

# Réalité Virtuelle : un contexte historique interdisciplinaire

J. Tisseau , A. Nédélec

Laboratoire d'Informatique Industrielle  
Ecole Nationale d'Ingénieurs de Brest  
BP 30815, F-29200 Brest cedex  
{tisseau,nedelec}@enib.fr

**Résumé :** *De la représentation d'“objets” de la réalité sur une surface bidimensionnelle à l'immersion d'utilisateurs coopérant dans un univers 3D numérique peuplé d'entités autonomes interactives et collaboratives, la réalité virtuelle a suivi de nombreuses évolutions. Le but de cet article est de faire un tour d'horizon du contexte historique duquel émerge le concept de réalité virtuelle, illustrant ainsi le dynamisme de l'informatique graphique. Mais il montre également que c'est au sein d'un véritable creuset interdisciplinaire que se forment cette nouvelle expression et ce nouveau champ d'investigation, qui bénéficient ainsi des apports conjoints de l'informatique graphique, de la simulation, de la conception assistée par ordinateur, de la téléopération, de l'audiovisuel, des télécommunications ... Ainsi, issue des travaux interdisciplinaires sur l'image numérique de synthèse, la réalité virtuelle transcende ses origines et s'affirme aujourd'hui comme une nouvelle discipline au sein des sciences de l'ingénieur. Elle concerne la spécification, la conception et la réalisation d'univers virtuels réalistes et participatifs.*

**Mots-clés :** Réalité Virtuelle, Infographie, CAO, Images de Synthèse, Modélisation Géométrique, Topologie, Rendu Réaliste, Animation Temps-Réel, Immersion Multisensorielle, Simulation Interactive, Environnements Virtuels Distribués

## 1 Introduction

L'expression anglo-saxonne *virtual reality* fut proposée pour la première fois en juillet 1989 lors d'un salon professionnel<sup>1</sup>, par Jaron Lanier, alors responsable de la société VPL Research spécialisée dans les périphériques d'immersion. Il forgea cette expression dans le cadre de la stratégie marketing et publicitaire de son entreprise, sans chercher à en donner une définition très précise.

Historiquement, la notion de réalité virtuelle apparaît au carrefour de différents domaines tels que l'informatique graphique, la conception assistée par ordinateur, la simulation, la téléopération, l'audiovisuel... Elle se développe ainsi dans un cadre pluridisciplinaire où l'informatique graphique y joue un rôle déterminant car, depuis la première interface graphique de Sutherland (Sketchpad [Sutherland 63]), elle s'est attachée à rendre de plus en plus réalistes les images numériques de synthèse qu'elle visualise sur les écrans d'ordinateurs. Aussi nous intéresserons-nous aux principaux développements de l'informatique graphique avant 1990 — époque à laquelle l'expression réalité virtuelle se popularise — à travers la construction des images (section 2), leur animation (section 3) et leur appropriation par les utilisateurs (section 4). La réalité virtuelle apparaîtra alors comme une discipline de synthèse au sein des sciences de l'ingénieur, discipline qui concerne la spécification, la conception et la réalisation d'univers virtuels réalistes et participatifs (section 5).

---

<sup>1</sup>Texpo'89 à San Francisco (USA)

## 2 La construction des images

### 2.1 De l'image 2D à l'image 3D

L'informatique graphique dut d'abord s'attaquer aux problèmes 2D tels que l'affichage des segments de droite [Bresenham 65], l'élimination des lignes cachées [Jones 71], la détermination des intersections de segments pour le coloriage des polygones [Bentley 79], les techniques d'anticrénelage [Pitteway 80] et la triangulation des polygones [Hertel 83].

Les bureaux d'études des industries aéronautiques et automobiles comprirent rapidement tout l'intérêt de ces techniques infographiques et les intégrèrent comme outils d'aide à la conception de leurs produits. Ainsi naquit la conception assistée par ordinateur (CAO) qui très vite ne se contenta plus des représentations filaires initiales, et introduisit les courbes et surfaces paramétriques dans ses systèmes [Bézier 77]. Ces surfaces paramétriques se manipulent aisément de manière interactive et autorisent le concepteur à imaginer des formes libres. Cependant, lorsque la forme de l'objet doit respecter des contraintes géométriques et physiques fortes, on leur préfère les surfaces implicites [Blinn 82] qui sont des isosurfaces d'un champ scalaire spatial prédéfini. La triangulation de ces surfaces permet ensuite d'aborder des problèmes physiques de plaques et de coques tant sous l'angle des simulations numériques (méthodes des éléments finis [Zinkiewicz 71]) que sous celui de la visualisation réaliste des résultats [Sheng 92].

Mais la modélisation surfacique s'avéra insuffisante pour garantir la cohérence topologique des objets modélisés. La modélisation volumique se développa alors à partir de deux types de représentation : la représentation par frontières et la représentation volumique.

La représentation par frontières modélise un objet par une surface polyédrique constituée de sommets, faces et arêtes. Ce type de représentation nécessite la prise en compte des relations d'adjacence entre faces, arêtes et sommets, donc de la topologie du modèle. La structure Arête-Ailée, définissant la topologie au niveau de l'arête, fut le premier modèle proposé (*winged-edge* [Baumgart 75]). Les extensions de ce modèle, comme les cartes topologiques (*n-G-maps* [Lienhardt 89]) permettent de créer des polyèdres orientés ou non (anneau de moebius, bouteille de Klein ...). D'autres structures, fondées sur les graphes et les hypergraphes, décrivent la topologie au niveau de la face (*Face Adjacency Graph* [Ansaldi 85]).

La représentation volumique consiste à décrire un objet ou une scène par un modèle constructif, construction d'un ensemble de points (CSG: *Constructive Solid Geometry* [Requicha 80]), ou descriptif, énumération spatiale (*octree* [Samet 84]) et partitionnement de l'espace (BSP: *Binary Space Partitioning* [Fuchs 80]). Le schéma de représentation CSG repose sur une structure d'arbre binaire dont les feuilles définissent des demi-espaces ou primitives bornées constituant un ensemble de points. Les nœuds de l'arbre définissent les transformations affines classiques et déformations éventuelles (torsion [Barr 84], déformations libres [Sederberg 86]) sur les deux sous-arbres ainsi que l'opération booléenne "régulière" entre les deux sous-ensembles de points, permettant de vérifier la cohérence volumique du modèle. La modélisation descriptive de type *octree* est l'extension 3D du modèle 2D *quadtrees*. Dans ce type de représentation, on définit un cube mémoire d'espace, analogue de la mémoire d'image, et une cellule élémentaire, le voxel, équivalent du pixel. Le traitement consiste à subdiviser récursivement l'espace en huit sous-cubes jusqu'à la cellule élémentaire, le voxel. La représentation BSP consiste à subdiviser l'espace englobant la scène, racine de l'arbre, en deux sous-régions séparées par un plan. Chaque nœud de l'arbre décrit une région et un plan de séparation de régions.

A partir de ces représentations structurées, l'élimination des parties invisibles (cachées) se scinde en deux grandes catégories [Sutherland 74], utilisant l'espace-image (BREPS, CSG) et l'algorithme du tampon de profondeur (*z-buffer* [Catmull 74]) ou travaillant directement sur l'espace-objet (*octree*, BSP) par détermination de régions vides, pleines, ou partiellement pleines.

Ainsi, grâce à des modèles géométriques et topologiques de plus en plus proches de la description des solides, les images filaires sont devenues surfaciques puis volumiques.

## 2.2 De l'image géométrique à l'image photométrique

Mais le réalisme visuel des objets ne se contente pas de la précision des formes : il lui manque entre autres la couleur, les textures [Blinn 76] et les ombres [Williams 78]. Aussi, l'informatique graphique se posa le problème de l'éclairage des objets par des sources lumineuses. Il fallut donc simuler la lumière depuis son émission jusqu'à sa réception au point d'observation en tenant compte des surfaces réfléchissantes qui composent la scène à éclairer. Du fait de la réciprocité du sens de parcours des rayons lumineux on diminuait le nombre de calculs en ne tenant compte que des rayons définissant la position d'observation et les pixels de l'écran. Les premiers modèles d'éclairage furent empiriques [Bouknight 70] et utilisaient des interpolations de couleurs [Gouraud 71] ou de normales aux faces [Phong 75]. Puis vinrent les méthodes fondées sur les lois physiques de la réflectivité [Cook 81]. Les phénomènes d'illumination indirecte des scènes, autrement dit des objets réfléchissant, émettant des rayons lumineux sur d'autres objets, y sont traités soit par un lancer de rayons [Whitted 80], soit par un calcul énergétique de radiosité [Cohen 85], soit en combinant ces deux méthodes [Sillion 89]. Du point de vue de l'observateur, une meilleure qualité du rendu visuel nécessita la prise en compte de la diffusivité du milieu ambiant [Klassen 87] ainsi que des principales caractéristiques des caméras [Kolb 95], y compris leurs défauts [Thomas 86].

Ainsi, de figuratives, les images de synthèse sont progressivement devenues plus réalistes en intégrant les lois de l'optique.

## 3 L'animation des images

### 3.1 De l'image fixe à l'image animée

Depuis ses débuts, le cinéma générait manuellement des séquences d'images pour produire ses dessins animés. L'arrivée des images numériques a permis d'envisager la génération automatique de ces séquences. Dans un premier temps, la réalisation d'une séquence d'animation numérique reposait sur la création d'images intermédiaires par interpolation entre des images-clés créées par l'animateur [Burtnyk 76]. L'interpolation, le plus souvent de type polynomiale cubique (spline) [Kochanek 84], porte sur des positions-clés de l'image affichée [Wolberg 90] ou sur des paramètres du modèle 3D de l'objet représenté [Steketee 85]. La prise en compte du paramètre temps dans l'interpolation définit alors une cinématique directe. La cinématique inverse permet au contraire de reconstituer automatiquement les trajectoires spatio-temporelles des constituants d'une chaîne cinématique [Girard 85], en donnant les positions extrêmes de la chaîne et des contraintes d'évolution. Mais ces techniques s'avèrent vite limitées pour reproduire certains mouvements complexes, en particulier les mouvements humains [Zeltzer 82]. Aussi, l'acquisition du mouvement réel sur des sujets humains équipés de capteurs de localisation électromécaniques [Calvert 82] ou optiques (caméras + réflecteurs) [Ginsberg 83] apparut-elle comme une alternative.

Mais toutes ces techniques ne reproduisent que des effets sans aucune connaissance *a priori* sur leurs causes. Des méthodes fondées sur des modèles dynamiques prirent alors en charge les causes pour en déduire les effets. Cette approche conduit le plus souvent à des modèles régis par des systèmes d'équations différentielles avec conditions aux limites, systèmes qu'il faut résoudre pour expliciter la solution qu'ils définissent implicitement. Différentes méthodes numériques de résolution furent ainsi adaptées à l'animation : les méthodes directes par approximations successives (de type Runge-Kutta) pour les systèmes rigides poly-articulés [Arnaldi 89], la discrétisation structurelle des objets par éléments finis plus appropriés pour les systèmes déformables [Gourret 89], ou encore la discrétisation structurelle et physique des systèmes par des réseaux de masses-ressorts permettant de modéliser une grande variété de systèmes [Luciani 85]. Les problèmes généraux de déformations élastiques [Terzopoulos 87] ou plastiques [Terzopoulos 88] furent abordés ainsi que celui de la détection de collisions entre solides [Moore 88]. Une attention particulière fut portée à l'animation de personnages humains considérés comme des squelettes articulés et traités par des techniques de dynamique

inverse [Isaacs 87]. En fait, l'animation d'acteurs virtuels cristallise sur elle toutes ces techniques d'animation [Badler 93] puisqu'elle s'intéresse aussi bien au squelette qu'aux formes [Chadwick 89], à la marche [Boulic 90] qu'à la préhension [Magenat-Thalmann 88], aux expressions faciales [Platt 81] qu'aux cheveux [Rosenblum 91], et même aux vêtements [Weil 86].

La cinématique et la dynamique permettent ainsi la génération automatique de séquences d'animation avec un rendu mécanique plus proche des comportements réels.

### 3.2 De l'image précalculée à l'image temps réel

Si, au début du 20<sup>ème</sup> siècle, les premiers simulateurs de vol étaient des simulateurs de vol aux instruments, sans visibilité, les images de synthèse permirent d'y introduire la vision, d'abord pour simuler les vols de nuit (points et segments en noir et blanc) puis les vols de jour (surfaces colorées avec élimination des faces cachées) [Schumacker 69]. Mais les simulateurs d'entraînement nécessitent des temps de réponse compatibles avec l'apprentissage du comportement réactif de l'appareil simulé. Or, les méthodes de rendu réaliste fondées sur les lois de la physique conduisent à des temps de calcul souvent très grands devant les temps de réponse attendus dans les simulateurs de vol. Aussi, dans les années 60-70, imagina-t-on des matériels spécifiques — les visuels<sup>2</sup> temps réel — pour accélérer les différents traitements de rendu. Ces générateurs d'images de synthèse temps réel, couplés à des calculateurs, furent peu à peu remplacés par des stations graphiques qui intégraient la génération et la gestion des structures de données sur un processeur à usage général et le rendu sur un processeur graphique spécialisé (SGI 4D/240 GTX [Akeley 89]). Corrélativement, on imagina réduire le nombre de facettes à afficher par des traitements effectués en amont du rendu graphique [Clark 76]. D'une part, les structures de données sous-jacentes permettent d'identifier, selon le point de vue de l'observateur, les objets situés en dehors du champ d'observation (*view-frustum culling*), les faces mal orientées (*backface culling*) et les objets occultés (*occlusion culling*), et donc de ne pas transmettre ces objets au moteur de rendu. D'autre part, plus un objet est situé loin de l'observateur, plus sa géométrie peut être simplifiée tout en gardant une apparence, sinon une topologie, satisfaisante pour l'observateur. Cette simplification du maillage, manuelle ou automatique, qui conduit à des niveaux de détails discrets ou continus, s'avéra particulièrement efficace dans le cas des modèles numériques de terrain largement utilisés dans les simulateurs de vol [Cosman 81].

Ainsi, grâce à des optimisations, à des artifices de calcul et à des dispositifs matériels plus adaptés, les images deviennent calculables en temps réel.

## 4 L'appropriation des images

### 4.1 De l'image contemplée à l'image vécue

Calculer l'image en temps réel, c'est autoriser la navigation au sein du monde virtuel qu'elle représente [Brooks 86a], mais c'est sans doute avec les expériences artistiques et les besoins de la téléopération que l'utilisateur commence vraiment à s'approprier les images.

L'art numérique interactif permet dans les années 70 d'expérimenter des situations où des images numériques évoluent grâce aux mouvements libres d'artistes qui observent, en temps réel, et sur grand écran, l'influence de leurs mouvements sur les images (VideoPlace [Krueger 77]). Avec les travaux de l'ACROE<sup>3</sup>, l'expression artistique assistée par ordinateur franchit une nouvelle étape avec la synthèse multisensorielle assistée d'un contrôle gestuel à retour d'effort [Cadoz 84]. Des

---

<sup>2</sup>La société *Evans et Sutherland* ([www.es.com](http://www.es.com)) créa les premiers visuels du commerce couplés à un calculateur PDP-11. Pour plusieurs millions de dollars, ils permettaient d'afficher quelques milliers de polygones par seconde. Aujourd'hui, une carte graphique GeForce3 pour PC ([www.nvidia.com](http://www.nvidia.com)) atteint des performances de l'ordre de quelques millions de polygones par seconde pour quelques milliers de francs.

<sup>3</sup>ACROE : Association pour la Création et la Recherche sur les Outils d'Expression, Grenoble ([www-acroe.imag.fr](http://www-acroe.imag.fr))

périphériques, appelés transducteurs gestuels rétroactifs, permettent, par exemple, de sentir dans ses doigts le frottement d'un archet réel sur une corde de violon virtuelle, d'entendre le son généré par la vibration de la corde, et d'observer la corde vibrer sur un écran. Un système de modélisation physique des objets virtuels, de type masses-ressorts, pilote ces périphériques (CORDIS-ANIMA [Cadoz 93]), et permet ainsi de vivre une expérience artistique tout à fait originale.

De son côté, la téléopération s'intéressa très tôt aux moyens de contrôler et de piloter à distance des robots situés en milieu hostile (nucléaire, sous-marin, spatial) afin de dégager l'opérateur humain des risques associés à de tels environnements. En particulier, la NASA développa un casque de visualisation à cristaux liquides (VIVED : *Virtual Visual Environment Display* [Fisher 86]) couplé à un capteur électromagnétique de localisation [Raab 79] qui permettait de se déplacer dans une image 3D observée en stéréovision. Il s'agissait là d'une réelle amélioration par rapport au premier visiocasque à tubes cathodiques, plus lourd, maintenu sur la tête par un bras mécanique fixé au plafond [Sutherland 68]. Ce nouveau casque fut très vite associé à un gant de données [Zimmerman 87] et à un système de son spatialisé fondé sur les lois de l'acoustique [Wenzel 88]. Ces nouvelles fonctionnalités vinrent ainsi renforcer les sensations des systèmes à retour tactile [Bliss 70] et à retour d'effort (GROPE [Batter 71, Brooks 90]) déjà connus des téléopérateurs. Les roboticiens parlèrent alors de télésymbiose [Vertut 85], de téléprésence [Sheridan 87] ou encore de télé-existence [Tachi 89], pour exprimer l'impression d'immersion que peut avoir l'opérateur, impression d'être présent sur les lieux de travail du robot alors qu'il le manipule à distance. L'insertion de l'opérateur dans la boucle du système robotisé posa alors, et ce dès le début de la téléopération, le problème de la prise en compte des facteurs humains pour améliorer l'ergonomie des postes de travail et des périphériques associés [Smith 89].

Ainsi devenue multimodale, l'image permet à l'utilisateur de voir, d'entendre, de toucher, de déplacer ou de déformer des objets virtuels avec des sensations proches de celles du réel.

## 4.2 De l'image isolée à l'image partagée

Au cours des années 70, se développa ARPANET<sup>4</sup>, premier réseau longue distance fondé sur le protocole TCP/IP<sup>5</sup> [Cerf 74]. Devant ces nouvelles possibilités d'échange et de partage d'informations, le ministère américain de la Défense décida l'interconnexion de simulateurs (chars, avions, . . .) à travers le réseau ARPANET afin de simuler des champs de batailles. Ainsi, pour le projet SIMNET (*simulator networking*), qui se déroula entre 1983 et 1990, il s'agissait de tester des stratégies de groupe librement exécutées par les dizaines d'utilisateurs en réseau, et non pas contrôlées par des scénarios préétablis [Miller 95]. Les protocoles de communication mis en place pour SIMNET [Pope 87] introduisirent des modèles prédictifs de mouvement (estime : *dead-reckoning*) afin de ne pas surcharger le réseau par des synchronisations trop fréquentes, tout en garantissant une cohérence temporelle entre les simulateurs. Ces protocoles furent ensuite repris et standardisés pour les besoins de la simulation interactive distribuée (DIS : *Distributed Interactive Simulation* [IEEE 93]).

Ainsi, les réseaux informatiques et les protocoles associés permettent de partager des images entre plusieurs utilisateurs, et à travers ces images, des idées et des expériences.

# 5 Des images réelles aux objets virtuels

## 5.1 Interdisciplinarité

Ce rapide tour d'horizon du contexte historique duquel émerge le concept de réalité virtuelle illustre d'abord le dynamisme de l'informatique graphique comme en témoignent également des

---

<sup>4</sup>ARPANET : *Advanced Research Projects Agency Network* du ministère américain de la Défense.

<sup>5</sup>TCP/IP : *Transmission Control Protocol/Internet Protocol*

manifestations comme le Siggraph<sup>6</sup> aux Etats-Unis et Eurographics<sup>7</sup> ou Imagina<sup>8</sup> en Europe. Mais c'est également au sein d'un véritable creuset interdisciplinaire que se forgent cette nouvelle expression et ce nouveau champ d'investigation, qui bénéficient ainsi des apports conjoints de l'informatique graphique, de la simulation, de la conception assistée par ordinateur, de la téléopération, de l'audiovisuel, des télécommunications ...

La réalité virtuelle apparaît ainsi comme une discipline de synthèse au sein des sciences de l'ingénieur. Elle manipule des images interactives, multimodales (3D, sonores, tactiles, proprioceptives), réalistes, animées en temps réel, et partagées sur les réseaux informatiques. En ce sens, elle constitue une évolution naturelle de l'informatique graphique. Au cours de la dernière décennie, un effort particulier fut porté sur l'intégration de toutes les caractéristiques de ces images au sein d'un même système<sup>9</sup>, et sur l'optimisation et l'amélioration de l'ensemble des techniques nécessaires à ces systèmes. La réalité virtuelle repose alors sur l'interaction en temps réel avec des objets virtuels et sur la sensation d'immersion dans les mondes virtuels; elle s'apparente à une interface multisensorielle [Burdea 93], instrumentale [Cadoz 94b] et comportementale [Fuchs 96]. A ce jour, les principaux travaux sur la réalité virtuelle ont permis de donner un sens plus précis et surtout plus opérationnel à l'expression *réalité virtuelle*, qui peut se résumer par cette définition du groupe de travail sur la réalité virtuelle<sup>10</sup> : *ensemble d'outils logiciels et matériels permettant de simuler de manière réaliste une interaction avec des objets virtuels qui sont des modélisations informatiques d'objets réels.*

## 5.2 Transdisciplinarité

Avec cette définition, on opère un changement de point de vue qui, de l'étude des images réelles en informatique graphique, passe à l'étude des objets virtuels qui sont visualisés. Les objets ne sont pas uniquement caractérisés par leurs apparences (leurs images), mais également par leurs comportements, dont l'étude ne relève plus spécifiquement de l'informatique graphique. Les images sont alors révélatrices de comportements autant que de formes. Ainsi, la réalité virtuelle devient transdisciplinaire et se détache progressivement de ses origines.

En 1992, D. Zelter proposait déjà d'évaluer les univers virtuels par rapport à trois notions de base : l'autonomie des objets visualisés, l'interaction avec ces objets, et la sensation de présence au sein du monde virtuel [Zelter 92]. Un univers donné est alors représenté par un point dans le repère AIP (autonomie, interaction, présence). Ainsi, dans ce repère, le cinéma 3D a pour coordonnées (0,0,1), le simulateur de vol (0,1,1), et Zelter plaçait la réalité virtuelle au point (1,1,1). Mais il faut bien reconnaître que le problème de l'autonomie des objets virtuels a été peu étudié jusqu'à présent. On peut cependant noter que l'animation, dite comportementale, introduisit quelques comportements autonomes avec les systèmes de particules [Reeves 83], les nuées d'oiseaux [Reynolds 87], les bancs de poissons [Terzopoulos 94], et bien sûr les humains virtuels [Thalman 99].

Un objet a un comportement considéré comme autonome, s'il est capable de s'adapter aux modifications non connues de son environnement : il doit ainsi être doté de moyens de perception, d'action, et de coordination entre perceptions et actions, pour pouvoir réagir de manière réaliste à ces modifications. Cette notion d'autonomie est au cœur de la problématique actuelle de la réalité virtuelle.

## 6 Conclusion

Issue des travaux interdisciplinaires sur l'image numérique de synthèse, la réalité virtuelle transcende ses origines et s'affirme aujourd'hui comme une nouvelle discipline au sein des sciences

<sup>6</sup>Siggraph ([www.siggraph.org](http://www.siggraph.org)) : 29<sup>ème</sup> édition en 2002

<sup>7</sup>Eurographics ([www.eg.org](http://www.eg.org))

<sup>8</sup>Imagina ([www.imagina.mc](http://www.imagina.mc)) : 21<sup>ème</sup> édition en 2002

<sup>9</sup>On trouvera dans [Capin 99] une comparaison d'un certain nombre de ces plateformes.

<sup>10</sup>GT-RV : Groupe de Travail Réalité Virtuelle du CNRS et du Ministère de l'Education Nationale de la Recherche et de la Technologie ([www.inria.fr/epidaure/GT-RV/gt-rv.html](http://www.inria.fr/epidaure/GT-RV/gt-rv.html)).

de l'ingénieur. Elle concerne la spécification, la conception et la réalisation d'univers virtuels réalistes et participatifs.

Un univers virtuel est un ensemble de modèles numériques autonomes en interaction, auquel l'homme participe en tant qu'avatar. La création de ces univers repose sur un principe d'autonomie selon lequel les modèles numériques sont (i) dotés de capteurs virtuels qui leur permettent de percevoir les autres modèles, (ii) possèdent des actionneurs pour agir sur les autres modèles, (iii) disposent de moyens de communication pour communiquer avec les autres modèles, et (iv) maîtrisent leurs coordinations perceptions-actions à travers un module de décision. Un avatar est alors un modèle numérique dont les capacités de décision sont déléguées à l'opérateur humain qu'il représente. Les modèles numériques, situés dans l'espace et dans le temps, évoluent ainsi de manière autonome au sein de l'univers virtuel, dont l'évolution d'ensemble est le résultat de leur évolution conjointe.

L'homme, modèle parmi les modèles, est à la fois spectateur, acteur et créateur de l'univers virtuel auquel il appartient. Il est en relation avec son avatar par l'intermédiaire d'un langage et de périphériques sensori-moteurs variés qui rendent possible la triple médiation des sens, de l'action et du langage. Le rendu multisensoriel de son environnement est celui, réaliste, des images numériques de synthèse : 3D, sonores, tactiles, proprioceptives, animées en temps réel, et partagées sur les réseaux informatiques.

## Références

- [Akeley 89] Akeley K., *The Silicon Graphics 4D/240 GTX super-workstation*, IEEE Computer Graphics and Applications 9(4):239-246, 1989
- [Ansaldi 85] Ansaldi S., De Florian L., Falcidieno B., *Geometric modeling of solid objects by using a face adjacency graph representation*, Proceedings Siggraph'85:131-139, 1985
- [Arnaldi 89] Arnaldi B., Dumont G., Hégron G., *Dynamics and unification of animation control*, The Visual Computer 4(5):22-31, 1989
- [Badler 93] Badler N.I., Phillips C.B., Webber B.L., *Simulating humans : computer graphics animation and control*, Oxford University Press, New York, 1993
- [Barr 84] Barr A.H., *Global and local deformations of solid primitives*, Computer Graphics 18:21-30, 1984
- [Batter 71] Batter J.J., Brooks F.P., *GROPE-1: A computer display to the sense of feel*, Proceedings IFIP'71:759-763, 1971
- [Baumgart 75] Baumgart B., *A polyhedral representation for computer vision*, Proceedings AFIPS'75:589-596, 1975
- [Bentley 79] Bentley J.L., Ottmann T.A., *Algorithms for reporting and counting geometric intersections*, IEEE Transaction on Computers 28(9): 643-647, 1979
- [Bézier 77] Bézier P., *Essai de définition numérique des courbes et des surfaces expérimentales*, Thèse d'Etat, Université Paris 6 (France), 1977
- [Blinn 76] Blinn J.F., Newell M.E., *Texture and reflection in computer generated images*, Communications of the ACM 19(10):542-547, 1976
- [Blinn 82] Blinn J.F., *A generalization of algebraic surface drawing*, ACM Transactions on Graphics 1(3):235-256, 1982
- [Bliss 70] Bliss J.C., Katcher M.H., Rogers C.H., Shepard R.P., *Optical-to-tactile image conversion for the blind*, IEEE Transactions on Man-Machine Systems 11(1):58-65, 1970

- [Bouknight 70] Bouknight W.J., *A procedure for generation of three-dimensional half-toned computer graphics presentations*, Communications of the ACM 13(9):527-536, 1970
- [Boulic 90] Boulic R., Magnenat-Thalmann N., Thalmann D., *A global human walking model with real-time kinematic personification*, Visual Computer 6(6):344-358, 1990
- [Bresenham 65] Bresenham J., *Algorithm for computer control of a digital plotter*, IBM System Journal 4:25-30, 1965
- [Brooks 86a] Brooks F.P., *Walkthrough : a dynamic graphics system for simulating virtual buildings*, Proceedings Interactive 3D Graphics'86:9-21, 1986
- [Brooks 90] Brooks F.P., Ouh-young M., Batter J.J., Kilpatrick P.J., *Project GROPE : haptic displays for scientific visualization*, Computer Graphics, 24(4):177-185, 1990
- [Burdea 93] Burdea G., Coiffet P., *La réalité virtuelle*, Hermès, Paris, 1993
- [Burtnyk 76] Burtnyk N., Wein M., *Interactive skeleton techniques for enhancing motion dynamics in key frame animation*, Communications of the ACM 19(10):564-569, 1976
- [Cadoz 84] Cadoz C., Luciani A., Florens J.L., *Responsive input devices and sound synthesis by simulation of instrumental mechanisms : the Cordis system*, Computer Music Journal 8(3):60-73, 1984
- [Cadoz 93] Cadoz C., Luciani A., Florens J.L., *CORDIS-ANIMA: a modeling and simulation system for sound and image synthesis - the general formalism*, Computer Music Journal 17(1):19-29, 1993
- [Cadoz 94a] Cadoz C., *Les réalités virtuelles*, Collection DOMINOS, Flammarion, Paris, 1994
- [Cadoz 94b] Cadoz C., *Le geste, canal de communication homme/machine : la communication instrumentale*, Technique et Science Informatiques 13(1):31-61, 1994
- [Calvert 82] Calvert T.W., Chapman J., Patla A.E., *Aspects of the kinematic simulation of human movement*, IEEE Computer Graphics and Applications 2:41-50, 1982
- [Capin 99] Capin T.K., Pandzic I.S., Magnenat-Thalmann N., Thalmann D., *Avatars in networked virtual environments*, John Wiley, New York, 1999
- [Catmull 74] Catmull E., *A subdivision algorithm for computer display of curved surfaces*, PhD Thesis, University of Utah (USA), 1974
- [Cerf 74] Cerf V., Kahn R., *A protocol for packet network interconnection*, IEEE Transactions on Communication 22:637-648, 1974
- [Chadwick 89] Chadwick J.E., Haumann D.R., Parent R.E., *Layered construction for deformable animated characters*, Computer Graphics 23(3): 243-252, 1989
- [Clark 76] Clark J.H., *Hierarchical geometric models for visible surface algorithm*, Communications of the ACM 19(10):547-554, 1976
- [Cohen 85] Cohen M.F., Greenberg D.P., *The hemi-cube : a radiosity solution for complex environment*, Computer Graphics 19(3):26-35, 1985
- [Cook 81] Cook R.L., Torrance K.E., *A reflectance model for computer graphics*, Computer Graphics 15(3):307-316, 1981
- [Cosman 81] Cosman M.A., Schumacker R.A., *System strategies to optimize CIG image content*, Proceedings Image II'81:463-480, 1981

- [Ellis 91] Ellis S.R., *Nature and origin of virtual environments : a bibliographic essay*, Computing Systems in Engineering 2(4):321-347, 1991
- [Fisher 86] Fisher S.S., MacGreevy M., Humphries J., Robinett W., *Virtual environment display system*, Proceedings Interactive 3D Graphics'86: 77-87, 1986
- [Fuchs 80] Fuchs H., Kedem Z., Naylor B., *On visible surface generation by a priori tree structures*, Computer Graphics 14(3):124-133, 1980
- [Fuchs 96] Fuchs P., *Les interfaces de la réalité virtuelle*, AJIIMD, Presses de l'Ecole des Mines de Paris, 1996
- [Gibson 84] Gibson W., *Neuromancer*, Ace Books, New York, 1984
- [Ginsberg 83] Ginsberg C.M., Maxwell D., *Graphical marionette*, Proceedings ACM SIG-GRAPH/SIGART Workshop on Motion'83:172-179, 1983
- [Girard 85] Girard M., Maciejewski A.A., *Computational modeling for the computer animation of legged figures*, Computer Graphics 19(3): 39-51, 1985
- [Gouraud 71] Gouraud H., *Continuous shading of curved surface*, IEEE Transactions on Computers 20(6):623-629, 1971
- [Gourret 89] Gourret J.P., Magnenat-Thalmann N., Thalmann D., *The use of finite element theory for simulating object and human skin deformations and contacts*, Proceedings Eurographics'89:477-487, 1989
- [Hertel 83] Hertel S., Mehlhorn K., *Fast triangulation of simple polygons*, Lecture Notes in Computer Science 158:207-218, 1983
- [Holloway 92] Holloway R., Fuchs H., Robinett W., *Virtual-worlds research at the University of North Carolina at Chapel Hill*, Computer Graphics'92, 15:1-10, 1992
- [IEEE 93] IEEE 1278, *Standard for Information Technology : protocols for Distributed Interactive Simulation applications*, IEEE Computer Society Press, 1993
- [Isaacs 87] Isaacs P.M., Cohen M.F., *Controlling dynamic simulation with kinematic constraints, behavior functions and inverse dynamics*, Computer Graphics 21(4):215-224, 1987
- [Jones 71] Jones C.B., *A new approach to the hidden line problem*, Computer Journal 14(3):232-237, 1971
- [Klassen 87] Klassen R., *Modelling the effect of the atmosphere on light*, ACM Transactions on Graphics 6(3):215-237, 1987
- [Kochanek 84] Kochanek D.H., Bartels R.H., *Interpolating splines with local tension, continuity, and bias control*, Computer Graphics 18(3):124-132, 1984
- [Kolb 95] Kolb C., Mitchell D., Hanrahan P., *A realistic camera model for computer graphics*, Computer Graphics 29(3):317-324, 1995
- [Krueger 77] Krueger M.W., *Responsive environments*, Proceedings NCC'77:375-385, 1977
- [Krueger 83] Krueger M.W., *Artificial Reality*, Addison-Wesley, New York, 1983
- [Lienhardt 89] Lienhardt P., *Subdivisions of surfaces and generalized maps*, Proceedings Eurographics'89:439-452, 1989
- [Luciani 85] Luciani A., *Un outil informatique de création d'images animées : modèles d'objets, langage, contrôle gestuel en temps réel. Le système ANIMA*, Thèse de Doctorat, INPG Grenoble (France), 1985

- [Magnenat-Thalmann 88] Magnenat-Thalmann N., Laperriere R., Thalmann D., *Joint-Dependent Local Deformations for Hand Animation and Object Grasping*, Proceedings Graphics Interface'88:26-33, 1988
- [Miller 95] Miller D.C., Thorpe J.A., *SIMNET : the advent of simulator networking*, Proceedings of the IEEE 83(8):1114-1123, 1995
- [Moore 88] Moore M., Wilhelms J., *Collision detection and response for computer animation*, Computer Graphics 22(4):289-298, 1988
- [Phong 75] Phong B.T., *Illumination for computer generated pictures*, Communications of the ACM 18(8):311-317, 1975
- [Pitteway 80] Pitteway M., Watkinson D., *Bresenham's algorithm with grey scale*, Communications of the ACM 23(11):625-626, 1980
- [Platt 81] Platt S., Badler N., *Animating facial expressions*, Computer Graphics 15(3):245-252, 1981
- [Pope 87] Pope A.R., *The SIMNET Network and Protocols*, Report 6369, BBN Systems and Technologies, 1987
- [Raab 79] Raab F.H., Blood E.B., Steiner T.O., Jones R.J., *Magnetic position and orientation tracking system*, IEEE Transaction on Aerospace and Electronic Systems 15(5):709-718, 1979
- [Reeves 83] Reeves W.T., *Particle systems : a technic for modelling a class of fuzzy objects*, Computer Graphics 17(3):359-376, 1983
- [Requicha 80] Requicha A.A.G., *Representations for rigid solids: theory, methods and systems*, ACM Computing Surveys 12(4):437-464, 1980
- [Reynolds 87] Reynolds C.W., *Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model*, Computer Graphics 21(4):25-34, 1987
- [Rosenblum 91] Rosenblum R.E., Carlson W.E., Tripp E., *Simulating the structure and dynamics of human hair : modelling, rendering and animation*, Journal of Visualization and Computer Animation 2(4):141-148, 1991
- [Samet 84] Samet H., *The quadtree and related hierarchical data structures*, ACM Computing Surveys 6(2):187-260, 1984
- [Schumacker 69] Schumacker R., Brand B., Gilliland M., Sharp W., *Study for applying computer-generated images to visual simulation*, Technical Report AFHRL-TR-69-14, U.S. Air Force Human Resources Lab., 1969
- [Sederberg 86] Sederberg T.W., Parry S.R., *Free-form deformation of solid geometric models*, Computer Graphics 20:151-160, 1986
- [Sheng 92] Sheng X., Hirsch B.E., *Triangulation of trimmed surfaces in parametric space*, Computer Aided Design 24(8):437-444, 1992
- [Sheridan 87] Sheridan T.B., *Teleoperation, telepresence, and telerobotics : research needs*, Proceedings Human Factors in Automated and Robotic Space Systems'87:279-291, 1987
- [Sillion 89] Sillion F., Puech C., *A general two-pass method integrating specular and diffuse reflection*, Computer Graphics 23(3):335-344, 1989
- [Smith 89] Smith T.J., Smith K.U., *The human factors of workstation telepresence*, Proceedings Space Operations Automation and Robotics'89:235-250, 1989
- [Steketee 85] Steketee S.N., Badler N.I., *Parametric keyframe interpolation incorporating kinetic adjustment and phrasing*, Computer Graphics 19(3):255-262, 1985

- [Sutherland 63] Sutherland I.E., *Sketchpad, a man-machine graphical communication system*, Proceedings AFIPS'63:329-346, 1963
- [Sutherland 68] Sutherland I.E., *A head-mounted three-dimensional display*, Proceedings AFIPS'68, 33(1):757-764, 1968
- [Sutherland 74] Sutherland I.E., Sproull R., Schumaker R., *A characterization of ten hidden-surface algorithms*, Computing Surveys 6(1):1-55, 1974
- [Tachi 89] Tachi S., Arai H., Maeda T., *Robotic tele-existence*, Proceedings NASA Space Telerobotics'89 3:171-180, 1989
- [Terzopoulos 87] Terzopoulos D., Platt J., Barr A., Fleischer K., *Elastically deformable models*, Computer Graphics 21(4):205-214, 1987
- [Terzopoulos 88] Terzopoulos D., Fleischer K., *Modeling inelastic deformation: viscoelasticity, plasticity, fracture*, Computer Graphics 22(4):269-278, 1988
- [Terzopoulos 94] Terzopoulos D., Tu X., Grzeszczuk R., *Artificial fishes: autonomous locomotion, perception, behavior, and learning in a simulated physical world*, Artificial Life 1(4):327-351, 1994
- [Thalmann 99] Thalmann D., Noser H., *Towards autonomous, perceptive and intelligent virtual actors*, Lecture Notes in Artificial Intelligence 1600:457-472, 1999
- [Thomas 86] Thomas S.N., *Dispersive refraction in ray tracing*, The Visual Computer 2(1):3-8, 1986
- [Vertut 85] Vertut J., Coiffet P., *Les robots, Tome 3 : téléopération*, Hermès, Paris, 1985
- [Weil 86] Weil J., *The synthesis of cloth objects*, Computer Graphics 20(4): 49-54, 1986
- [Wenzel 88] Wenzel E.M., Wightman F.L., Foster S.H., *Development of a three dimensional auditory display system*, Proceedings CHI'88:557-564, 1988
- [Whitted 80] Whitted T., *An improved illumination model for shaded display*, Communications of the ACM 23(6):343-349, 1980
- [Williams 78] Williams L., *Casting curved shadows on curved surfaces*, Computer Graphics 12(3):270-274, 1978
- [Wolberg 90] Wolberg G., *Digital image warping*, IEEE Computer Society Press, 1990
- [Zeltzer 82] Zeltzer D., *Motor control techniques for figure animation*, IEEE Computer Graphics and Applications 2(9):53-59, 1982
- [Zelter 92] Zelter D., *Autonomy, interaction and presence*, Presence 1(1):127-132, 1992
- [Zimmerman 87] Zimmerman T., Lanier J., Blanchard C., Bryson S., *A hand gesture interface device*, Proceedings CHI'87:189-192, 1987
- [Zinkiewicz 71] Zinkiewicz O.C., *The finite element method in engineering science*, Mc Graw Hill, New York, 1971
-