

# Table des matières

## I Intelligence artificielle

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
1.1	Qu'est-ce que l'IA ?	1
1.2	Fondements de l'intelligence artificielle	5
1.3	Histoire de l'intelligence artificielle	15
1.4	État de l'art	24
1.5	Risques et bénéfices de l'IA	28
	Résumé, notes bibliographiques et historiques	31
<b>2</b>	<b>Agents intelligents</b>	<b>33</b>
2.1	Agents et environnements	33
2.2	Bons comportements : le concept de rationalité	35
2.3	Nature des environnements	38
2.4	Structure des agents	43
	Résumé, notes bibliographiques et historiques	53

## II Résolution de problèmes

<b>3</b>	<b>Résolution de problèmes par exploration</b>	<b>57</b>
3.1	Agents de résolution de problèmes	57
3.2	Exemples de problèmes	60
3.3	Algorithmes d'exploration	64
3.4	Stratégies d'exploration non informées	69
3.5	Stratégies d'exploration informées (heuristiques)	77
3.6	Fonctions heuristiques	88
	Résumé, notes bibliographiques et historiques	95
<b>4</b>	<b>Exploration en environnements complexes</b>	<b>101</b>
4.1	Exploration locale et problèmes d'optimisation	101
4.2	Exploration locale d'espaces continus	109
4.3	Exploration avec des actions non déterministes	111
4.4	Exploration en environnement partiellement observable	115
4.5	Agents d'exploration en ligne et environnements inconnus	123
	Résumé, notes bibliographiques et historiques	128

<b>5</b>	<b>Exploration antagoniste et jeux</b>	<b>133</b>
5.1	Théorie des jeux . . . . .	133
5.2	Décisions optimales dans les jeux . . . . .	134
5.3	Exploration alpha-bêta heuristique . . . . .	141
5.4	Exploration d'arbre Monte-Carlo . . . . .	146
5.5	Jeux stochastiques . . . . .	149
5.6	Jeux partiellement observables . . . . .	152
5.7	Limitations des algorithmes d'exploration pour le jeu . . . . .	156
	Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	158
<b>6</b>	<b>Problèmes de satisfaction de contraintes</b>	<b>163</b>
6.1	Définition des problèmes de satisfaction de contraintes . . . . .	163
6.2	Propagation de contraintes : inférence dans les CSP . . . . .	168
6.3	Exploration par <i>backtracking</i> pour les CSP . . . . .	172
6.4	Exploration locale pour les CSP . . . . .	178
6.5	Structure des problèmes . . . . .	179
	Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	183
 <b>III Connaissances, raisonnement et planification</b>		
<b>7</b>	<b>Agents logiques</b>	<b>187</b>
7.1	Agents fondés sur les connaissances . . . . .	188
7.2	Le monde du wumpus . . . . .	189
7.3	Logique . . . . .	192
7.4	La logique propositionnelle : une logique très simple . . . . .	195
7.5	Démonstration de théorèmes en logique propositionnelle . . . . .	199
7.6	Vérification efficace de modèles en logique propositionnelle . . . . .	208
7.7	Agents fondés sur la logique propositionnelle . . . . .	213
	Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	220
<b>8</b>	<b>Logique du premier ordre</b>	<b>225</b>
8.1	Retour sur la représentation . . . . .	225
8.2	Syntaxe et sémantique de la logique du premier ordre . . . . .	229
8.3	Utiliser la logique du premier ordre . . . . .	238
8.4	Ingénierie des connaissances en logique du premier ordre . . . . .	243
	Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	248
<b>9</b>	<b>Inférence en logique du premier ordre</b>	<b>251</b>
9.1	Inférence propositionnelle <i>versus</i> inférence du premier ordre . . . . .	251
9.2	Unification et inférence en premier ordre . . . . .	253
9.3	Chaînage avant . . . . .	257
9.4	Chaînage arrière . . . . .	263
9.5	Résolution . . . . .	268
	Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	278
<b>10</b>	<b>Représentation des connaissances</b>	<b>283</b>
10.1	Ingénierie ontologique . . . . .	283
10.2	Catégories et objets . . . . .	285
10.3	Événements . . . . .	290
10.4	Objets mentaux et logique modale . . . . .	294
10.5	Systèmes de raisonnement pour les catégories . . . . .	296
10.6	Raisonnements avec informations par défaut . . . . .	300
	Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	303

<b>11 Planification classique</b>	<b>309</b>
11.1 Définition de la planification classique . . . . .	309
11.2 Algorithmes pour la planification classique . . . . .	313
11.3 Heuristiques pour la planification . . . . .	317
11.4 Planification hiérarchique . . . . .	320
11.5 Planification et action dans des domaines non déterministes . . . . .	327
11.6 Temps, ordonnancement et ressources . . . . .	336
11.7 Analyse des méthodes de planification . . . . .	339
Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	339
<b>IV Connaître et penser l'incertain</b>	
<b>12 Quantification de l'incertitude</b>	<b>345</b>
12.1 Agir dans l'incertitude . . . . .	345
12.2 Probabilités : notations de base . . . . .	348
12.3 Inférence utilisant des distributions conjointes complètes . . . . .	354
12.4 Indépendance . . . . .	356
12.5 La règle de Bayes et son utilisation . . . . .	357
12.6 Modèles bayésiens naïfs . . . . .	360
12.7 Le monde du wumpus revisité . . . . .	362
Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	364
<b>13 Raisonnement probabiliste</b>	<b>369</b>
13.1 Représentation des connaissances dans un domaine incertain . . . . .	369
13.2 Sémantique des réseaux bayésiens . . . . .	371
13.3 Inférence exacte dans les réseaux bayésiens . . . . .	382
13.4 Inférence approchée dans les réseaux bayésiens . . . . .	389
13.5 Réseaux causaux . . . . .	402
Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	406
<b>14 Raisonnement probabiliste temporel</b>	<b>413</b>
14.1 Temps et incertitude . . . . .	413
14.2 Inférence dans les modèles temporels . . . . .	417
14.3 Modèles de Markov cachés . . . . .	423
14.4 Filtres de Kalman . . . . .	428
14.5 Réseaux bayésiens dynamiques . . . . .	434
Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	444
<b>15 Programmation probabiliste</b>	<b>447</b>
15.1 Modèles probabilistes relationnels . . . . .	448
15.2 Modèles probabilistes en univers ouvert . . . . .	453
15.3 Suivre l'évolution d'un monde complexe . . . . .	459
15.4 Modèles probabilistes sous forme de programmes . . . . .	463
Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	467
<b>16 Prise de décision simple</b>	<b>473</b>
16.1 Désirs, croyances et incertitude . . . . .	473
16.2 Concepts de base de la théorie de l'utilité . . . . .	474
16.3 Fonctions d'utilité . . . . .	477
16.4 Fonctions d'utilité multiattribut . . . . .	483
16.5 Réseaux de décision . . . . .	487
16.6 La valeur de l'information . . . . .	489
16.7 Préférences inconnues . . . . .	495
Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	498

<b>17</b>	<b>Prise de décision complexe</b>	<b>503</b>
17.1	Problèmes de décision séquentiels . . . . .	503
17.2	Algorithmes pour les PDM . . . . .	512
17.3	Les problèmes de bandit . . . . .	519
17.4	PDM partiellement observables . . . . .	526
17.5	Algorithmes de résolution des PDMPO . . . . .	528
	Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	532
<b>18</b>	<b>Prise de décision multiagent</b>	<b>537</b>
18.1	Propriétés des environnements multiagents . . . . .	537
18.2	Théorie des jeux non coopératifs . . . . .	542
18.3	Théorie des jeux coopératifs . . . . .	560
18.4	Prise de décision collective . . . . .	565
	Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	576
<b>V</b>	<b>Apprentissage</b>	
<b>19</b>	<b>Apprendre à partir d'exemples</b>	<b>581</b>
19.1	Les différentes formes d'apprentissage . . . . .	581
19.2	Apprentissage supervisé . . . . .	583
19.3	Apprentissage d'arbres de décision . . . . .	586
19.4	Évaluation et choix de la meilleure hypothèse . . . . .	594
19.5	Théorie de l'apprentissage . . . . .	600
19.6	Régression et classification avec des modèles linéaires . . . . .	603
19.7	Modèles non paramétriques . . . . .	612
19.8	Méthodes d'apprentissage par ensemble . . . . .	620
19.9	L'apprentissage automatique en pratique . . . . .	628
	Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	636
<b>20</b>	<b>Apprentissage de modèles probabilistes</b>	<b>643</b>
20.1	Apprentissage statistique . . . . .	643
20.2	Apprentissage avec données complètes . . . . .	646
20.3	Apprentissage avec variables cachées : l'algorithme EM . . . . .	657
	Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	665
<b>21</b>	<b>Apprentissage profond</b>	<b>669</b>
21.1	Réseaux simples à propagation avant . . . . .	670
21.2	Graphes de calcul en apprentissage profond . . . . .	674
21.3	Réseaux convolutifs . . . . .	677
21.4	Algorithmes d'apprentissage . . . . .	682
21.5	Généralisation . . . . .	685
21.6	Réseaux de neurones récurrents . . . . .	689
21.7	Apprentissage non supervisé et apprentissage par transfert . . . . .	692
21.8	Applications . . . . .	697
	Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	699
<b>22</b>	<b>Apprentissage par renforcement</b>	<b>705</b>
22.1	Apprendre de ses récompenses . . . . .	705
22.2	Apprentissage par renforcement passif . . . . .	707
22.3	Apprentissage par renforcement actif . . . . .	712
22.4	Généralisation et apprentissage par renforcement . . . . .	717
22.5	Recherche de politique . . . . .	723
22.6	Apprentissage par démonstration et apprentissage par renforcement inverse . . . . .	725
22.7	Applications de l'apprentissage par renforcement . . . . .	728
	Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	730

## VI Communiquer, percevoir et agir

<b>23</b>	<b>Traitement du langage naturel</b>	<b>735</b>
23.1	Modèles de langue . . . . .	735
23.2	Grammaire . . . . .	745
23.3	Analyse syntaxique . . . . .	747
23.4	Grammaires augmentées . . . . .	752
23.5	Complexité des langues naturelles réelles . . . . .	756
23.6	Tâches de TALN . . . . .	759
	Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	760
<b>24</b>	<b>Apprentissage profond en traitement du langage naturel</b>	<b>765</b>
24.1	Plongement lexical . . . . .	765
24.2	Réseaux de neurones récurrents pour le TALN . . . . .	769
24.3	Modèles séquence à séquence . . . . .	772
24.4	Architecture de transformateur . . . . .	776
24.5	Préentraînement et apprentissage par transfert . . . . .	778
24.6	État de l'art . . . . .	781
	Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	785
<b>25</b>	<b>Vision par ordinateur</b>	<b>789</b>
25.1	Introduction . . . . .	789
25.2	Formation des images . . . . .	790
25.3	Attributs d'image élémentaires . . . . .	795
25.4	Classification des images . . . . .	802
25.5	Détection des objets . . . . .	805
25.6	Reconstruction du monde en 3D . . . . .	807
25.7	Utilisation de la vision . . . . .	811
	Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	823
<b>26</b>	<b>Robotique</b>	<b>829</b>
26.1	Les robots . . . . .	829
26.2	Aspects matériels . . . . .	830
26.3	Les tâches de la robotique . . . . .	833
26.4	Perception robotique . . . . .	834
26.5	Planification et commande . . . . .	840
26.6	Planification de mouvements incertains . . . . .	856
26.7	Apprentissage par renforcement en robotique . . . . .	858
26.8	Humains et robots . . . . .	860
26.9	Autres cadres pour la robotique . . . . .	866
26.10	Domaines d'application . . . . .	869
	Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	872

## VII Conclusions

<b>27</b>	<b>Philosophie, éthique et sécurité de l'IA</b>	<b>879</b>
27.1	Les limites de l'IA . . . . .	879
27.2	Les machines peuvent-elles vraiment penser? . . . . .	882
27.3	L'éthique de l'IA . . . . .	884
	Résumé, notes bibliographiques et historiques . . . . .	900
<b>28</b>	<b>Avenir de l'IA</b>	<b>907</b>
28.1	Composants des agents . . . . .	907
28.2	Architectures d'IA . . . . .	913

<b>Annexe A Rappels mathématiques</b>	<b>917</b>
A.1 Analyse de la complexité et notation $O()$ . . . . .	917
A.2 Vecteurs, matrices et algèbre linéaire . . . . .	919
A.3 Distributions de probabilités . . . . .	920
<b>Annexe B Notes sur les langages et les algorithmes</b>	<b>923</b>
B.1 Définition de langages sous forme de Backus-Naur (BNF) . . . . .	923
B.2 Description d'algorithmes en pseudocode . . . . .	924
B.3 Ressources supplémentaires en ligne . . . . .	925
 <b>Bibliographie</b>	 <b>927</b>
 <b>Index</b>	 <b>965</b>