

# INTELLIGENCE & ARTIFICIELLE INFORMATIQUE THÉORIQUE

2<sup>e</sup> éd.



J.-M. ALLIOT  
T. SCHIEX  
P. BRISSET  
F. GARCIA

# Table des matières

<b>Avant-propos</b>	21
<b>1 Définir l'Intelligence Artificielle</b>	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	26
1.2.3 La spécialisation : 1970-1980	28
1.2.4 Une reconnaissance : 1980-1990	28
1.3 Les différentes approches de l'IA	30
1.3.1 L'approche cognitive	30
1.3.2 L'approche pragmatiste	31
1.3.3 L'approche connexionniste	32
1.3.4 Convergence de ces approches?	33
1.4 Notre définition de l'IA	34
1.5 Problèmes typiques d'IA	35
1.5.1 Les problèmes spécifiables et difficiles	36
1.5.2 Problèmes recouvrant un domaine précis	37
1.5.3 Autres domaines liés à l'IA	38
<b>I Logique mathématique, résolution</b>	39
<b>2 Le calcul propositionnel</b>	41
2.1 Méthodologie	41
2.2 Introduction informelle	42
2.3 Définitions	42
2.4 Théorie des modèles	43
2.4.1 Introduction	43
2.4.2 Définition formelle en calcul propositionnel	43
2.4.3 Application pratique : les tables de vérité	44
2.4.4 Tautologies	45
2.4.5 Substitution	46
2.4.6 La notion de conséquence valide	47
2.5 Théorie de la démonstration	48
2.5.1 Axiomatique du calcul propositionnel	48
2.5.2 Démonstrations	49

2.5.3	Déduction . . . . .	50
2.6	Propriétés fondamentales . . . . .	50
2.6.1	Adéquation . . . . .	51
2.6.2	Consistance . . . . .	51
2.6.3	Complétudes . . . . .	51
2.6.4	Décidabilité . . . . .	52
2.6.5	Remarques . . . . .	52
<b>3</b>	<b>Le calcul des prédicats</b>	<b>55</b>
3.1	Introduction . . . . .	55
3.2	Définitions . . . . .	56
3.2.1	Variables liées, variables libres . . . . .	56
3.2.2	Clôture d'une formule . . . . .	57
3.3	Théorie de la démonstration . . . . .	58
3.3.1	Axiomatique du calcul des prédicats . . . . .	58
3.3.2	Démonstration – Déduction . . . . .	59
3.3.3	Théorème de la déduction . . . . .	59
3.4	Théorie des modèles . . . . .	59
3.4.1	Introduction informelle . . . . .	59
3.4.2	Interprétation . . . . .	60
3.4.3	Formule valide . . . . .	61
3.4.4	Exemple de table de vérité . . . . .	61
3.4.5	Satisfiabilité, insatisfiabilité et conséquence . . . . .	61
3.4.6	Le problème des domaines infinis . . . . .	62
3.5	Propriétés fondamentales . . . . .	63
3.5.1	Adéquation - Consistance . . . . .	63
3.5.2	Complétude . . . . .	63
3.5.3	Décidabilité . . . . .	63
3.5.4	Remarques . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Les machines de Turing</b>	<b>65</b>
4.1	Introduction . . . . .	65
4.2	Machine de Turing déterministe . . . . .	66
4.3	Notion de calcul . . . . .	68
4.3.1	Calcul d'un argument et fonction calculable . . . . .	68
4.3.2	Exemple : $f(x) = x + 1$ . . . . .	69
4.4	Réalisation pratique . . . . .	70
4.5	Les machines de Turing non déterministes . . . . .	70
4.6	Remarques . . . . .	71
<b>5</b>	<b>Les systèmes formels</b>	<b>73</b>
5.1	Un peu d'histoire . . . . .	73
5.2	Les problèmes des mathématiques . . . . .	75
5.2.1	Les malheurs de la géométrie euclidienne . . . . .	75
5.2.2	L'infini . . . . .	76
5.2.3	Les ensembles . . . . .	76
5.2.4	Les paradoxes . . . . .	77
5.3	Intuitionnistes contre formalistes . . . . .	79

5.3.1	Les intuitionnistes . . . . .	79
5.3.2	Les formalistes . . . . .	80
5.4	L'arithmétique formelle . . . . .	80
5.5	Décidabilité, complétude et consistance . . . . .	83
5.5.1	Décidabilité et calculabilité . . . . .	84
5.5.2	Construction d'une fonction non-calculable . . . . .	84
5.5.3	Indécidabilité de $\mathbb{N}$ . . . . .	87
5.5.4	Incomplétude de $\mathbb{N}$ . . . . .	87
5.5.5	Non démontrabilité de la consistance de $\mathbb{N}$ . . . . .	89
5.6	Les conséquences . . . . .	90
5.7	Faut-il jeter la logique? . . . . .	91
<b>6</b>	<b>Calcul propositionnel et résolution</b> . . . . .	<b>93</b>
6.1	Introduction . . . . .	93
6.2	Principe de déduction . . . . .	93
6.2.1	Résultats préliminaires . . . . .	93
6.2.2	Interprétation du résultat . . . . .	94
6.2.3	Les arbres sémantiques . . . . .	94
6.2.4	Algorithme de Quine . . . . .	94
6.2.5	Algorithme de réduction . . . . .	95
6.3	Formes normales . . . . .	95
6.3.1	Théorème de normalisation . . . . .	95
6.3.2	Exemple . . . . .	96
6.3.3	Vocabulaire . . . . .	97
6.3.4	Algorithme de Davis et Putnam . . . . .	97
6.3.5	L'évaluation sémantique . . . . .	98
6.3.6	Révision rapide . . . . .	101
6.4	Principe de résolution . . . . .	102
6.4.1	Théorème de résolution . . . . .	102
6.4.2	Application . . . . .	102
6.5	Les clauses de Horn . . . . .	103
6.5.1	Résultats généraux . . . . .	103
6.5.2	Clauses de Horn et résolution . . . . .	103
6.5.3	Exemple de résolution . . . . .	104
6.5.4	Interprétation intuitive . . . . .	104
<b>7</b>	<b>Calcul des prédicats et résolution</b> . . . . .	<b>105</b>
7.1	Introduction . . . . .	105
7.2	Formes normales . . . . .	105
7.2.1	Formes prénexes . . . . .	105
7.2.2	Exemple . . . . .	106
7.3	Skolémisation . . . . .	106
7.3.1	Formes de Skolem . . . . .	106
7.3.2	Algorithme de Skolémisation . . . . .	107
7.3.3	Exemple . . . . .	107
7.3.4	Démonstration . . . . .	107
7.3.5	Forme standard . . . . .	108
7.4	Théorème de Herbrand . . . . .	108

7.5	Unification . . . . .	110
7.5.1	Substitution . . . . .	110
7.5.2	Unification . . . . .	111
7.6	Principe de résolution . . . . .	112
7.6.1	Algorithme et exemple d'application . . . . .	112
<b>8</b>	<b>Les logiques non-classiques</b>	<b>115</b>
8.1	Logiques faibles . . . . .	115
8.1.1	La logique absolue A . . . . .	115
8.1.2	La logique positive P . . . . .	116
8.1.3	La logique minimale M . . . . .	117
8.1.4	La logique intuitionniste J . . . . .	117
8.2	Introduction aux logiques modales . . . . .	117
8.3	Les modalités . . . . .	118
8.4	Logique aléthique . . . . .	119
8.4.1	Le système T . . . . .	119
8.4.2	Le système S4 . . . . .	120
8.4.3	Le système S5 . . . . .	120
8.5	Théorie des modèles . . . . .	120
8.5.1	Les tables de vérité . . . . .	121
8.5.2	Sémantique des mondes possibles . . . . .	121
8.5.3	Interprétation intuitive . . . . .	121
8.5.4	Un modèle de S4 . . . . .	122
8.5.5	Un modèle de S5 . . . . .	122
8.6	Adéquation, consistance, complétude . . . . .	122
8.7	Une logique modale du premier ordre . . . . .	123
8.8	Interprétation des logiques modales . . . . .	123
8.8.1	Une logique de la connaissance . . . . .	123
8.8.2	Une logique de la croyance . . . . .	124
8.9	Extensions . . . . .	124
8.10	Les logiques temporelles . . . . .	124
8.10.1	Approche intuitive . . . . .	125
8.10.2	Premiers éléments . . . . .	125
8.10.3	L'ultériorité . . . . .	126
8.10.4	Ordre partiel des dates . . . . .	126
8.10.5	Ordre total des dates . . . . .	127
<b>II</b>	<b>Éléments d'informatique théorique</b>	<b>129</b>
<b>9</b>	<b>Théorie des langages formels</b>	<b>131</b>
9.1	Introduction . . . . .	131
9.2	Définitions générales . . . . .	131
9.3	Systèmes de réécriture . . . . .	132
9.4	Grammaires . . . . .	133
9.4.1	Éléments de base . . . . .	133
9.4.2	Exemples . . . . .	134
9.4.3	Formes normales . . . . .	135

9.5	Les systèmes de Post . . . . .	135
9.5.1	Une axiomatique du calcul propositionnel . . . . .	136
9.5.2	Propriétés . . . . .	137
9.6	Algorithme de Markov . . . . .	137
<b>10</b>	<b>La calculabilité</b> . . . . .	<b>139</b>
10.1	Introduction . . . . .	139
10.2	Problème de reconnaissance . . . . .	139
10.3	Le problème de correspondance de Post . . . . .	140
10.3.1	Énoncé intuitif du problème . . . . .	140
10.3.2	Démonstration de l'indécidabilité . . . . .	140
10.3.3	Autres résultats sur le PCP . . . . .	142
10.3.4	Autres résultats liés au PCP . . . . .	143
10.4	Les solutions d'équations diophantiennes . . . . .	144
10.4.1	Définitions . . . . .	144
10.4.2	Résultats fondamentaux . . . . .	144
10.4.3	Le dixième problème de Hilbert . . . . .	146
10.4.4	Conséquences . . . . .	146
10.5	Caractère aléatoire d'un programme . . . . .	147
10.5.1	Hasard et calculabilité . . . . .	147
10.5.2	Probabilité d'arrêt d'un programme . . . . .	149
10.5.3	Complexité organisée . . . . .	149
<b>11</b>	<b>La complexité</b> . . . . .	<b>151</b>
11.1	Introduction . . . . .	151
11.2	Définitions fondamentales . . . . .	151
11.2.1	Problèmes de décision et langages . . . . .	151
11.3	Problèmes faciles et intraitables . . . . .	154
11.3.1	Problèmes polynomiaux . . . . .	154
11.3.2	Les problèmes prouvés intraitables . . . . .	155
11.3.3	Conclusion . . . . .	155
11.4	Résultats généraux sur les problèmes NP . . . . .	156
11.4.1	Problèmes NP . . . . .	156
11.4.2	Problèmes NP-complets . . . . .	156
11.4.3	Le théorème de Cook . . . . .	158
11.4.4	Exemples de problèmes NP-complets . . . . .	163
11.4.5	Preuve de NP-complétude . . . . .	165
11.5	Schémas d'approximation . . . . .	166
11.5.1	Principes généraux . . . . .	167
11.5.2	Le problème du voyageur de commerce . . . . .	167
11.5.3	Problèmes admettant des $\epsilon$ -approximations . . . . .	168
11.6	Problèmes pseudo-polynomiaux . . . . .	169
11.7	La cryptographie : une application . . . . .	170
11.8	Complexité en terme d'espace . . . . .	171
11.9	Autres classes . . . . .	172

<b>12</b>	<b><math>\lambda</math>-calcul</b>	175
12.1	Introduction	175
12.2	Définitions	176
12.2.1	Variables libres ou liées	177
12.3	Calcul sur les termes du $\lambda$ -calcul	178
12.3.1	Substitution	178
12.3.2	$\alpha$ -équivalence	178
12.3.3	$\beta$ -réduction	179
12.3.4	Formes normales	180
12.3.5	Théorème de Church-Rosser	181
12.3.6	Ordre de réduction	181
12.3.7	$\beta$ -équivalence	183
12.3.8	Extensionnalité et $\eta$ -réduction	183
12.4	Expression de fonctions récursives	184
12.4.1	Les combinateurs de point fixe	185
12.5	Utilisation du $\lambda$ -calcul	187
12.5.1	Les booléens et opérations booléennes	187
12.5.2	Les doublets	188
12.5.3	Les nombres entiers	189
12.6	Termes du $\lambda$ -calcul typé	192
12.6.1	$\lambda$ -calcul simplement typé	192
12.6.2	Affectation de type en $\lambda$ -calcul non typé	195
12.6.3	Un système de typage polymorphique	199

### III Techniques de l'Intelligence Artificielle 203

<b>13</b>	<b>Méthodes faibles</b>	205
13.1	Introduction	205
13.2	Espaces d'états	205
13.2.1	Principes généraux	205
13.2.2	Exemples	206
13.3	Systèmes de production	208
13.3.1	Raisonnement en chaînage avant	208
13.3.2	Raisonnement en chaînage arrière	208
13.3.3	Monotonie et commutativité	209
13.3.4	Exemples	210
13.4	Représentation formelle	211
13.4.1	Arbres	212
13.4.2	Graphes	212
13.4.3	Graphes ET-OU	213
13.5	Stratégies de résolution	213
13.5.1	Algorithme du British Museum	213
13.5.2	Recherche en profondeur et retour-arrière	214
13.5.3	Recherche en largeur	215
13.5.4	La notion d'heuristique	215
13.5.5	L'escalade	216
13.5.6	Recherche <i>meilleur en premier</i> : graphe OU	218

13.5.7	Recherche <i>meilleur en premier</i> : graphe ET-OU . . . . .	221
13.6	Analyse d'un problème . . . . .	221
13.6.1	Calculabilité et complexité du problème . . . . .	222
13.6.2	Problèmes décomposables . . . . .	222
13.6.3	Problèmes prévisibles . . . . .	223
13.6.4	Problèmes ignorables ou récupérables . . . . .	223
13.6.5	Optimisation ou satisfiabilité . . . . .	224
13.7	Conclusion . . . . .	225
<b>14</b>	<b>Problèmes de satisfaction de contraintes</b> . . . . .	<b>227</b>
14.1	Introduction . . . . .	227
14.2	Langage et notations . . . . .	228
14.3	Sémantique . . . . .	231
14.4	Énoncés de problèmes . . . . .	235
14.4.1	Algorithme standard pour la satisfaction . . . . .	235
14.5	Consistances locales et filtrage . . . . .	237
14.5.1	Filtrages . . . . .	238
14.5.2	Arc-consistance . . . . .	238
14.5.3	Chemin-consistance . . . . .	243
14.5.4	Autres propriétés de consistances locales . . . . .	243
14.6	Sophistiquer l'algorithme Backtrack . . . . .	244
14.6.1	Ordres et heuristiques . . . . .	245
14.6.2	Backtrack intelligent . . . . .	249
14.6.3	Mémorisation de contraintes . . . . .	250
14.6.4	Méthodes prospectives . . . . .	253
14.6.5	Remise en cause de l'ordre d'exploration . . . . .	254
14.6.6	Méthodes hybrides . . . . .	256
14.7	Classes polynomiales et décomposition . . . . .	257
14.7.1	Classes polynomiales structurelles . . . . .	257
14.7.2	Classes polynomiales micro-structurelles . . . . .	260
14.8	Extensions du cadre classique . . . . .	260
14.8.1	Contraintes globales . . . . .	261
14.8.2	Satisfaction partielle . . . . .	262
14.8.3	CSP dynamiques . . . . .	262
14.9	Quelques problèmes . . . . .	263
<b>15</b>	<b>La programmation des jeux</b> . . . . .	<b>267</b>
15.1	Introduction . . . . .	267
15.2	Principe minimax (négamax) . . . . .	268
15.2.1	Fonctions d'évaluation . . . . .	269
15.2.2	Algorithme minimax . . . . .	269
15.2.3	Algorithme $\alpha$ - $\beta$ . . . . .	270
15.3	L'algorithme SSS* . . . . .	272
15.4	L'algorithme Scout . . . . .	277
15.5	La pratique après la théorie . . . . .	278
15.5.1	Contrôle du temps et $\alpha$ - $\beta$ . . . . .	278
15.5.2	Tables de transposition . . . . .	279
15.5.3	$\alpha$ - $\beta$ avec mémoire . . . . .	281



15.5.4	Fenêtre réduite et MTD( $f$ )	283
15.5.5	Paralléliser un algorithme $\alpha$ - $\beta$	284
15.5.6	Pour conclure?	286
15.6	Othello	286
15.6.1	Les ouvertures	286
15.6.2	Les finales	287
15.6.3	Le milieu de partie	287
15.6.4	Othello et apprentissage	288
15.7	Les échecs	289
15.7.1	Les études des psychologues	290
15.7.2	Les ouvertures	294
15.7.3	Les finales	295
15.7.4	Le milieu de partie	299
15.8	Le bridge	304
15.8.1	Les annonces	304
15.8.2	Le jeu de la carte	305
15.9	Autres jeux	307
15.10	Les jeux vus par Conway	310
15.10.1	Quels jeux?	310
15.10.2	Quelques jeux de Conway	312
15.10.3	Les nombres	315
15.10.4	Les jeux impartiaux et les nimbres	315
15.10.5	Conclusion	318
<b>16</b>	<b>Les systèmes experts</b>	<b>321</b>
16.1	Introduction	321
16.2	La représentation des connaissances	322
16.2.1	Logique des prédicats	322
16.2.2	Logique modale	323
16.2.3	Logique temporelle	325
16.2.4	Logique multivaluée et logique floue	326
16.2.5	Logique des défauts	327
16.2.6	Réseaux sémantiques	329
16.2.7	Dépendance conceptuelle	331
16.2.8	Frames	332
16.2.9	Scripts	332
16.3	SE à base de règles	333
16.3.1	Les moteurs d'inférence	334
16.3.2	Systèmes de maintien de cohérence	335
16.3.3	Langages d'implantation	337
16.4	Exemples de réalisation	337
16.5	Critique des systèmes experts	339
16.6	Les systèmes experts par modèles	340
16.7	Mythes et légendes	341
16.7.1	Les mythes	341
16.7.2	Les légendes	342
16.8	Conclusion	342

## 17 Programmation fonctionnelle : ML

17.1	Introduction . . . . .	347
17.2	Le langage OCaml . . . . .	347
17.2.1	Un premier survol . . . . .	348
17.2.2	Syntaxe et typage . . . . .	349
17.2.3	Évaluation . . . . .	350
17.2.4	Nommage . . . . .	351
17.2.5	Ordre supérieur . . . . .	352
17.2.6	Types de base et conditionnelle . . . . .	352
17.2.7	Pattern-matching . . . . .	352
17.2.8	Fonctions récursives . . . . .	353
17.2.9	Listes . . . . .	354
17.2.10	Itérateurs . . . . .	354
17.2.11	Définition de types . . . . .	355
17.2.12	Le compilateur . . . . .	356
17.3	Exemples pour l'IA . . . . .	357
17.3.1	Évaluation d'une formule propositionnelle . . . . .	357
17.3.2	Codage d'un algorithme $A^*$ . . . . .	358
17.4	Aller plus loin avec OCaml . . . . .	360
17.4.1	Modularité . . . . .	360
17.4.2	Style impératif . . . . .	360
17.4.3	Programmation orientée objet . . . . .	361

## 18 Programmation logique : PROLOG

18.1	Présentation . . . . .	363
18.2	Terminologie PROLOG . . . . .	364
18.3	La syntaxe . . . . .	365
18.3.1	Les notions de OU et de ET . . . . .	366
18.3.2	Premier exemple d'exécution . . . . .	366
18.4	Moteur d'inférence . . . . .	367
18.4.1	Fonctionnement simplifié . . . . .	367
18.4.2	Le retour-arrière et la notion de points de choix . . . . .	368
18.4.3	La résolution : un parcours d'arbre ET-OU . . . . .	370
18.4.4	L'unification . . . . .	372
18.5	Les méta-opérations . . . . .	374
18.5.1	Modifier le contrôle : le <i>cut</i> . . . . .	374
18.5.2	Les prédicats prédéfinis . . . . .	376
18.5.3	L'évaluation gelée . . . . .	376
18.5.4	Le problème de la négation . . . . .	377
18.6	PROLOG et parallélisme . . . . .	377
18.7	Programmation logique avec contraintes . . . . .	378
18.7.1	Le schéma $CLP(\mathcal{X})$ . . . . .	379
18.7.2	Le langage PROLOG III . . . . .	382
18.7.3	Conclusion . . . . .	384

## V Apprentissage

387

<b>19 Apprentissage Symbolique Automatique</b>	<b>389</b>
19.1 Présentation	389
19.2 Différentes formes d'apprentissage	390
19.3 EBL	391
19.4 SBL	392
19.4.1 Les éléments de base	392
19.4.2 La généralisation	392
19.5 Conclusion	393
<b>20 Les réseaux de neurones</b>	<b>395</b>
20.1 L'argument physiologique	395
20.2 Les mémoires associatives et le modèle de Hopfield	396
20.2.1 Modèle mathématique	396
20.2.2 Mémorisation d'un vecteur binaire	396
20.2.3 Mémorisation de plusieurs vecteurs binaires	397
20.2.4 Capacité de stockage	398
20.3 Les réseaux à sens unique	400
20.3.1 Les réseaux à deux couches	400
20.3.2 Les réseaux multi-couches	402
20.4 Astuces techniques	404
20.4.1 La fonction d'activation	404
20.4.2 Le taux d'apprentissage	405
20.4.3 Comment briser la symétrie	405
20.4.4 Comment éviter les minima locaux	406
20.5 Les réseaux de neurones logiques (ALN)	406
20.5.1 Présentation générale	406
20.5.2 Apprentissage	406
20.5.3 Apprentissage de fonctions numériques	408
20.5.4 Avantages des ALN	409
20.6 Les réseaux de Kohonen	410
20.6.1 Principes généraux	410
20.6.2 Calcul de la valeur de sortie	410
20.6.3 Apprentissage	412
20.7 Conclusion	412
<b>21 Algorithmes évolutionnaires</b>	<b>415</b>
21.1 Introduction	415
21.2 Algorithmes génétiques	416
21.2.1 Principe général	416
21.2.2 Un exemple	416
21.2.3 Discussions des divers paramètres	418
21.3 Convergence théorique	418
21.3.1 Généralités	418
21.3.2 Théorie des schémas	419
21.4 Exemple complet d'application	422
21.4.1 Principe	422

21.4.2	Modélisation du problème	422
21.4.3	Application de l'algorithme génétique	423
21.4.4	Conflit à 5 avions	424
21.5	Techniques avancées	425
21.5.1	Utilisation d'un codage et d'opérateurs spécialisés	425
21.5.2	Opérateurs de réorganisation	427
21.5.3	Le scaling ou mise à l'échelle	428
21.5.4	Modes de sélection, tournoi	429
21.5.5	Le sharing	429
21.5.6	Fonctions partiellement séparables : croisement adapté	430
21.5.7	Structures de données complexes	432
21.5.8	Recherche multi-objectifs	435
21.5.9	Algorithmes génétiques et coévolution	436
21.6	Stratégies d'évolution	438
21.7	Programmation évolutionnaire	438
21.8	La programmation génétique	439
21.9	Conclusion	441
<b>22</b>	<b>Apprentissage par renforcement</b>	<b>443</b>
22.1	Introduction	443
22.2	Les processus décisionnels de Markov	445
22.2.1	Définition d'un processus décisionnel de Markov	445
22.2.2	Les stratégies et les critères de performance	447
22.2.3	Optimalité et fonctions de valeur	448
22.2.4	Algorithmes de résolution des PDM	450
22.2.5	Observabilité du processus	452
22.3	Les méthodes de l'apprentissage par renforcement	453
22.3.1	Méthodes directes et indirectes	454
22.3.2	L'algorithme Q-learning	455
22.3.3	Le dilemme exploration/exploitation	456
22.3.4	La méthode des différence temporelles : TD( $\lambda$ )	458
22.4	Apprentissage par renforcement et généralisation	464
22.4.1	Représentation paramétrée de la fonction de valeur	465
22.4.2	Les représentations différentiables	466
22.4.3	L'apprentissage de structures d'approximation	471
22.4.4	Méthodes de gradient dans l'espace des stratégies	473
22.5	Conclusion	473
<b>VI</b>	<b>Conclusion</b>	<b>477</b>
<b>23</b>	<b>Conclusion</b>	<b>479</b>
23.1	Les critiques	480
23.1.1	Les erreurs de jugement	480
23.1.2	Concepts et modèles : le réductionnisme	481
23.1.3	L'erreur de perspective	483
23.1.4	L'influence des résultats métamathématiques	484
23.1.5	L'argument quantique	484

23.1.6	Critique théologique	484
23.1.7	Critique psychologique	485
23.1.8	Critique biologique	489
23.1.9	Optimalité de l'évolution	490
23.2	Une IA est-elle impossible?	491
23.3	Qu'en penser?	492
23.3.1	Différentes attitudes vis-à-vis de l'IA	492
23.3.2	Un avenir pour l'IA	493
23.4	L'IA : une grande illusion?	494
23.4.1	Rapide analyse historique	494
23.4.2	L'IA, en dernier recours	498
23.5	Addendum à l'édition 2002	499

<b>Bibliographie essentielle</b>	501
----------------------------------	-----

<b>Bibliographie</b>	505
----------------------	-----

<b>Index</b>	533
--------------	-----