

# TABLE DES MATIÈRES

<b>I</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>Introduction à la réalité virtuelle</b>	<b>3</b>
1.1	Fondement de la réalité virtuelle . . . . .	3
1.1.1	Introduction . . . . .	3
1.1.2	Définitions de la réalité virtuelle . . . . .	5
1.2	Modèle de référence pour l'immersion et l'interaction . . . . .	10
1.2.1	L'approche «instrumentale» pour l'immersion et l'interaction . . . . .	10
1.2.2	Le modèle de référence en RV . . . . .	12
1.3	Structuration du traité de la réalité virtuelle . . . . .	13
1.3.1	l'Homme et l'environnement virtuel . . . . .	15
1.3.2	L'interfaçage, l'immersion et l'interaction en environnement virtuel . . . . .	15
1.3.3	Les applications de la réalité virtuelle . . . . .	16
1.4	Présentation du contenu du volume «Les outils et les modèles informa- tiques des environnements virtuels» . . . . .	16
1.4.1	La modélisation des environnements virtuels . . . . .	17
1.4.2	Modélisation et simulation . . . . .	21
1.4.3	Réalité virtuelle et complexité . . . . .	24
1.5	Références bibliographiques . . . . .	29
<b>2</b>	<b>Modèles géométriques des environnements virtuels</b>	<b>33</b>
2.1	Introduction . . . . .	33

2.1.1	Types d'objets . . . . .	34
2.1.2	Propriétés des modèles . . . . .	36
2.2	Modèles volumiques . . . . .	36
2.2.1	Énumération spatiale . . . . .	37
2.2.2	Constructive Solid Geometry . . . . .	39
2.3	Modèles surfaciques . . . . .	41
2.3.1	Utilisation de surfaces planes . . . . .	41
2.3.2	Utilisation de surfaces non planes . . . . .	42
2.4	Géométrie algorithmique . . . . .	46
2.4.1	Transformation d'un volume en surface . . . . .	46
2.4.2	Maillage polygonal d'un nuage de points . . . . .	47
2.4.3	Décimation de maillages . . . . .	51
2.5	Optimisation des modèles pour la réalité virtuelle . . . . .	54
2.5.1	Texturation . . . . .	55
2.5.2	Niveaux de détails . . . . .	56
2.6	Références bibliographiques . . . . .	58

## **II Modèles pour les rendus sensori-moteurs 61**

### **3 Modèles pour le rendu visuel 63**

3.1	Les rendus pour la réalité virtuelle . . . . .	63
3.1.1	Introduction . . . . .	63
3.1.2	Rendu temps réel . . . . .	63
3.1.3	Qualité et perception . . . . .	64
3.2	Modèles d'éclairage et d'ombrage . . . . .	65

---

3.2.1	Modélisation de l'apparence . . . . .	65
3.2.2	Modélisation de l'éclairage . . . . .	74
3.3	Rendu et perception . . . . .	80
3.3.1	Modèles de vision et calculs de rendu . . . . .	80
3.3.2	Reproduction de tons . . . . .	83
3.4	Références bibliographiques . . . . .	86
<b>4</b>	<b>Modèles pour le rendu sonore</b>	<b>93</b>
4.1	Introduction . . . . .	93
4.1.1	Problématique du rendu sonore . . . . .	93
4.1.2	Le pipeline de rendu sonore . . . . .	94
4.2	Acoustique et traitement du signal . . . . .	95
4.2.1	Quelques notions d'acoustique . . . . .	96
4.2.2	Outils de traitement du signal pour le rendu audio . . . . .	101
4.3	Synthèse de sources sonores virtuelles . . . . .	103
4.3.1	Synthèse par enregistrements et «textures sonores» . . . . .	103
4.3.2	Synthèse par modèles physiques et analyse-synthèse . . . . .	105
4.3.3	Propriétés des sources sonores. Sources ponctuelles et étendues . . . . .	106
4.4	Modélisation de la propagation du son . . . . .	107
4.4.1	Acquisition de réponses impulsionnelles et rendu . . . . .	107
4.4.2	Modèles physiques pour la propagation du son . . . . .	108
4.4.3	Modèle générique des effets environnementaux . . . . .	116
4.4.4	Intégration des effets de propagation dans le pipeline de rendu sonore . . . . .	120
4.5	Rendu audio structuré et optimisations perceptives . . . . .	124
4.5.1	Importance des sources sonores et masquages auditifs . . . . .	125

---

4.5.2	Niveau de détail et regroupement spatial des sources, «imposteurs sonores» . . . . .	127
4.5.3	Représentations progressives des signaux et scalabilité des traitements . . . . .	128
4.6	Rendu audio 3D par manipulation directe d'enregistrements <i>in-situ</i> . . . . .	129
4.6.1	Rendu à partir d'enregistrements coïncidents et décompositions directionnelles . . . . .	129
4.6.2	Rendu a partir d'enregistrements non-coïncidents . . . . .	130
4.6.3	Extraction d'une scène structurée à partir d'enregistrements . . . . .	130
4.7	Références bibliographiques . . . . .	131
<b>5</b>	<b>Détection des collisions</b>	<b>141</b>
5.1	Détection de collision entre primitives . . . . .	141
5.1.1	Définition de la collision . . . . .	142
5.1.2	Détection spatiale entre polyèdres convexes . . . . .	142
5.1.3	Détection spatiale entre polyèdres quelconques . . . . .	145
5.1.4	Les approches temporelles . . . . .	148
5.1.5	Bilan sur la détection entre objets et problèmes ouverts . . . . .	151
5.2	Le pipeline de détection . . . . .	152
5.2.1	Problématique . . . . .	152
5.2.2	La recherche de proximité (broad-phase) . . . . .	153
5.2.3	La détection approximative (narrow-phase) . . . . .	155
5.2.4	Accélération temporelle continue . . . . .	160
5.2.5	Bilan de l'accélération . . . . .	161
5.3	Traitement de la collision . . . . .	161
5.4	Conclusion . . . . .	162

---

5.5	Références . . . . .	163
<b>6</b>	<b>Modèles pour le rendu haptique</b>	<b>169</b>
6.1	Le couplage simulation/dispositif haptique . . . . .	169
6.2	Le calcul du rendu haptique . . . . .	172
6.2.1	Rendus par schémas d'impédance : calcul des forces . . . . .	172
6.2.2	Rendus par schémas d'admittance : calculs des contraintes . . . . .	173
6.2.3	Des modèles primitifs aux modèles objets (proxy) . . . . .	173
6.2.4	Modélisation de l'environnement pour le rendu haptique . . . . .	176
6.3	L'adaptation fréquentielle . . . . .	177
6.3.1	Les représentations intermédiaires . . . . .	178
6.4	Bibliothèques haptiques . . . . .	181
6.5	Conclusion . . . . .	181
6.6	Références bibliographiques . . . . .	182
<b>7</b>	<b>Modèles mécaniques</b>	<b>185</b>
7.1	Modèles à base de particules . . . . .	185
7.1.1	Rappels . . . . .	185
7.1.2	Nuages de particules . . . . .	186
7.1.3	Masses-ressorts . . . . .	187
7.1.4	Éléments finis . . . . .	189
7.1.5	Formulations lagrangiennes . . . . .	191
7.1.6	Intégration du temps . . . . .	191
7.2	Solides en contact . . . . .	192
7.2.1	Dynamique du solide . . . . .	192
7.2.2	Calcul analytique des forces de contact . . . . .	195

7.2.3	Pénalités . . . . .	196
7.2.4	Frottement . . . . .	197
7.2.5	Impulsions . . . . .	199
7.2.6	Impulsions intégrées . . . . .	201
7.2.7	Méthodes à base d'optimisation . . . . .	202
7.2.8	Regroupements optimaux . . . . .	203
7.3	Solides articulés . . . . .	204
7.3.1	Dynamique directe en coordonnées absolues . . . . .	204
7.3.2	Dynamique directe en coordonnées relatives . . . . .	206
7.3.3	Méthode à base de réseaux de neurones . . . . .	207
7.4	Identifier un modèle à partir de la cinématique . . . . .	207
7.4.1	Introduction . . . . .	207
7.4.2	La technique évolutionnaire . . . . .	208
7.4.3	Stratégie d'évolution : un paramétrage adapté aux grandeurs physiques . . . . .	208
7.4.4	Fonctions de coût adaptée aux systèmes masses-ressorts . . . . .	209
7.4.5	Applications et limites . . . . .	210
7.4.6	Trajectoire réelle : identification . . . . .	211
7.5	Références bibliographiques . . . . .	213
 <b>III Modèles pour le rendu comportemental</b>		<b>217</b>
 <b>8 Scénarios adaptatifs : le paradoxe du contrôle d'agents autonomes</b>		<b>219</b>
8.1	Introduction . . . . .	219
8.2	Etat de l'art . . . . .	219
8.3	Le langage SLuHrG . . . . .	220

---

8.3.1	Introduction . . . . .	220
8.3.2	Langage de scénario . . . . .	221
8.3.3	Grammaire du langage . . . . .	222
8.3.4	Gestion des acteurs . . . . .	228
8.3.5	Ordonnancement . . . . .	230
8.3.6	Conclusion . . . . .	232
8.4	Exemple de scénario . . . . .	232
8.5	Conclusion . . . . .	236
8.6	Références bibliographiques . . . . .	239
<b>9</b>	<b>Modèles pour l'autonomie</b>	<b>241</b>
9.1	Introduction . . . . .	241
9.1.1	Interdisciplinarité . . . . .	241
9.1.2	Transdisciplinarité . . . . .	242
9.2	Principe d'autonomie . . . . .	243
9.2.1	Exploitation des modèles . . . . .	243
9.2.2	Modélisation de l'utilisateur . . . . .	245
9.2.3	Autonomisation des modèles . . . . .	246
9.2.4	L'autonomie en réalité virtuelle . . . . .	249
9.3	Entités autonomes . . . . .	250
9.3.1	Approche multi-agents . . . . .	252
9.3.2	Simulation multi-agents participative . . . . .	253
9.3.3	Métaphore d'Ali Baba . . . . .	254
9.3.4	Expérimentation <i>in virtuo</i> . . . . .	256
9.4	L'autonomie par construction . . . . .	257
9.4.1	Hypothèse énaactive . . . . .	257

9.4.2	Modélisation éactive . . . . .	260
9.4.3	Premiers résultats . . . . .	263
9.5	Conclusion . . . . .	264
9.6	Références bibliographiques . . . . .	265
<b>10 Modèles pour les humanoïdes</b>		<b>273</b>
10.1	Introduction . . . . .	273
10.2	L'humain virtuel . . . . .	274
10.2.1	H-ANIM . . . . .	274
10.2.2	CAL3D . . . . .	276
10.3	Animation d'humains virtuels . . . . .	277
10.3.1	Animation d'humains par cinématique directe . . . . .	277
10.3.2	Animation d'humains par cinématique inverse . . . . .	278
10.3.3	Capture de mouvements en temps réel . . . . .	279
10.3.4	Adaptation en temps réel de mouvements capturés . . . . .	281
10.3.5	Utilisation de la dynamique . . . . .	285
10.4	Modéliser le comportement humain . . . . .	285
10.5	Modèles de comportement réactif . . . . .	287
10.5.1	Les familles de modèle . . . . .	287
10.5.2	HPTS : un outil de spécification de comportements réactifs . . . . .	289
10.5.3	Les modèles de perception . . . . .	290
10.5.4	Les modèles d'actions sur les objets . . . . .	292
10.5.5	Les approches compétitives et coopératives de sélection d'action(s) . . . . .	292
10.6	Modèles de comportement cognitif . . . . .	294
10.6.1	Introduction . . . . .	294

---

10.6.2	Approches cognitives en animation . . . . .	296
10.6.3	Modélisation des émotions . . . . .	298
10.7	Modèles de comportements collectifs et sociaux . . . . .	298
10.7.1	Introduction . . . . .	298
10.7.2	La locomotion . . . . .	299
10.7.3	Modèles de navigation réactive d'un humain virtuel dans son environnement . . . . .	300
10.7.4	Comportements de foules . . . . .	302
10.7.5	Modèles de simulation de foule . . . . .	303
10.8	Conclusion . . . . .	306
10.9	Références bibliographiques . . . . .	306
<b>11</b>	<b>Modèles pour les environnements naturels</b>	<b>315</b>
11.1	Introduction . . . . .	315
11.2	Éléments de méthodologie . . . . .	315
11.2.1	Verrous scientifiques . . . . .	316
11.2.2	Méthode de construction des modèles . . . . .	317
11.2.3	Outil générique pour la modélisation multi-échelles . . . . .	319
11.3	Etude de cas . . . . .	319
11.3.1	Prairies agitées par le vent . . . . .	320
11.3.2	Mer quasi-linéaire . . . . .	321
11.3.3	Ruisseaux . . . . .	322
11.3.4	Nuages, fumées et avalanches . . . . .	323
11.4	Modélisation énaactive des états de mer . . . . .	324
11.4.1	La mer des marins : un défi pour la physique . . . . .	325
11.4.2	Choix des entités énaactives pour la mer des marins . . . . .	326

11.5	Conclusion : psychologie ou physique ? . . . . .	330
11.5.1	Visualisation : une réhabilitation du «trompe-l'œil» . . . . .	330
11.5.2	Vers une nouvelle méthodologie pour la simulation . . . . .	330
11.6	Références bibliographiques . . . . .	331

## **IV Outils et environnements de développement 333**

### **12 OpenMASK : une plate-forme logicielle Open Source pour la réalité virtuelle 335**

12.1	Introduction . . . . .	335
12.2	Concepts d'OpenMASK . . . . .	336
12.2.1	Noyau - une machine virtuelle . . . . .	337
12.2.2	Objet de simulation fréquentiel et/ou réactif . . . . .	339
12.2.3	Applicatif configurable . . . . .	343
12.2.4	Session distribuable . . . . .	343
12.2.5	Conclusion . . . . .	344
12.3	Services d'OpenMASK pour la réalité virtuelle . . . . .	345
12.3.1	Initialisations . . . . .	345
12.3.2	Visualisations interactives . . . . .	345
12.3.3	Sonorisations . . . . .	348
12.3.4	Interactions . . . . .	349
12.3.5	Coopérations . . . . .	352
12.3.6	Conclusion . . . . .	355
12.4	OpenMASK : Plate-forme d'intégration et de capitalisation de services . . . . .	356
12.4.1	Handball - tirs au but . . . . .	356
12.4.2	GVT - formation à la maintenance . . . . .	358

---

12.4.3	Musée virtuel de la photographie contemporaine . . . . .	360
12.4.4	Collaborations haptiques distribuées . . . . .	362
12.5	Conclusion . . . . .	365
12.6	Remerciements . . . . .	366
12.7	Références bibliographiques . . . . .	366
<b>13</b>	<b>ARéVi</b>	<b>369</b>
13.1	Motivations . . . . .	369
13.2	Les services de base . . . . .	370
13.2.1	L'architecture retenue . . . . .	370
13.2.2	Les entités autonomes . . . . .	372
13.2.3	La communication par messages . . . . .	373
13.2.4	Liaison avec d'autres outils . . . . .	374
13.3	Les services 3D . . . . .	375
13.3.1	La structure retenue . . . . .	376
13.3.2	Les objets graphiques . . . . .	378
13.3.3	Les moyens de détection . . . . .	379
13.3.4	Les systèmes de particules . . . . .	380
13.3.5	Les interacteurs . . . . .	380
13.3.6	La visualisation stéréoscopique . . . . .	381
13.4	La distribution . . . . .	382
13.4.1	Le modèle retenu . . . . .	382
13.4.2	La sérialisation . . . . .	384
13.4.3	Démarche de mise en œuvre . . . . .	385
13.5	Les humanoïdes . . . . .	385
13.5.1	Le principe . . . . .	386

---

13.5.2	Les squelettes . . . . .	386
13.5.3	L'animation . . . . .	387
13.5.4	La représentation . . . . .	388
13.5.5	Démarche de mise en œuvre . . . . .	389
13.6	Bilan et perspectives . . . . .	389
<b>14</b>	<b>EVI3d : une plate-forme de développement d'applications de RV&amp;A</b>	<b>393</b>
14.1	Introduction . . . . .	393
14.2	Gestion de la multimodalité . . . . .	393
14.2.1	Multimodalité en entrée . . . . .	394
14.2.2	Multimodalité en sortie . . . . .	395
14.2.3	Cluster graphique et cluster de rendu multimodal . . . . .	396
14.3	Conclusion . . . . .	398
14.4	Références bibliographiques . . . . .	398
<b>15</b>	<b>Virtools et la réalité virtuelle</b>	<b>399</b>
15.1	Les outils logiciels de Virtools pour la réalité virtuelle . . . . .	399
15.1.1	La plate-forme de développement Virtools Dev . . . . .	399
15.1.2	Les outils logiciels autour de la plate-forme . . . . .	399
15.1.3	La Schématique Virtools . . . . .	401
15.1.4	Le VR Pack . . . . .	403
15.2	Virtools et ses marchés . . . . .	405
15.2.1	Le jeu vidéo . . . . .	407
15.2.2	Le marketing en ligne et multimédia . . . . .	407
15.2.3	Les applications industrielles . . . . .	408
15.2.4	La société Virtools . . . . .	409

---

15.3	Références bibliographiques . . . . .	409
<b>16</b>	<b>La réalité virtuelle distribuée</b>	<b>411</b>
16.1	Introduction . . . . .	411
16.2	Bref historique . . . . .	412
16.3	Architecture des systèmes de RVD . . . . .	413
16.3.1	Architecture client-serveur centralisée . . . . .	415
16.3.2	Architecture client-serveur distribuée . . . . .	415
16.3.3	Architecture client-serveur distribuée avec plusieurs serveurs . . . . .	415
16.3.4	Architecture égal à égal (peer to peer) distribuée point à point . . . . .	416
16.3.5	Architecture égal à égal distribuée en mode diffusion . . . . .	417
16.4	Techniques d'optimisation des systèmes de RVD . . . . .	418
16.5	Références bibliographiques . . . . .	423