La simulation qualitative.....	291
c	Fonctionnement.....	294
7.2.2	Approche centrée composant.....	295
a	Introduction.....	295
b	Modélisation.....	296
c	Prédiction.....	298
d	Explication.....	299
7.2.3	Approche centrée processus.....	299
a	Introduction.....	299
b	Modélisation.....	299
c	Prédiction.....	301
d	Interprétation.....	301
7.2.4	Comparaison des trois approches et limites.....	301
a	L'espace des quantités.....	302
b	Les transitions.....	302
c	La modélisation.....	303
d	La causalité.....	303
e	Le temps.....	304
7.3	Autres traitements qualitatifs.....	305
7.3.1	Les approches algébriques.....	305
a	Résolution des équations qualitatives.....	305
b	Lien entre qualitatif et quantitatif.....	306
7.3.2	Introduction des ordres de grandeur.....	307
a	Problématique.....	307
b	La modélisation qualitative dans DEDALE.....	308
7.4	Systèmes experts de seconde génération.....	309
7.4.1	Exposé du problème.....	309
7.4.2	La modélisation qualitative dans les SESG.....	310
a	Connaissances heuristiques et profondes.....	310
b	Exemples de systèmes.....	311

7.5 Conclusion.....	311
8 Raisonnement par classification.....	313
8.1 Problématique.....	314
8.1.1 Théorie des prototypes et typicalité.....	314
8.1.2 Remémoration.....	317
8.1.3 La classification en représentation des connaissances.....	318
8.2 Raisonnement dans un système à héritage.....	320
8.2.1 Les systèmes à héritage.....	320
a Classes et langages de classes.....	320
b Prototypes et langages de frames.....	321
c Langages hybrides.....	323
8.2.2 Le filtrage dans les systèmes à héritage.....	324
8.2.3 La classification dans les systèmes à héritage.....	327
a Le cas des langages de classes.....	327
b La subsomption.....	327
c Les exceptions à l'héritage.....	329
d Un algorithme de classification.....	330
e Deux variantes en héritage simple.....	331
f Une approche réflexive et répartie.....	332
8.3 Schémas de classification.....	334
8.3.1 KL-ONE.....	334
a Présentation du langage.....	334
b La relation de subsomption.....	336
c Exemple de classification.....	337
d La famille KL-ONE ou les systèmes à subsomption.....	338
8.3.2 SHIRKA.....	339
a Le filtrage.....	341
b La classification.....	341
c Pour conclure.....	344
8.3.3 La classification dans un réseau de graphes.....	344
a Structure de la base de connaissances.....	345
b L'algorithme de classification.....	345
8.3.4 Résolution de problèmes et classification.....	349
8.4 La catégorisation.....	350
8.4.1 L'analyse de données.....	351
8.4.2 La catégorisation conceptuelle.....	353
8.4.3 L'apprentissage et l'acquisition de concepts.....	354
8.4.4 Exemples de systèmes d'acquisition de concepts.....	356
8.4.5 Note sur l'approche symbolique-numérique.....	360
8.5 Epilogue.....	361
9 Raisonnement par analogie.....	365
9.1 Introduction.....	366
9.2 Aspects fondamentaux de l'analogie.....	367
9.2.1 Nature du problème.....	367
9.2.2 Etudes cognitives et analogie.....	370

9.2.3 Théories de l'analogie.....	371
9.3 Quelques exemples	372
9.3.1 Le système ANALOGY	372
9.3.2 Le système SME.....	373
9.4 Modélisation de l'analogie	376
9.5 Le raisonnement par cas.....	377
9.5.1 Présentation générale.....	377
9.5.2 Une modélisation possible	378
9.5.3 Exemples de systèmes	380
9.5.4 Conclusion	381
9.6 Place de l'analogie en IA.....	381
9.6.1 Analogie et apprentissage.....	381
9.6.2 Analogie et démonstration automatique.....	382
9.6.3 Analogie dans la résolution de problèmes et la planification	383
9.6.4 Analogie et compréhension de la langue naturelle	383
9.6.5 Analogie et bases de données	384
9.7 Conclusion.....	384
10 Raisonnement distribué et modèle de tableau noir.....	387
10.1 Les systèmes multi-agents.....	388
10.1.1 Les systèmes à tableau noir et les systèmes d'acteurs	388
10.1.2 Les systèmes physiquement distribués.....	389
10.1.3 Tableau récapitulatif	391
10.1.4 Apport des systèmes multi-agents	392
10.1.5 Le problème du contrôle	393
10.2 Le contrôle dans les systèmes à tableau noir	394
10.3 Contrôle procédural	395
10.3.1 Principe	395
10.3.2 HEARSAY-II.....	396
a Le tableau noir	397
b Les sources de connaissances.....	397
c Le contrôle.....	397
10.3.3 Conclusion.....	399
10.4 Contrôle hiérarchique	399
10.4.1 Principe	399
10.4.2 CRYSLIS	400
a Le tableau noir	400
b Les sources de connaissances.....	401
c Le contrôle.....	401
10.4.3 Conclusion.....	401
10.5 Contrôle à base de tableau noir	402
10.5.1 Principe	402
10.5.2 BB-1	404
a Les tableaux noirs	404
b Les sources de connaissances.....	405
c Le contrôle.....	406
10.5.3 Conclusion.....	407

10.6 Le système ATOME.....	409
10.6.1 Approche globale	409
10.6.2 Les tableaux noirs.....	411
a Structure d'un tableau noir	412
b Résumés des tableaux noirs	412
c Tableau noir à long terme	413
d Tableau noir explicatif	413
10.6.3 Les événements	413
a Structure d'un événement.....	413
b Gestion de la création d'événements	413
c Les listes d'événements.....	414
d Synthèse d'événements.....	414
10.6.4 Structure des sources de connaissances.....	414
a Les spécialistes.....	414
b Les tâches	415
c La stratégie	416
10.6.5 Fonctionnement des sources de connaissances.....	417
a La stratégie	417
b Les tâches	417
c Les spécialistes.....	421
10.6.6 Mécanisme d'explication.....	421
10.7 Sociétés d'experts	422
10.8 Architectures multi-agents pour le temps réel	425
10.8.1 Position du problème.....	425
10.8.2 Un système à tableau noir pour le temps réel : ATOME-TR	427
a Introduction	427
b Architecture du système	428
10.9 Conclusion	429
Bibliographie	431
Index des auteurs.....	465
Index des mots clés	473