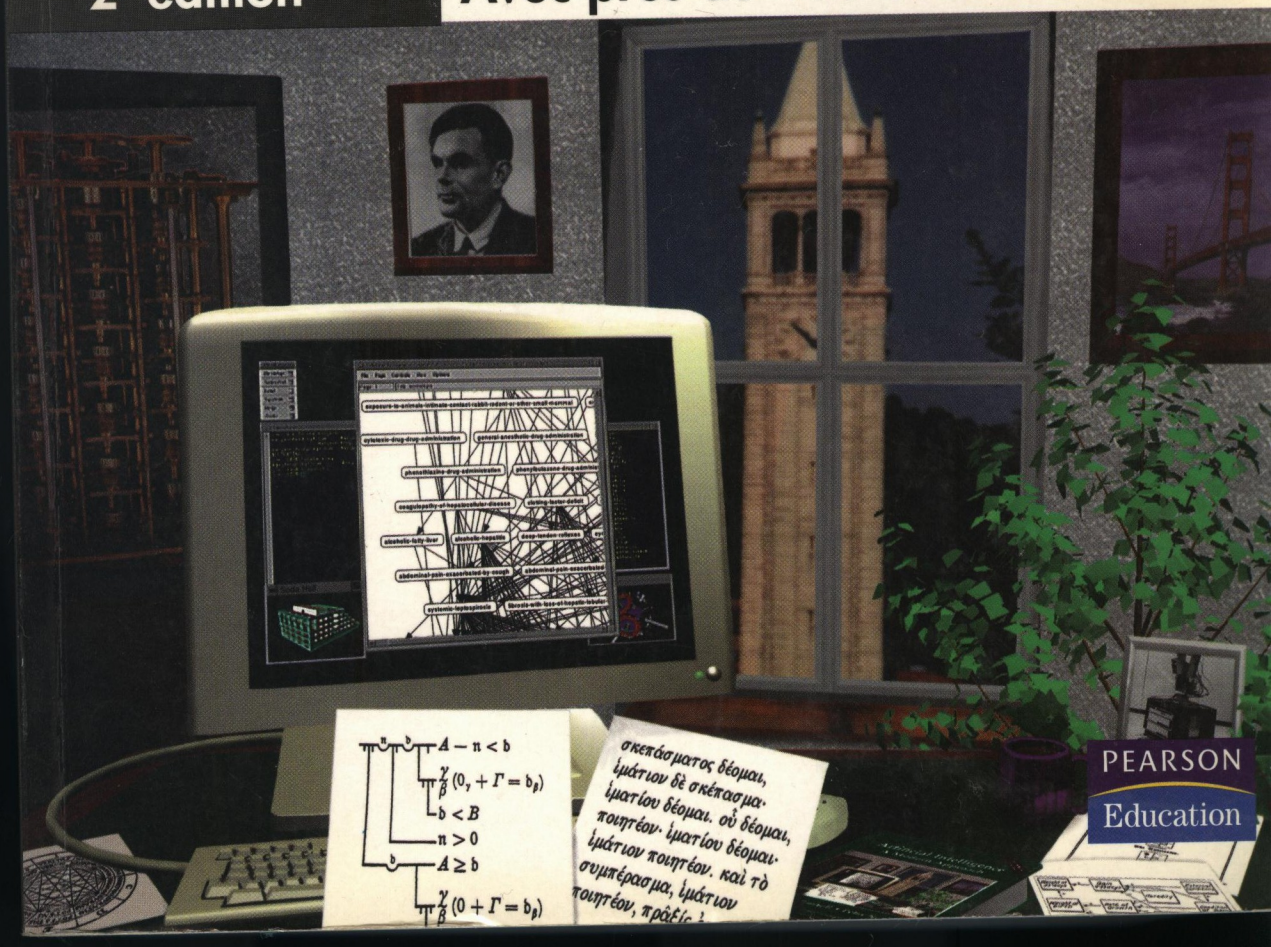
Stuart Russell et Peter Norvig

Intelligence artificielle

2e édition

Avec près de 400 exercices



PEARSON
Education

Table des matières

Préface xxiii

I Intelligence Artificielle

1 Introduction 1

1.1 Définition de l'IA 2

1.1.1 Agir comme des humains : le test de Turing 3

1.1.2 Penser comme des humains : l'approche cognitive 4

1.1.3 Penser rationnellement : les « lois de la pensée » 4

1.1.4 Agir rationnellement : l'approche de l'agent rationnel 5

1.2 Fondements de l'intelligence artificielle 6

1.2.1 Philosophie (de 428 av. J.-C. à nos jours) 6

1.2.2 Mathématiques (de 800 à nos jours) 9

1.2.3 Économie (de 1776 à nos jours) 11

1.2.4 Neurosciences (de 1861 à nos jours) 12

1.2.5 Psychologie (de 1879 à nos jours) 14

1.2.6 Ingénierie informatique (de 1940 à nos jours) 16

1.2.7 Théorie du contrôle et cybernétique (de 1948 à nos jours) 17

1.2.8 Linguistique (de 1957 à nos jours) 18

1.3 Histoire de l'intelligence artificielle 19

1.3.1 Gestation de l'intelligence artificielle (1943-1955) 19

1.3.2 Naissance de l'intelligence artificielle (1956) 19

1.3.3 L'enthousiasme des débuts : les grandes espérances (1952-1969) 20

1.3.4 L'épreuve de la réalité (1966-1973) 23

1.3.5 Systèmes fondés sur les connaissances : la clé de la puissance ? (1969-1979) 25
1.3.6 L'IA devient une industrie (de 1980 à nos jours) 28
1.3.7 Retour des réseaux de neurones (de 1986 à nos jours) 28
1.3.8 L'IA devient une science (de 1987 à nos jours) 29
1.3.9 Émergence des agents intelligents (de 1995 à nos jours) 31
1.4 État de l'art 31
Résumé 33
Notes bibliographiques et historiques 34
Exercices 35

2 Agents intelligents 37
2.1 Agents et environnements 37
2.2 Bons comportements : le concept de rationalité 40
2.2.1 Mesures de performance 40
2.2.2 Rationalité 41
2.2.3 Omniscience, apprentissage et autonomie 42
2.3 Nature des environnements 43
2.3.1 Spécification de l'environnement d'une tâche 44
2.3.2 Propriétés des environnements de tâches 46
2.4 Structure des agents 50
2.4.1 Programmes agents 51
2.4.2 Agents réflexes simples 53
2.4.3 Agents réflexes fondés sur des modèles 55
2.4.4 Agents fondés sur des buts 57
2.4.5 Agents fondés sur l'utilité 58
2.4.6 Agents capables d'apprentissage 59
Résumé 61
Notes bibliographiques et historiques 62
Exercices 64

II Résolution de problèmes

3 Résolution de problèmes par l'exploration **67**

3.1 Agents de résolution de problèmes 67

3.1.1 Des problèmes bien définis et de leurs solutions 70

3.1.2 De la formulation des problèmes 71

3.2 Exemples de problèmes 72

3.2.1 Problèmes jouets 73

3.2.2 Problèmes du monde réel 76

3.3 Recherche de solutions 78

3.3.1 Mesure de la performance de la résolution de problèmes 82

3.4 Stratégies d'exploration non informée 83

3.4.1 Exploration en largeur d'abord 83

3.4.2 Exploration à coût uniforme 85

3.4.3 Exploration en profondeur d'abord 85

3.4.4 Exploration en profondeur limitée 87

3.4.5 Exploration itérative en profondeur 88

3.4.6 Exploration bidirectionnelle 90

3.4.7 Comparaison des stratégies d'exploration non informées 92

3.5 Éviter les répétitions d'états 92

3.6 Exploration avec informations partielles 94

3.6.1 Problèmes sans capteurs 95

3.6.2 Problèmes avec contingences 96

Résumé 98

Notes bibliographiques et historiques 99

Exercices 101

4 Exploration informée **107**

4.1 Stratégies d'exploration informée (heuristique) 107

4.1.1 Exploration meilleur d'abord gloutonne 108

4.1.2 Exploration A* : minimisation du coût total estimé de la solution 109

4.1.3 Explorations heuristiques à mémoire limitée 115

4.1.4 Apprendre à mieux chercher 119
4.2 Fonctions heuristiques 119
4.2.1 Répercussion de l'exactitude de l'heuristique sur la performance 120
4.2.2 Création de fonctions heuristiques admissibles 121
4.2.3 Apprentissage d'heuristiques à partir de l'expérience 124
4.3 Algorithmes d'exploration locale et problèmes d'optimisation 125
4.3.1 Exploration par escalade (hill-climbing) 126
4.3.2 Exploration par recuit simulé (simulated annealing) 130
4.3.3 Exploration locale en faisceau (local beam search) 131
4.3.4 Algorithmes génétiques 132
4.4 Exploration locale d'espaces continus 134
4.5 Agents d'exploration en ligne et environnements inconnus 138
4.5.1 Problèmes d'exploration en ligne 139
4.5.2 Agents d'exploration en ligne 141
4.5.3 Exploration en ligne locale 142
4.5.4 Apprentissage et exploration en ligne 144
Résumé 145
Notes bibliographiques et historiques 146
Exercices 150

5 Problèmes à satisfaction de contraintes 155
5.1 Problèmes à satisfaction de contraintes 155
5.2 Exploration avec backtracking pour les CSP 160
5.2.1 Ordre des variables et des valeurs 162
5.2.2 Propager les informations par le biais des contraintes 163
5.2.3 Backtracking intelligent : l'examen en amont 168
5.3 Exploration locale pour les problèmes à satisfaction de contraintes 169
5.4 La structure des problèmes 171
Résumé 175
Notes bibliographiques et historiques 176
Exercices 178

6 Exploration en situation d'adversité 181

6.1 Les jeux 181

6.2 Décisions optimales dans les jeux 183

6.2.1 Stratégies optimales 183

6.2.2 L'algorithme du minimax 185

6.2.3 Décisions optimales dans le cadre de jeux multi-joueurs 186

6.3 Élagage alpha-bêta 188

6.4 Décisions imparfaites en temps réel 191

6.4.1 Fonctions d'évaluation 192

6.4.2 Recherche avec arrêt (cut off) 194

6.5 Jeux comportant une part de hasard 196

6.5.1 Évaluation des positions dans les jeux à nœuds de hasard 198

6.5.2 Complexité d'expectiminimax 199

6.5.3 Jeux de cartes 200

6.6 État de l'art des programmes de jeu 202

6.7 Bilan et perspectives 205

Résumé 207

Notes bibliographiques et historiques 208

Exercices 212

III Connaissances et raisonnement

7 Agents logiques 217

7.1 Agents fondés sur les connaissances 219

7.2 Le monde du Wumpus 221

7.3 Logique 224

7.4 Logique propositionnelle : une logique très simple 228

7.4.1 Syntaxe 228

7.4.2 Sémantique 230

7.4.3 Une base de connaissances simple 232

7.4.4 Inférence 233

7.4.5 Équivalence, validité et satisfiabilité 234

7.5 Schémas de raisonnement en logique propositionnelle 236
7.5.1 Résolution 238
7.5.2 Forme normale conjonctive 240
7.5.3 Un algorithme de résolution 241
7.5.4 Complétude de la résolution 242
7.5.5 Chaînage avant et chaînage arrière 243
7.6 Algorithmes d'inférence propositionnelle efficaces 246
7.6.1 Algorithme par backtracking complet 247
7.6.2 Algorithmes d'exploration locale 249
7.6.3 Problèmes de satisfiabilité difficiles 250
7.7 Agents fondés sur la logique propositionnelle 252
7.7.1 Recherche des puits et des Wumpus avec l'inférence logique 252
7.7.2 Suivi des positions et de l'orientation 254
7.7.3 Agents fondés sur des circuits 254
7.7.4 Une comparaison 258
Résumé 260
Notes bibliographiques et historiques 261
Exercices 264

8 Logique du premier ordre 269
8.1 Retour sur la représentation 269
8.2 Syntaxe et sémantique de la logique du premier ordre 274
8.2.1 Modèles de la logique du premier ordre 275
8.2.2 Symboles et interprétations 276
8.2.3 Termes 278
8.2.4 Énoncés atomiques 278
8.2.5 Énoncés composés 279
8.2.6 Quantificateurs 279
8.2.7 Égalité 284
8.3 Utiliser la logique du premier ordre 284
8.3.1 Assertions et requêtes en logique du premier ordre 284

8.3.2 Le domaine des liens de parenté 285
8.3.3 Nombres, ensembles et listes 287
8.3.4 Le monde du Wumpus 289
8.4 Ingénierie des connaissances en logique du premier ordre 293
8.4.1 Le processus d'ingénierie des connaissances 293
8.4.2 Le domaine des circuits électroniques 295
Résumé 299
Notes bibliographiques et historiques 299
Exercices 300
9 L'inférence en logique du premier ordre 305
9.1 Inférence propositionnelle vs inférence du premier ordre 305
9.1.1 Règles d'inférence pour les quantificateurs 306
9.1.2 Réduction à l'inférence propositionnelle 307
9.2 Unification et élargissement 308
9.2.1 Une règle d'inférence du premier ordre 309
9.2.2 Unification 310
9.2.3 Stockage et récupération 312
9.3 Chaînage avant 314
9.3.1 Clauses définies du premier ordre 314
9.3.2 Un algorithme de chaînage avant simple 316
9.3.3 Chaînage avant efficace 318
9.4 Chaînage arrière 322
9.4.1 Un algorithme de chaînage arrière 322
9.4.2 Programmation logique 323
9.4.3 Programmation logique avec contraintes 330
9.5 Résolution 331
9.5.1 Forme normale conjonctive pour la logique du premier ordre 331
9.5.2 Règle de résolution des inférences 333
9.5.3 Complétude de la résolution 336
9.5.4 Traitement de l'égalité 340

9.5.5 Stratégies de résolution 342
9.5.6 Démonstrateurs de théorèmes 343
Résumé 348
Notes bibliographiques et historiques 348
Exercices 353

10 Représentation des connaissances 359

10.1 Ingénierie ontologique 359
10.2 Catégories et objets 362
10.2.1 Composition physique 364
10.2.2 Mesures 365
10.2.3 Substances et objets 367
10.3 Actions, situations et événements 369
10.3.1 Ontologie du calcul des situations 369
10.3.2 Description des actions en calcul des situations 371
10.3.3 Résolution du problème représentationnel de la persistance 372
10.3.4 Résolution du problème inférentiel de la persistance 374
10.3.5 Temps et calcul des événements 375
10.3.6 Événements généralisés 376
10.3.7 Processus 379
10.3.8 Intervalles 380
10.3.9 Fluents et objets 381
10.4 Événements mentaux et objets mentaux 383
10.4.1 Théorie formelle des croyances 383
10.4.2 Connaissances et croyances 385
10.4.3 Connaissances, temps et action 386
10.5 Le monde du commerce électronique 387
10.5.1 Comparaison des offres 391
10.6 Systèmes de raisonnement pour les catégories 393
10.6.1 Réseaux sémantiques 393
10.6.2 Logiques de description 396
10.7 Raisonnements avec informations par défaut 398

10.7.1 Monde ouvert et monde clos 398
10.7.2 Négation par l'échec et sémantique des modèles stables 401
10.7.3 Circonscription et logique des défauts 402
10.8 Systèmes à maintenance de vérité 405
Résumé 407
Notes bibliographiques et historiques 408
Exercices 414

IV Planification

11 Planification 421
11.1 Le problème de la planification 422
11.1.1 Le langage des problèmes de planification 423
11.1.2 Expressivité et extensions 425
11.1.3 Exemple : transport du fret aérien 427
11.1.4 Exemple : le problème de la roue de secours 427
11.1.5 Exemple : le monde des blocs 428
11.2 Planification par exploration dans un espace d'états 429
11.2.1 Exploration en avant dans un espace d'états 430
11.2.2 Exploration arrière dans un espace d'états 431
11.2.3 Heuristiques pour l'exploration dans un espace d'états 433
11.3 Planification en ordre partiel 435
11.3.1 Un exemple de planification en ordre partiel 439
11.3.2 Planification en ordre partiel avec variables libres 441
11.3.3 Heuristiques pour la planification en ordre partiel 442
11.4 Graphes de planification 443
11.4.1 Graphes de planification pour l'estimation heuristique 446
11.4.2 L'algorithme GRAPHPLAN 447
11.4.3 Terminaison de GRAPHPLAN 450
11.5 Planification avec la logique propositionnelle 451
11.5.1 Description de problèmes de planification en logique propositionnelle 451

11.5.2 Complexité des encodages propositionnels 455
11.6 Analyse des approches de la planification 456
Résumé 458
Notes bibliographiques et historiques 459
Exercices 462

12 Planification et action dans le monde réel 467
12.1 Temps, ordonnancement et ressources 467
12.1.1 Ordonnancement avec contraintes de ressources 470
12.2 Planifier avec un réseau hiérarchisé de tâches 472
12.2.1 Représentation des décompositions d'action 473
12.2.2 Modifier le planificateur pour les décompositions 476
12.2.3 Discussion 478
12.3 Planification et action dans des domaines non déterministes 481
12.4 Planification conditionnelle 484
12.4.1 Planification conditionnelle en environnements totalement observables 484
12.4.2 Planification conditionnelle en environnements partiellement observables 489
12.5 Monitoring de l'exécution et replanification 493
12.6 Planification continue 498
12.7 Planification multi-agent 502
12.7.1 Coopération : buts et plans communs 503
12.7.2 Plan multicorps 504
12.7.3 Mécanismes de coordination 506
12.7.4 Concurrence 508
Résumé 508
Notes bibliographiques et historiques 509
Exercices 513

V Connaissances et raisonnement en environnement incertain

13 Incertitude **517**

13.1 Agir dans l'incertitude 517

13.1.1 Traiter des connaissances incertaines 518

13.1.2 Incertitude et décisions rationnelles 520

13.1.3 Conception d'un agent utilisant la théorie de la décision 521

13.2 Probabilités : notations de base 522

13.2.1 Propositions 522

13.2.2 Événements atomiques 523

13.2.3 Probabilités a priori 524

13.2.4 Probabilités conditionnelles 526

13.3 Les axiomes des probabilités 527

13.3.1 Utilisation des axiomes des probabilités 529

13.3.2 Pourquoi les axiomes des probabilités sont raisonnables 530

13.4 Inférence utilisant des distributions conjointes complètes 531

13.5 Indépendance 534

13.6 La règle de Bayes et son utilisation 536

13.7 Application de la règle de Bayes : le cas simple 537

13.7.1 Utilisation de la règle de Bayes : la combinaison d'observations 538

13.8 Le monde du Wumpus revisité 540

Résumé 544

Notes bibliographiques et historiques 545

Exercices 547

14 Raisonnement probabiliste **551**

14.1 Représentation des connaissances dans un domaine incertain 551

14.2 Sémantique des réseaux bayésiens 554

14.2.1 Représentation de la distribution de probabilités conjointe complète 554

14.2.2 Une méthode pour construire des réseaux bayésiens 555

14.2.3 Compacité et ordre des nœuds 556
14.2.4 Relations d'indépendance conditionnelle dans les réseaux bayésiens 558
14.3 Représentation efficace des distributions conditionnelles 559
14.3.1 Réseaux bayésiens à variables continues 561
14.4 Inférence exacte dans les réseaux bayésiens 564
14.4.1 Inférence par énumération 564
14.4.2 L'algorithme d'élimination des variables 566
14.4.3 Complexité de l'inférence exacte 570
14.4.4 Algorithmes de groupement (*clustering*) 571
14.5 Inférence approchée dans les réseaux bayésiens 572
14.5.1 Méthodes d'échantillonnage direct 572
14.5.2 Échantillonnage par rejet dans les réseaux bayésiens 574
14.5.3 Pondération par la vraisemblance 575
14.5.4 Inférence par simulation de chaînes de Markov Monte-Carlo (MCMC) 578
14.5.5 L'algorithme MCMC 578
14.5.6 Pourquoi MCMC fonctionne 579
14.6 Extensions des probabilités aux représentations du premier ordre 581
14.7 Autres approches du raisonnement incertain 586
14.7.1 Méthodes à base de règles pour le raisonnement incertain 587
14.7.2 Représentation de l'ignorance : la théorie de Dempster-Shafer 589
14.7.3 Représentation de l'imprécision : ensembles flous et logique floue 590
Résumé 591
Notes bibliographiques et historiques 592
Exercices 596

15 Raisonnement probabiliste temporel 601
15.1 Temps et incertitude 601
15.1.1 États et observations 602
15.1.2 Processus stationnaires et hypothèse de Markov 603
15.2 L'inférence dans les modèles temporels 606

15.2.1 Filtrage et prédiction 607
15.2.2 Lissage 609
15.2.3 Découverte de la séquence la plus probable 612
15.3 Modèles de Markov cachés 614
15.3.1 Algorithmes matriciels simplifiés 615
15.4 Filtres de Kalman 617
15.4.1 Mise à jour des distributions gaussiennes 618
15.4.2 Un exemple unidimensionnel simple 619
15.4.3 Le cas général 622
15.4.4 Applications du filtrage de Kalman 623
15.5 Réseaux bayésiens dynamiques 625
15.5.1 Construction de RBD 626
15.5.2 Inférence exacte dans les RBD 630
15.5.3 subsection Inférence approximative dans les RBD 631
15.6 Reconnaissance de la parole 635
15.6.1 Les sons de la langue 637
15.6.2 Les mots 639
15.6.3 Les phrases 641
15.6.4 Construction d'un système de reconnaissance de la parole 644
Résumé 645
Notes bibliographiques et historiques 646
Exercices 648

16 Prise de décisions simples 653
16.1 Désirs, croyances et incertitude 653
16.2 Concepts de base de la théorie de l'utilité 655
16.2.1 Contraintes sur les préférences rationnelles 655
16.2.2 Puis l'utilité vint... 657
16.3 Fonctions d'utilité 658
16.3.1 L'utilité de l'argent 659
16.3.2 Échelles d'utilité et évaluation de l'utilité 661
16.4 Fonctions d'utilité multiattributs 663

16.4.1 Dominance 664
16.4.2 Structures de préférences et utilité multiattribut 666
16.4.3 Préférences sans incertitude 666
16.4.4 Préférences avec incertitude 667
16.5 Réseaux de décision 668
16.5.1 Représentation d'un problème avec un réseau de décision 668
16.5.2 Évaluation des réseaux de décision 670
16.6 La valeur de l'information 670
16.6.1 Un exemple simple 671
16.6.2 Une formule générale 672
16.6.3 Propriétés de la valeur de l'information 673
16.6.4 Implémentation d'un agent de collecte d'informations 674
16.7 Systèmes experts utilisant la théorie de la décision 675
Résumé 678
Notes bibliographiques et historiques 679
Exercices 680

17 Prise de décisions complexes 685
17.1 Problèmes de décision séquentiels 685
17.1.1 Un exemple 685
17.1.2 L'optimalité dans les problèmes de décision séquentiels 689
17.2 Itération de la valeur 691
17.2.1 Utilités des états 691
17.2.2 L'algorithme *value iteration* 693
17.2.3 Convergence de *value iteration* 693
17.3 Itération de la politique 697
17.4 PDM partiellement observables 699
17.5 Agents fondés sur la théorie de la décision 702
17.6 Décisions et agents multiples : la théorie des jeux 705
17.7 Conception de mécanismes 715
Résumé 718

Notes bibliographiques et historiques 719

Exercices 721

VI Apprentissage

18 Apprendre à partir d'observations 725

18.1 Types d'apprentissage 725

18.2 Apprentissage inductif 728

18.3 Apprentissage des arbres de décision 730

18.3.1 Fonctionnement des arbres de décision 730

18.3.2 Expressivité des arbres de décision 731

18.3.3 Induction d'arbres de décision à partir d'exemples 732

18.3.4 Choix des attributs à tester 735

18.3.5 Évaluation de la performance de l'algorithme d'apprentissage 737

18.3.6 Bruit et surapprentissage 739

18.3.7 Élargir l'applicabilité des arbres de décision 741

18.4 Apprentissage par ensembles 742

18.5 Pourquoi l'apprentissage fonctionne : la théorie de l'apprentissage 746

18.5.1 Combien d'exemples faut-il ? 747

18.5.2 Apprentissage de listes de décision 749

18.5.3 Discussion 750

Résumé 752

Notes bibliographiques et historiques 752

Exercices 754

19 Connaissances et apprentissage 757

19.1 Une formulation logique de l'apprentissage 757

19.1.1 Exemples et hypothèses 758

19.1.2 Meilleure hypothèse courante 759

19.1.3 Moindre engagement 762

19.2 Connaissances et apprentissage 766

19.2.1 Quelques exemples simples 767
19.2.2 Quelques schémas généraux 768
19.3 Apprentissage par explication 770
19.3.1 Extraction de règles générales à partir d'exemples 771
19.3.2 Amélioration de l'efficacité 773
19.4 Apprentissage fondé sur la pertinence 775
19.4.1 Détermination de l'espace des hypothèses 775
19.4.2 Apprentissage et utilisation des informations sur la pertinence 776
19.5 Programmation logique inductive 778
19.5.1 Un exemple 779
19.5.2 Méthodes d'apprentissage inductif descendantes 781
19.5.3 Apprentissage inductif par résolution inverse 783
19.5.4 Découvertes par programmation logique inductive 785
Résumé 786
Notes bibliographiques et historiques 787
Exercices 790

20 Méthodes d'apprentissage statistique 795
20.1 L'apprentissage statistique 795
20.2 Apprentissage avec données complètes 799
20.2.1 Apprentissage de paramètres par maximum de vraisemblance : les modèles discrets 799
20.2.2 Modèles bayésiens naïfs 802
20.2.3 Apprentissage de paramètres par maximum de vraisemblance : les modèles continus 802
20.2.4 Apprentissage bayésien de paramètres 804
20.2.5 Apprentissage de la structure des réseaux bayésiens 806
20.3 Apprentissage avec variables cachées : l'algorithme EM 808
20.3.1 Classification non supervisée : apprentissage de mélanges de gaussiennes 809
20.3.2 Apprentissage de réseaux bayésiens avec variables cachées 812
20.3.3 Apprentissage de modèles de Markov cachés 815

20.3.4 Forme générale de l'algorithme EM 815

20.3.5 Apprentissage de structures de réseaux bayésiens avec variables cachées 816

20.4 Apprentissage fondé sur les exemples 817

20.4.1 Modèles des plus proches voisins 818

20.4.2 Modèles à noyau 820

20.5 Réseaux de neurones 821

20.5.1 Unités dans les réseaux de neurones 821

20.5.2 Structures des réseaux de neurones 823

20.5.3 Réseaux de neurones *feed-forward* monocouches (perceptrons) 824

20.5.4 Réseaux de neurones feed-forward multicouches 829

20.5.5 Apprentissage des structures des réseaux de neurones 833

20.6 Machines à noyau 834

20.7 Étude de cas : reconnaissance de chiffres manuscrits 837

Résumé 840

Notes bibliographiques et historiques 841

Exercices 845

21 Apprentissage par renforcement 849

21.1 Introduction 849

21.2 Apprentissage par renforcement passif 851

21.2.1 Estimation directe de l'utilité 852

21.2.2 Programmation dynamique adaptative 853

21.2.3 Apprentissage par différence temporelle 854

21.3 Apprentissage par renforcement actif 858

21.3.1 Exploration 858

21.3.2 Apprentissage d'une fonction action-valeur 861

21.4 Généralisation et apprentissage par renforcement 864

21.4.1 Applications aux jeux 867

21.4.2 Applications au contrôle de robots 868

21.5 Recherche de politique 869

Résumé 872

24.4.3 Gradients de texture 977
24.4.4 Ombrage 977
24.4.5 Contours 979
24.5 Reconnaissance d'objets 983
24.5.1 Reconnaissance à base de luminosité 986
24.5.2 Reconnaissance à base d'attributs 986
24.5.3 Estimation de la pose 988
24.6 Utilisation de la vision pour la manipulation et la navigation 991
Résumé 993
Notes bibliographiques et historiques 994
Exercices 997

25 Robotique 999
25.1 Introduction 999
25.2 Aspects matériels 1001
25.2.1 Capteurs 1001
25.2.2 Effecteurs 1003
25.3 Perception robotique 1005
25.3.1 Localisation 1006
25.3.2 Cartographie 1011
25.3.3 Autre types de perception 1015
25.4 Planification du mouvement 1015
25.4.1 Espace des configurations 1016
25.4.2 Méthode de décomposition cellulaire 1018
25.4.3 Méthode de squelettisation 1021
25.5 Planification de mouvements incertains 1023
25.5.1 Méthodes robustes 1024
25.6 Le mouvement 1026
25.6.1 Dynamique et contrôle 1027
25.6.2 Contrôle de champ de potentiel 1029
25.6.3 Contrôle réactif 1030
25.7 Architectures logicielles en robotique 1032

25.7.1 L'architecture de subsomption 1032

25.7.2 L'architecture à trois couches 1034

25.7.3 Les langages de programmation de la robotique 1034

25.8 Domaines d'application 1036

Résumé 1039

Notes bibliographiques et historiques 1040

Exercices 1043

VIII Conclusions

26 Fondements philosophiques 1047

26.1 IA faible : les machines peuvent-elles agir intelligemment ? 1047

26.1.1 L'argument de l'incapacité 1049

26.1.2 L'objection mathématique 1050

26.1.3 L'argument de l'informalité 1051

26.2 IA forte : les machines peuvent-elles réellement penser ? 1053

26.2.1 Le problème du corps et de l'esprit 1055

26.2.2 L'expérience du « cerveau dans la cuve » 1057

26.2.3 L'expérience de la prothèse cérébrale 1058

26.2.4 La chambre chinoise 1060

26.3 Éthique et risques du développement de l'intelligence artificielle 1062

Résumé 1066

Notes bibliographiques et historiques 1067

Exercices 1069

27 IA : présent et futur 1071

27.1 Les composants des agents 1071

27.2 Architectures de l'agent 1074

27.3 Sommes-nous sur la bonne voie ? 1075

27.4 Et si l'IA atteignait son but ? 1077

A Rappels mathématiques **1081**

Annexe A : Rappels mathématiques1081

A.1 Analyse de la complexité et notation O() 1081

A.1.1 Analyse asymptotique 1081

A.1.2 Problèmes NP et intrinsèquement difficiles 1082

A.1.3 Vecteurs, matrices et algèbre linéaire 1084

A.2 Distributions de probabilités 1086

Notes bibliographiques et historiques 1087

B Notes sur les langages et les algorithmes **1089**

Annexe B : Rappels mathématiques1089

B.1 Définition de langages sous forme de Backus-Naur (BNF) 1089

B.2 Description d'algorithmes en pseudocode 1090

B.3 Aide en ligne 1091

Bibliographie **1093**

Index **1161**