

## PRÉFACE

*Alain Berthoz*

La réalité virtuelle va jouer un rôle décisif dans les années à venir et ce traité est donc très utile pour rassembler un certain nombre de connaissances, de théories et de techniques. On peut, en effet, prévoir une explosion de son utilisation dans les domaines suivants.

D'abord l'éducation où elle va apporter beaucoup à de nombreuses disciplines par le développement de l'enseignement à distance et par l'apprentissage des processus industriels. Les plus grandes sociétés développent aujourd'hui des méthodes basées sur la réalité virtuelle pour entraîner leur personnel à des opérations de manipulation, l'aider dans la compréhension de processus complexes et dans la navigation en environnements hostiles ou lointains. De façon plus générale, la réalité virtuelle haptique et visuelle (car la réalité virtuelle n'est pas seulement visuelle mais multimodale) sera un outil indispensable pour le développement des simulateurs de demain, qu'ils concernent le pilotage d'avions ou de voitures, la simulation de méthodes chirurgicales ou la simulation d'activités sportives. On peut dire que nous tenons là un formidable outil d'apprentissage. Cependant, son usage ne sera pas limité à l'enseignement ou à l'entraînement. La réalité virtuelle est aussi entrée dans le monde du travail par la téléopération qui exige une restitution de la présence des objets manipulés et de leur environnement. Véritable prolongement de la main, de la vision, du sens du toucher, la réalité virtuelle permet aujourd'hui d'allonger le bras de l'opérateur au-delà des routes et des océans.

L'utilisation de la réalité virtuelle ne s'arrête toujours pas là. On entrevoit maintenant son emploi dans le domaine médical pour l'aide au diagnostic de certaines maladies (par exemple le vertige ou les troubles de l'orientation spatiale) et pour l'étude des bases neurales de ces maladies, où la réalité virtuelle s'est introduite car elle permet de manipuler les paramètres du monde visuel, haptique ou acoustique. La réalité virtuelle peut être aussi exploitée pour la réhabilitation, voire le traitement, des troubles liés à l'âge (par exemple par des méthodes de thérapies comportementales).

Enfin son usage va se répandre dans la science par le biais de la simulation des processus et de la construction de modèles explicatifs dans de très nombreux domaines. Il est inutile de mentionner l'immense champ d'application que constitue le domaine des jeux, qu'ils soient basés ou non sur des techniques de réalité virtuelle.

Ces exemples donnent une idée de l'enjeu. Face à lui, les méthodes et les techniques, comme on le lira ici, se développent très rapidement. Il faut toutefois rester conscient du chemin qui reste à parcourir. Et qui risque d'être long. Ce chemin est d'abord technologique. En effet, la technologie qui permettra une restitution fidèle de la réalité n'est pas encore achevée et le savoir-faire des ingénieurs sera précieux. Les jeunes ont devant eux un immense champ de recherche et de réalisation. Ensuite, sur le plan de la fusion des modalités de la réalité virtuelle, il est nécessaire de combiner vision, sens haptique et acoustique, comme le fait si habilement le cerveau. Ceci est encore un grand défi à relever. Pour cela, je conseille sans aucun doute d'accroître la trop faible coopération entre les spécialistes des sciences de la cognition et les ingénieurs. Pas parce que les processus qu'utilise le cerveau, lorsqu'ils sont connus, sont nécessairement à copier

mais parce qu'un échange réciproque ne peut qu'enrichir les connaissances des uns et des autres. De telles coopérations sont trop rares en France, et je remercie les auteurs de ce livre de s'être adressé à un Physiologiste pour préfacer leur ouvrage.

Le chemin est ensuite théorique. Nous savons peu de choses sur les processus cérébraux qui permettent de reconnaître avec une grande finesse la forme d'un objet en mouvement. Au fond, nous savons peu de chose sur la perception du mouvement et sur les mécanismes qui permettent au cerveau de mettre en correspondance le toucher et la vision. Nous savons enfin peu de chose sur la façon dont le cerveau résout les problèmes de délai. J'ai eu l'impression, en lisant ce livre, que des problèmes théoriques majeurs sont encore à résoudre dans le domaine de l'algorithmique, en particulier concernant les problèmes tridimensionnels. La représentation de l'espace 3D, la reconnaissance des objets, posent des problèmes de géométrie encore non résolus, les capteurs sont encore à perfectionner mais aussi les théories sur le traitement de leurs données. Nous savons que le cerveau peut résoudre le problème du grand nombre de degrés de liberté à contrôler, qu'il anticipe, présélectionne et fait des hypothèses sur les données des sens. Ces capacités de prédiction, d'anticipation, d'utilisation de la mémoire pour prédire le futur permettent de simplifier la "neurocomputation". Nous savons aussi que l'analyse du monde extérieur utilise des "modèles internes" des lois de la mécanique et des lois physiques. Faut-il intégrer de tels processus dans les systèmes de contrôle et d'analyse des dispositifs de réalité virtuelle ? Faut-il en inventer de meilleurs ? Voilà le défi et ce livre sera utile à tous ceux qui veulent le relever.

Alain Berthoz est Professeur au Collège de France, il est le directeur du Laboratoire de Physiologie de la Perception et de l'Action CNRS Collège de France. Il est notamment l'auteur de l'ouvrage «Le sens du mouvement» publié chez Odile Jacob en 1997.

## AVANT PROPOS

Depuis une dizaine d'années, la réalité virtuelle s'est développée en France. Celle-ci ouvre potentiellement de nouvelles perspectives pour notre société. Mais soyons réalistes, la réalité virtuelle induit d'abord bien des défis scientifiques pour les chercheurs et pour les industriels. Nous avons participé avec enthousiasme à l'éclosion de la réalité virtuelle en France, conscients de l'immensité de la tâche. Durant cette décennie, nous avons développé, entre autres, des connaissances pour l'interfaçage en environnement virtuel et conçu des méthodes pour la réalité virtuelle, tant sur le plan technique que sur le plan humain.

Parallèlement à nos travaux de recherche, nous avons souhaité faire une tâche d'information sur les avancées du domaine. Dans les années 90, Jean-Paul Papin a présidé le groupe de recherche OTAN sur les applications de la réalité virtuelle dans le milieu militaire. Plusieurs ateliers internationaux ont été organisés et ont publié des rapports scientifiques. En 1996, Philippe Fuchs rédigea un premier livre sur la réalité virtuelle (*Les Interfaces de la Réalité Virtuelle*). Guillaume Moreau a exposé dans son mémoire de thèse ses recherches sur l'animation d'êtres humains dans les mondes virtuels.

Conscient de l'évolution des techniques, des nouvelles approches cognitives de la réalité virtuelle et de l'absence de livre récent en français, nous avons décidé de rédiger un nouveau livre plus ambitieux, couvrant les différents aspects du domaine. Son objectif est de fournir à toute personne un document de référence sur la Réalité Virtuelle, d'où son titre «Le traité de la réalité virtuelle».

Mais personne ne peut avoir une vision globale et précise de tous les secteurs de la réalité virtuelle. Nous souhaitons vivement que d'autres chercheurs participent à la rédaction du traité dans une prochaine version, soit pour écrire de nouveaux chapitres, soit pour compléter des chapitres existants. Notre ambition actuelle est de proposer une première version, sachant qu'une réactualisation périodique est possible grâce à la réactivité des Presses de l'École des Mines de Paris et grâce aux facilités d'échange par Internet. Ainsi nous désirons profiter de l'essor des nouveaux moyens d'information : en proposant une version consultable sur notre site web (et téléchargeable gratuitement<sup>1</sup> pour les étudiants), nous espérons une plus grande interactivité avec le lecteur qui pourra donner en ligne son point de vue et ses critiques, que nous accepterons volontiers. Et en étant optimiste, dans un futur plus ou moins proche, quand le livre électronique sera performant, exploitable et exploité à la place du livre papier, l'interactivité pourra être plus grande entre auteurs et lecteurs. Ceci induira un nouveau moyen de communication : l'INTERLIVRE, puisqu'il sera INTERactif, téléchargeable sur INTERNet et rédigé INTERauteurs.

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont aidés dans nos recherches et dans la réalisation de ce livre, en particulier le Professeur Claude Laugeau, directeur du Centre de Robotique de l'École des Mines de Paris, tous nos collègues, en particulier Fawzi Nashashibi et Domitile Lourdeaux, les entreprises nous ayant fourni des photographies ainsi que Madame Catherine Delamare, responsable des Presses de

---

<sup>1</sup>La version électronique n'est gratuite que pour les étudiants. Nous espérons que cette règle sera respectée par tous.

l'Ecole des Mines de Paris. Nous exprimons notre gratitude aux différents relecteurs dont les conseils ont contribué à améliorer notre manuscrit : les Professeurs Jean Serra, Bruno Araldi, Gérard Subsol et Jacques Tisseau.

Nos remerciements s'adressent aussi au Professeur Alain Berthoz du Collège de France, qui a eu la gentillesse de préfacer notre livre.

Nous espérons, cher lecteur, que vous apprécierez de lire ce traité, comme nous avons pris plaisir à le rédiger et à transmettre nos idées.

Les Auteurs,

## TABLE DES MATIÈRES

<b>I</b>	<b>Les concepts de base de la réalité virtuelle</b>	<b>1</b>
<b>1</b>	<b>La réalité virtuelle et ses applications</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 . . . . .	4
1.1.3	Aspects philosophique et social de la réalité virtuelle . . . . .	11
1.1.4	Définition et taxonomie de la réalité augmentée . . . . .	12
1.1.5	Historique succinct de la réalité virtuelle . . . . .	17
1.1.6	Les domaines précurseurs de la réalité virtuelle . . . . .	18
1.1.7	Le développement de la réalité virtuelle en France . . . . .	18
1.1.8	Un petit bêtisier de la réalité virtuelle . . . . .	21
1.2	Les applications de la réalité virtuelle . . . . .	22
1.2.1	Taxonomie théorique des applications RV . . . . .	22
1.2.2	Les applications potentielles de la réalité virtuelle . . . . .	23
1.2.3	Les domaines économiques des applications actuelles . . . . .	25
1.3	Références bibliographiques . . . . .	35
<b>2</b>	<b>Approche théorique et pragmatique de la réalité virtuelle</b>	<b>39</b>
2.1	Comportement de l'homme dans un environnement réel . . . . .	39
2.2	Conception des interfaces comportementales . . . . .	41
2.2.1	Conception matérielle . . . . .	41
2.2.2	Transparence d'une interface . . . . .	42

2.2.3	Interfaces commercialisées et interfaces spécifiques . . . . .	43
2.2.4	Comparaison entre interfaces en réalité virtuelle et en téléopération . . .	45
2.3	L'approche «instrumentale» pour l'immersion et l'interaction . . . . .	45
2.3.1	Les concepts fondamentaux pour l'interfaçage comportemental . . . . .	45
2.3.2	Interfaces comportementales, schèmes et métaphores . . . . .	49
2.4	Méthode de conception et d'évaluation d'un environnement RV . . . . .	53
2.4.1	Le schéma de référence en RV . . . . .	53
2.4.2	Les Primitives Comportementales Virtuelles et les Aides Logicielles Com- portementales . . . . .	56
2.4.3	Démarche de conception . . . . .	57
2.4.4	Démarche de l'évaluation . . . . .	59
2.4.5	Ouverture d'une porte . . . . .	61
2.4.6	Magasin virtuel d'expérimentation commerciale . . . . .	61
2.4.7	Formation en réalité virtuelle sur des infrastructures ferroviaires . . . . .	67
2.5	Discussion sur l'immersion et l'interaction du sujet . . . . .	70
2.5.1	Approche instrumentale . . . . .	70
2.5.2	Présence et immersion . . . . .	72
2.6	Perspectives et conclusions de notre approche . . . . .	73
2.7	Références bibliographiques . . . . .	74
 <b>II Les interfaces comportementales</b>		<b>77</b>
 <b>3 L'être humain dans les environnements réel et virtuel</b>		<b>79</b>
3.1	Introduction . . . . .	79
3.2	L'être humain, son environnement naturel . . . . .	79
3.3	Les facteurs humains et le facteur humain . . . . .	83

3.3.1	Définitions . . . . .	83
3.3.2	Démarche systémique . . . . .	84
3.3.3	L'homme en action . . . . .	84
3.3.4	Facteurs influents . . . . .	89
3.4	Conclusion . . . . .	93
3.5	Références bibliographiques . . . . .	93
<b>4</b>	<b>Les sens et les réponses motrices de l'homme</b>	<b>95</b>
4.1	Le fonctionnement des sens . . . . .	95
4.2	La vision . . . . .	97
4.2.1	Le système visuel humain . . . . .	97
4.2.2	Traitement de l'information dans le système visuel . . . . .	102
4.2.3	Prise visuelle d'informations . . . . .	107
4.2.4	La perception visuelle de la profondeur . . . . .	108
4.2.5	Les caractéristiques psychophysiques de la vision . . . . .	115
4.3	L'ouïe . . . . .	122
4.3.1	Introduction . . . . .	122
4.3.2	Physique du son . . . . .	122
4.3.3	Le système auditif . . . . .	125
4.3.4	Physiologie de l'audition . . . . .	126
4.3.5	Principe de localisation spatiale d'une source sonore . . . . .	128
4.3.6	La perception auditive . . . . .	130
4.4	Sensibilité cutanée . . . . .	131
4.4.1	Physique de la matière . . . . .	132
4.4.2	La peau . . . . .	133
4.5	Les ambiances chimiques : l'odorat et le goût . . . . .	136

4.5.1	Les odeurs . . . . .	136
4.5.2	Les saveurs . . . . .	139
4.6	Proprioception . . . . .	140
4.6.1	Introduction . . . . .	140
4.6.2	Physique de la gravité et des accélérations . . . . .	141
4.6.3	L'appareil vestibulaire et les voies kinesthésiques . . . . .	141
4.7	Réponses motrices . . . . .	144
4.8	La main, organe d'information et d'action . . . . .	145
4.8.1	Anatomie de la main . . . . .	145
4.8.2	Fonction de la main . . . . .	147
4.9	Classification des interfaces . . . . .	149
4.10	Références bibliographiques . . . . .	149

### **III Les interfaces motrices 153**

<b>5</b>	<b>Les capteurs de localisation</b>	<b>155</b>
5.1	Généralités . . . . .	155
5.1.1	La localisation spatiale . . . . .	155
5.1.2	Capteur de localisation et interface de commande . . . . .	156
5.2	Principes de positionnement . . . . .	157
5.2.1	Principe par mesures de distance entre points . . . . .	157
5.2.2	Principe de mesure avec source émettrice . . . . .	158
5.2.3	Principe de mesure sans source émettrice artificielle . . . . .	158
5.2.4	Principe de mesure de caractéristiques du mouvement . . . . .	158
5.2.5	Principe par mesures d'angles entre solides . . . . .	159
5.3	Traqueurs mécaniques . . . . .	159

---

5.3.1	Traqueurs mécaniques mesurant des distances . . . . .	159
5.3.2	Capteurs mécaniques déterminant une orientation, une vitesse ou une accélération . . . . .	162
5.4	Traqueurs électromagnétiques . . . . .	166
5.4.1	Traqueurs électromagnétiques à champ alternatif . . . . .	166
5.4.2	Traqueurs électromagnétiques à champ impulsionnel . . . . .	168
5.4.3	Caractéristiques des traqueurs électromagnétiques . . . . .	170
5.4.4	Compas . . . . .	173
5.5	Traqueurs acoustiques . . . . .	174
5.6	Traqueurs optiques . . . . .	177
5.6.1	Traqueurs avec récepteurs ponctuels . . . . .	177
5.6.2	Traqueurs avec récepteurs plans . . . . .	178
5.7	Comparaison entre les différents types de traqueurs . . . . .	183
5.8	Annexe : Calcul des paramètres du capteur électromagnétique Fastrak . .	185
5.8.1	Principe . . . . .	185
5.8.2	Détermination des courants dans le récepteur . . . . .	187
5.8.3	Détermination des changements en position et orientation . . . . .	189
5.9	Références bibliographiques . . . . .	191
<b>6</b>	<b>Les interfaces spécifiques de la localisation corporelle</b>	<b>193</b>
6.1	Introduction . . . . .	193
6.2	Interfaces de localisation du corps «motion capture» . . . . .	194
6.2.1	Deux principes de «motion capture» . . . . .	194
6.2.2	Interfaces portables de localisation du corps . . . . .	195
6.2.3	Interfaces de localisation optique . . . . .	197
6.3	Interfaces de localisation des membres supérieurs ou inférieurs . . . . .	201

---

6.4	Interfaces spécifiques de locomotion . . . . .	205
6.4.1	Interfaces de locomotion par patins . . . . .	207
6.4.2	Interfaces de locomotion par tapis . . . . .	208
6.4.3	Interfaces de locomotion en position assise . . . . .	211
6.5	Interfaces de detection de L'expression du visage ou des lèvres . . . . .	212
6.5.1	Détection optique de l'expression du visage ou des lèvres . . . . .	212
6.5.2	Détection mecanique de l'expression du visage ou des lèvres . . . . .	213
6.5.3	Conclusion . . . . .	215
6.6	Oculomètres . . . . .	215
6.6.1	Introduction . . . . .	215
6.6.2	Oculomètres optiques . . . . .	215
6.6.3	Oculomètres électromagnétiques . . . . .	217
6.7	Capteurs physiologiques . . . . .	217
6.8	Conclusion . . . . .	217
6.9	Références bibliographiques . . . . .	218
<b>7</b>	<b>Les interfaces manuelles motrices</b>	<b>221</b>
7.1	Introduction . . . . .	221
7.1.1	Capteur de localisation et gant de données . . . . .	221
7.1.2	Capteur de localisation et interface de commande . . . . .	221
7.2	Gants de données . . . . .	222
7.2.1	Gants à fibres optiques . . . . .	222
7.2.2	Gants à variation de résistances . . . . .	224
7.2.3	Gants à effet Hall . . . . .	226
7.2.4	Cas particulier : gant de commandes binaires . . . . .	226
7.2.5	Conclusion . . . . .	228

---

7.3	Interfaces de commande . . . . .	228
7.3.1	Souris 3D . . . . .	228
7.3.2	Interfaces non-manuelles de commande . . . . .	230
7.4	Références bibliographiques . . . . .	231

## **IV Les interfaces sensori-motrices 233**

### **8 Les interfaces manuelles sensorimotrices, interfaces à retour d'effort 235**

8.1	Introduction . . . . .	235
8.2	Etude de la création des retours d'effort . . . . .	237
8.2.1	Réalisation physique des efforts . . . . .	237
8.2.2	Architecture mécanique de l'interface . . . . .	237
8.3	Les différentes interfaces à retour d'effort . . . . .	240
8.3.1	Retour d'effort à réaction externe . . . . .	240
8.3.2	Retour d'effort à réaction interne . . . . .	260
8.4	Conclusion . . . . .	265
8.5	Références bibliographiques . . . . .	266

## **V Les interfaces sensorielles 269**

### **9 Les interfaces manuelles sensorielles, les interfaces à sensibilité cutanée 271**

9.1	Introduction . . . . .	271
9.2	Interface à retour thermique . . . . .	272
9.3	Interfaces à retour tactile . . . . .	274
9.3.1	Retour tactile pneumatique . . . . .	274
9.3.2	Retour tactile à matrice d'aiguilles . . . . .	274

9.3.3	Retour tactile par vibrations . . . . .	276
9.3.4	Retour tactile par manette . . . . .	278
9.3.5	Retour tactile par électrodes cutanées . . . . .	278
9.3.6	Le cas particulier du mixage de phénomènes virtuel et réel . . . . .	279
9.4	Conclusion . . . . .	280
9.5	Références bibliographiques . . . . .	280
<b>10</b>	<b>Les interfaces visuelles</b>	<b>283</b>
10.1	Introduction aux interfaces visuelles . . . . .	283
10.2	Interfaces visuelles à support fixe . . . . .	284
10.2.1	Ecrans d'ordinateur monoscopiques . . . . .	284
10.2.2	Ecrans d'ordinateur stéréoscopiques . . . . .	285
10.2.3	Fenêtre immersive . . . . .	291
10.2.4	Visiobureaux ou bureaux immersifs . . . . .	291
10.2.5	Interfaces visuelles à taille humaine : visiosalle (salle immersive) et visiocube . . . . .	298
10.2.6	Différents types de vidéoprojecteurs . . . . .	305
10.3	Interfaces visuelles portables . . . . .	306
10.3.1	Architecture d'un visiocasque . . . . .	307
10.3.2	Visiocasques avec écrans à tube cathodique . . . . .	310
10.3.3	Visiocasques avec écrans à cristaux liquides . . . . .	312
10.3.4	Modèle optique d'un visiocasque et problèmes connexes . . . . .	314
10.3.5	Vidéolunettes . . . . .	317
10.3.6	Visiocasque et dispositif semi transparents . . . . .	320
10.4	Critères de choix d'une interface visuelle . . . . .	321
10.5	Tests visuels sur les interfaces . . . . .	323

---

10.5.1 Tests visuels sur les écrans stéréoscopiques . . . . .	323
10.5.2 Tests visuels sur les écrans visiocasques . . . . .	324
10.6 Création d'images stéréoscopiques . . . . .	326
10.6.1 Principe . . . . .	327
10.6.2 Choix des paramètres stéréoscopiques . . . . .	333
10.6.3 Création d'images en relief pour la téléopération . . . . .	334
10.6.4 Limitation de la fatigue oculaire en vision stéréoscopique . . . . .	338
10.6.5 Création d'images en relief pour une revue de projet . . . . .	341
10.7 Évaluation des techniques stéréoscopiques . . . . .	342
10.7.1 Intérêts de la vision en relief . . . . .	342
10.7.2 Choix des paramètres de la vision en relief . . . . .	342
10.7.3 Comparaison des solutions à un écran . . . . .	343
10.7.4 Comparaison entre les écrans des visiocasques . . . . .	344
10.8 Conclusion . . . . .	344
10.9 Annexes . . . . .	345
10.9.1 Restitution par images volumiques . . . . .	345
10.9.2 Dispositifs pour la polarisation de lumière . . . . .	345
10.9.3 Modélisation d'un visiocasque . . . . .	347
10.9.4 Perception du relief sur une feuille . . . . .	349
10.9.5 Formules de la vision stéréoscopique . . . . .	350
10.10 Références bibliographiques . . . . .	359
<b>11 Les interfaces à simulation de mouvement et les interfaces à simulation de climat</b>	<b>363</b>
11.1 Généralités . . . . .	363
11.2 Sièges de simulation pour mono-utilisateur . . . . .	366

---

11.2.1	Généralités . . . . .	366
11.2.2	Les différents produits de simulation mono-utilisateur . . . . .	367
11.3	Cabines de simulation pour multi utilisateurs . . . . .	371
11.3.1	Evolution des simulateurs . . . . .	371
11.3.2	Plates-formes mobiles . . . . .	373
11.3.3	Les différentes cabines de simulation . . . . .	376
11.4	Conclusion sur les interfaces à simulation de mouvement . . . . .	378
11.5	Interface à simulation de climat . . . . .	378
11.6	Références bibliographiques . . . . .	379
<b>12</b>	<b>Les interfaces olfactives</b>	<b>381</b>
12.1	Introduction . . . . .	381
12.2	Les interfaces olfactives commercialisées . . . . .	381
12.2.1	L'interface olfactive de Olfacom . . . . .	381
12.2.2	L'interface olfactive de Ruetz . . . . .	382
12.2.3	L'interface olfactive de AromaJet . . . . .	383
12.2.4	L'interface olfactive de Aerome . . . . .	384
12.2.5	L'interface olfactive de Digiscents . . . . .	384
12.3	Conclusion . . . . .	385
12.4	Références bibliographiques . . . . .	385
<b>13</b>	<b>Les primitives comportementales virtuelles</b>	<b>387</b>
13.1	Rappel sur notre démarche en réalité virtuelle . . . . .	387
13.1.1	Concepts de base . . . . .	387
13.1.2	Taxonomie des PCV . . . . .	389
13.2	Primitives Comportementales Virtuelles d'observation . . . . .	390

---

13.2.1	Classification . . . . .	390
13.2.2	Observation visuelle . . . . .	391
13.2.3	Observation acoustique . . . . .	392
13.2.4	Observation tactile . . . . .	392
13.3	Primitives Comportementales Virtuelles de déplacement . . . . .	392
13.3.1	Problématique d'un déplacement dans un monde virtuel . . . . .	392
13.3.2	Les différentes interfaces comportementales exploitables . . . . .	394
13.4	Primitives Comportementales Virtuelles pour agir sur le monde virtuel . . . . .	395
13.4.1	Introduction . . . . .	395
13.4.2	Manipuler et orienter un objet . . . . .	396
13.4.3	Assembler des objets . . . . .	398
13.4.4	Déformer un objet . . . . .	398
13.4.5	Agir sur un être vivant . . . . .	398
13.5	Primitives Comportementales Virtuelles de communication avec autrui . . . . .	399
13.6	Conclusion . . . . .	400
13.7	Références bibliographiques . . . . .	400

## **VI Modélisation des mondes virtuels 401**

### **14 Modèles géométriques des environnements virtuels 403**

14.1	Introduction . . . . .	403
14.1.1	Types d'objets . . . . .	404
14.1.2	Propriétés des modèles . . . . .	404
14.2	Modèles volumiques . . . . .	406
14.2.1	Énumération spatiale . . . . .	406

14.2.2	Constructive Solid Geometry . . . . .	409
14.3	Modèles surfaciques . . . . .	411
14.3.1	Utilisation de surfaces planes . . . . .	411
14.3.2	Utilisation de surfaces non planes . . . . .	412
14.4	Géométrie algorithmique . . . . .	416
14.4.1	Transformation d'un volume en surface . . . . .	416
14.4.2	Maillage polygonal d'un nuage de points . . . . .	417
14.4.3	Décimation de maillages . . . . .	421
14.5	Optimisation des modèles pour la réalité virtuelle . . . . .	424
14.5.1	Texturation . . . . .	425
14.5.2	Niveaux de détails . . . . .	426
14.6	Références bibliographiques . . . . .	428
<b>15</b>	<b>Comportements des objets du monde virtuel</b>	<b>431</b>
15.1	Introduction . . . . .	431
15.2	Modèles descriptifs . . . . .	432
15.2.1	Modèle . . . . .	432
15.2.2	Animation par keyframing . . . . .	432
15.2.3	Cinématique directe et inverse . . . . .	434
15.3	Modèles générateurs . . . . .	435
15.3.1	Modèle . . . . .	435
15.3.2	Rappels sur la mécanique des solides . . . . .	436
15.3.3	Mécanismes rigides articulés . . . . .	437
15.3.4	Simulation de systèmes déformables . . . . .	438
15.3.5	Discussion sur le rôle des modèles générateurs . . . . .	441
15.4	Modèles comportementaux . . . . .	442

---

15.4.1	Modèles de transformation internes . . . . .	443
15.4.2	Modèles de transformation externes . . . . .	446
15.5	Approche stimulus-réponse . . . . .	446
15.5.1	Les réseaux SAN . . . . .	446
15.5.2	Contrôle Stimulus-Réponse de créatures . . . . .	447
15.5.3	Sense Control Action . . . . .	448
15.5.4	Résumé . . . . .	449
15.6	Approche à base de règles . . . . .	449
15.6.1	Nuées, troupeaux et bancs . . . . .	449
15.6.2	Approche «écologique» . . . . .	450
15.6.3	In VitrAm . . . . .	450
15.6.4	Discussion . . . . .	451
15.7	Approche optimale . . . . .	452
15.8	Approche automate . . . . .	452
15.8.1	Automate d'états finis . . . . .	452
15.8.2	Piles d'automates . . . . .	453
15.8.3	Concurrence et hiérarchie : HPTS . . . . .	455
15.9	Autonomie sous contrôle : scénarios d'animation . . . . .	460
15.10	Cas particulier : le motion capture . . . . .	461
15.11	Références bibliographiques . . . . .	463

## **VII Aspects généraux de la réalité virtuelle 469**

### **16 Les effets sur l'homme des environnements 471**

16.1	Les effets sur l'homme des environnements naturels . . . . .	471
16.1.1	La lumière . . . . .	471

16.1.2	Le bruit . . . . .	471
16.1.3	La chaleur . . . . .	473
16.1.4	Le froid . . . . .	476
16.1.5	Les accélérations . . . . .	477
16.1.6	Les vibrations des solides et leurs effets généraux sur l'organisme humain	478
16.2	Les effets sur l'homme des environnements virtuels . . . . .	481
16.2.1	Les effets visuels . . . . .	481
16.2.2	Les effets musculo-squelettiques . . . . .	482
16.2.3	Cinétoses . . . . .	483
16.2.4	Effets psychologiques . . . . .	484
16.2.5	Facteurs influents . . . . .	486
16.2.6	Outils d'analyse des environnements virtuels et des effets de l'immersion	487
16.3	Références bibliographiques . . . . .	489
<b>17</b>	<b>Ethique, droit et réalité virtuelle</b>	<b>491</b>
17.1	Introduction . . . . .	491
17.1.1	Loi sur la protection des personnes se prêtant à des recherches biomédicales	491
17.1.2	Recommandations aux promoteurs et aux chercheurs . . . . .	492
17.1.3	Autorisation des lieux de recherches biomédicales sans bénéfice individuel direct . . . . .	493
17.2	Ethique et droit . . . . .	494
17.2.1	Perspectives juridiques et éthiques selon Huriet . . . . .	494
17.2.2	Ethique et droit en télé médecine . . . . .	494
17.3	Références bibliographiques . . . . .	495
	<b>Vocabulaire</b>	<b>497</b>



