

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie d'Oran – Mohamed Boudiaf
Faculté des Mathématiques et Informatique
Département d'Informatique

Polycopié de cours
Réalité Virtuelle et Simulation

Préparé par : **Abdelkrim Mebarki**
Docteur en Informatique
Maître de Conférences
abdelkrim.mebarki@univ-usto.dz

Domaine : **Mathématiques et Informatique**
Filière : **Informatique**
Spécialité : **Imagerie et Vision Artificielle**
(Master académique – Semestre 3)

Polycopié validé par le Comité Scientifique du Département d'Informatique dans son procès-verbal du
21-11-2016

Table des matières

Table des matières.....	1
Chapitre 1. Introduction	3
1.1. La simulation informatique :.....	3
1.2. La réalité virtuelle :.....	3
Chapitre 2. Les principes technologiques de la réalité virtuelle	4
2.1. Les technologies cruciales pour la réalité virtuelle :	4
2.1.1. L’interface d’immersion :.....	4
2.1.2. Le rendu de l’affichage graphique :	4
2.1.3. Le système de suivi :.....	4
2.1.4. La base de données :.....	4
2.2. Les technologies auxiliaires pour la RV :.....	4
2.2.1. Le son synthétisé :.....	4
2.2.2. L’affichage synthétisé :.....	5
2.2.3. Les périphériques :.....	5
2.3. Finalités de la réalité virtuelle :.....	5
2.4. L’immersion ou état immersif :.....	5
2.5. Réalisation d’une application de RV.....	6
2.6. Historique de la RV	6
2.7. Matériels et interfaces :.....	7
2.7.1. Visiocasque ou casque immersif :.....	7
2.7.2. CAVE – Cave Automatic Virtual Environement :.....	7
2.7.3. Les gants numériques (Data Gloves) :.....	8
2.8. Domaines d’applications.....	8
2.9. Fondements théoriques pour les représentations 3D	8
2.9.1. Le graphisme (<i>Computer Graphics</i>) :.....	8
2.9.2. Les animations (<i>Computer Animations</i>) :	9
Chapitre 3. Gestion des données	10
3.1. Les types d’objets à modéliser.....	10
3.2. Les modes de représentations en 3D	10
3.2.1. Représentation géométrique	10
3.2.2. Représentation analytique des courbes.....	11
Chapitre 4. L’immersion visuelle :	13
4.1. L’immersion du regard :.....	13

4.2. Les interfaces visuelles à support fixe :	13
4.2.1. Les écrans monoscopiques :	13
4.2.2. Les écrans stéréoscopiques :	13
4.3. Les interfaces à support mobile :	15
Chapitre 5. L’immersion Haptique :	16
5.1. Les interfaces à retour d’effort :	16
5.2. Les interfaces à sensibilité cutanée :	16
5.2.1. Les interfaces à retour thermique :	17
5.2.2. Les interfaces à retour tactile :	17
Chapitre 6. L’ouïe ou l’immersion sonore :	18
6.1. Enregistrement et reproduction des sons 3D :	18
6.2. Synthèse des sons 3D :	18
6.3. Les systèmes sonores pour la RV :	19
6.4. Les périphériques du son :	19
Références bibliographiques :	21

I. INTRODUCTION

1.1. La simulation informatique :

La simulation informatique est la génération d'une version numérique¹ par ordinateur d'objets physiques ou symboliques du monde réel, comme la modélisation des molécules chimiques ou les courbes de croissance d'une population. Cette simulation peut être bidimensionnelle, tridimensionnelle ou plus (multimédia). La simulation couvre donc une vaste gamme de disciplines, allant des objets géométriques bidimensionnels simples, aux simulateurs de vols les plus complexes.

La simulation informatique désigne le processus de création de la version numérique lui-même, ainsi que le résultat de ce processus en même temps.

1.2. La réalité virtuelle :

La réalité virtuelle est une simulation informatique interactive, immersive, visuelle, sonore et/ou haptique², d'environnements réels ou imaginaires. Ce qui implique un contrôle dynamique des vues par l'utilisateur.

L'immersion peut être partielle (le cas d'un écran 2D ordinaire), ou totale (le cas des salles de projection et des visiocasques).

Cette immersion est réalisée par des interfaces comportementales qui sont des interfaces qui permettent d'exploiter un comportement humain. On y trouve deux types :

- **Les interfaces sensorielles** : Informent l'utilisateur par ses sens de l'évolution du monde virtuel (ex : écran).
- **Les interfaces motrices** : Informent l'ordinateur des actions motrices de l'utilisateur sur le monde virtuel (ex : gants de données).

La finalité de la réalité virtuelle est de permettre à une personne (ou à plusieurs) une activité sensori-motrice et cognitive dans un monde artificiel, créé numériquement, qui peut être imaginaire, symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel. Dans la suite de ce chapitre, nous allons définir la terminologie liée à la réalité virtuelle.

¹ Le terme « numérique » ici renvoi à tous ce qui est éligible par une machine. Cette éligibilité est souvent synonyme au fait que les données soient binaires, et donc numériques.

² Le terme « haptique » sera défini en détails plus loin dans ce polycopié, il renvoi au toucher, et à tout ce qui est contact physique avec la peau.

II. LES PRINCIPES TECHNOLOGIQUES DE LA REALITE VIRTUELLE

2.1. Les technologies cruciales pour la réalité virtuelle :

2.1.1. L'interface d'immersion :

C'est l'interface qui induit l'utilisateur dans un état immersif. Elle peut être soit visuelle, aurale ou haptique. Elle immerge l'utilisateur dans le monde virtuel, et bloque les impressions de contradiction du monde réel. Ces contradictions sont générées par les interférences entre la perception venue du monde virtuel, et les sensations imposées par la réalité. La finalité des interfaces immersives est de réduire ses interférences à zéro.

2.1.2. Le rendu de l'affichage graphique :

Nous pouvons attester avec certitude que toute interface de réalité virtuelle doit procurer un rendu graphique à l'utilisateur. La perception des sons et des touches, et par conséquent, l'interprétation associée sont souvent dépendantes du visuel. Ce rendu doit être à niveau avec la perception visuelle humaine réelle pour créer l'illusion du monde réel.

2.1.3. Le système de suivi :

Ce système sert à capturer et évaluer les déplacements de l'utilisateur (particulièrement sa tête et ses mains). Ce système définit ce que nous venons d'appeler précédemment le contrôle dynamique des vues par l'utilisateur. Le rendu visuel et sonore devient alors fonction de ce système de suivi.

2.1.4. La base de données :

La construction et la maintenance de la base de données est nécessaire pour l'affichage des détails et le maintien du monde virtuel. Comme nous allons le voir dans les chapitres suivants, le monde virtuel est modélisé et maintenu dans une base qui est interrogée au besoin pour construire les scènes.

2.2. Les technologies auxiliaires pour la RV :

Nous parlons ici de technologies de second plan dans la conception et la mise en place d'un système de réalité virtuelle. Ce sont des technologies dont un système de réalité virtuelle peut s'en passer en partie, mais leur mise en place permet une meilleure immersion du sujet dans le monde virtuel sur les différents plans : visuels, auditifs et haptiques.

2.2.1. Le son synthétisé :

La synthèse des sons permet la génération dynamique et en temps réel des sons et des effets sonores. Une bonne mise en scène sonore sans recours abusif aux pré-enregistrements est une valeur ajoutée à l'immersion du sujet dans le monde virtuel.

2.2.2. L'affichage synthétisé :

Le rendu graphique seul n'est pas suffisant à l'immersion totale s'il n'est pas associé avec une synthèse en temps réel. La synthèse graphique est souvent reliée à la simulation des forces et des mouvements des objets et de l'utilisateur à travers les différentes interactions.

2.2.3. Les périphériques :

La qualité des périphériques est nécessaire pour mieux adapter l'utilisateur au monde virtuel. Le périphérique en question doit être le moins encombrant possible, le plus confortable, et surtout, le plus performant en termes de temps de traitement et de réaction.

2.3. Finalités de la réalité virtuelle :

L'ingénieur est souvent confronté au dilemme suivant : soit tester virtuellement le futur produit à partir d'un modèle paramétrable, mais peut être irréaliste, soit évaluer un produit réel ou un prototype mais figé et peu paramétrable.

Dans les domaines professionnels, la CAO³ et la simulation de phénomènes physiques, les modèles sont étudiés virtuellement par l'intermédiaire de représentations numériques. Mais dans tous ces secteurs d'activité, l'utilisateur de ces mondes virtuels est spectateur ! Car il n'agit pas instantanément, ou très peu, sur ces entités numériques.

Les technologies de la réalité virtuelle apportent aux différents intervenants dans ces domaines la maîtrise en temps réel et ouvrent de nouvelles perspectives de conception et de mise en œuvre.

2.4. L'immersion ou état immersif :

La première composante dans la définition de la réalité virtuelle est l'immersion. L'immersion ou l'état immersif est un état psychologique où le sujet cesse (ou être emmené à cesser) de se rendre compte de son propre état physique (spatio-temporel). Cet état est fréquemment accompagné d'une intense concentration, d'une notion perturbée du temps et de la réalité.

L'immersion est réalisée sur trois axes : L'image, le son et l'haptique. Ce dernier est la clé d'une immersion totale et complète.

L'haptique désigne la science du toucher, par analogie avec acoustique ou optique. Ce terme est dérivé du grec *haptomai* qui signifie : Je touche. Au sens strict, l'haptique englobe le toucher et les phénomènes kinesthésiques (proprioception) qui désigne l'ensemble des récepteurs, voies et centres nerveux impliqués dans la perception, consciente ou non, de la position relative des parties du corps.

³ Conception Assistée par Ordinateurs

2.5. Réalisation d'une application de RV

Lorsque nous voulons concevoir une application de réalité virtuelle, nous parlons de reproduire seulement certains aspects du monde réel. Il est illusoire de vouloir simuler entièrement le monde réel concerné. Il est plus judicieux de réfléchir, au moment de la conception d'un dispositif de réalité virtuelle, pour savoir quels aspects doivent être simulés par rapport à l'objectif de l'application.

Il y a donc pour tout concepteur un travail de réflexion préliminaire sur ce qui devra être simulé. En d'autres termes, il faut définir le niveau d'abstraction désiré. L'abstraction consiste à partir d'un système réel complexe et compliquer, et arriver à un modèle réduit avec un nombre restreint d'information et de données.

Cette abstraction est fonction de l'objectif de l'application et de la finalité du produit ou du livrable.

La réalisation de toute application en réalité virtuelle implique deux problématiques générales :

- La première est la création informatique d'un monde virtuel avec lequel le sujet peut interagir en temps réel. L'interaction en temps réel est une contrainte très difficile à mettre en œuvre. Les recherches et les développements en informatique se font au niveau matériel et au niveau logiciel.
- La deuxième problématique est l'immersion et l'interaction efficaces d'un ou de plusieurs sujets dans le monde virtuel : l'interfaçage comportemental. Cela fait appel à des domaines bien différents : l'informatique, la physique des interfaces matérielles, la neurophysiologie pour les activités sensori-motrices de l'utilisateur, l'ergonomie et la psychologie pour l'immersion et l'interaction mentales du sujet.

Cette approche multidisciplinaire est incontournable, ceux qui l'ignorent risquent de mettre au point une superbe réalisation technique au niveau informatique mais qu'ils seront les seuls à pouvoir faire fonctionner !

2.6. Historique de la RV

La réalité virtuelle est étroitement liée à l'essor de l'informatique. Nous rappelons ici certaines étapes importantes dans son historique :

- Dans les années soixante, est créée une interface exploitant un comportement, un geste de l'homme : la souris. Cette interface montre pour la première fois à tous les utilisateurs que l'on peut communiquer avec un ordinateur autrement qu'avec un clavier, autrement que sous forme textuelle ! Il s'agit alors de la première interface comportementale.

- Dans les années soixante-dix, le premier casque immersif est réalisé par des chercheurs de l'université d'Utah⁴. Il permet une immersion visuelle dans un monde virtuel grâce à deux mini-écrans. Grâce à un capteur de localisation de la tête, quand on tourne celle-ci, les images correspondantes au point de vue de l'observateur sont affichées. Cette première approche montre qu'il est possible de s'immerger à l'intérieur d'un monde simulé. L'image de l'ordinateur (clavier, écran et unité centrale) disparaît des yeux de l'utilisateur.
- Au début des années quatre-vingt, le gant de données vient compléter ces nouvelles interfaces. Les mouvements de la main de l'opérateur, mesurés en temps réel, lui permettent de manipuler des objets virtuels.
- Plus tard dans les années quatre-vingt, la commercialisation de matériels et de logiciels spécifiquement dédiés à la réalité virtuelle démarre lentement et prudemment, malgré les dires des médias qui prévoient une envolée rapide des techniques de réalité virtuelle.
- Dans les années quatre-vingt-dix, les premiers développements de la réalité virtuelle voient le jour dans les centres de recherche et dans quelques grandes entreprises.

2.7. Matériels et interfaces :

2.7.1. Visiocasque ou casque immersif :

Appelé aussi HMD (Head Mounted Displayor – Helmet Mouted Display). C'est un casque couvrant la tête utilisant un ou deux petits écrans en face des yeux (monoculaire ou binoculaire). Cette interface est utilisée à la fois dans la réalité virtuelle et la réalité augmentée. Les *HMD* sont utilisées dans les domaines de sécurité, militaire, médecine, sport, et loisir.

La stéréovision est la technologie de base pour réussir une immersion visuelle. Elle consiste à ce que les images affichées devant chacun des deux écrans sont différentes mais se chevauchent par quelques degrés, pour permettre à l'utilisateur de percevoir l'image tridimensionnelle avec les reliefs et les dimensions géométriques.

2.7.2. CAVE – Cave Automatic Virtual Environement :

L'immersion est réalisée par projection d'images sur les murs et la terre –les projecteurs sont placés en dehors de la salle– : En utilisant des stéréo-lunettes qui procurent des images stéréo engendrées par l'ordinateur en temps réel, et des capteurs de mouvement de la tête,

⁴ Il s'agit d'Ivan Sutherland, avec l'aide de David Evans. Ils ont tous deux réalisés ce casque à l'Université du UTAH.

les projections sont adaptées suivant la marche libre de l'utilisateur dans la zone. Le son en 3D permet une immersion parfaite.

2.7.3. Les gants numériques (Data Gloves) :

Ce sont des dispositifs pour capter les mouvements de la main, et des doigts, pour adapter l'affichage des images. Ils permettent aussi le retour tactile sur les modèles les plus récents pour simuler les forces et les réactions du monde virtuel.

2.8. Domaines d'applications

Les applications de la RV sont nombreuses :

- Les formations et perfectionnements par.
- Les applications médicales et psychologiques.
- Les applications nucléaires.
- L'art numérique.
- Les jeux vidéo et les applications de loisir et de détente.
- La télé-immersion.
- La visualisation scientifique.
- La météorologie.
- L'astrophysique.
- La recherche fondamentale.
- L'architecture-urbanisme.
- La conservation du patrimoine culturel par la création de musée virtuels.
- Visites et présentations de musées et de sites virtuels.
- La reconstitution d'objets et de sites détruits ou endommagés.
- La création d'œuvres sonores.
- La sculpture d'objets virtuels.

2.9. Fondements théoriques pour les représentations 3D

La réalité virtuelle est à l'intersection de plusieurs disciplines. Dans son volet informatique, nous retrouvons plusieurs sous-spécialités intervenant dans l'élaboration d'un système de réalité virtuelle :

2.9.1. Le graphisme (Computer Graphics) :

Pour le rendu et l'affichage, l'informatique fait appel à des techniques et algorithmes développés et optimisés pour des cas d'utilisation précis et des machines dédiées. Le graphisme ou le *Computer Graphics* fait appel lui aussi à des bases théoriques que nous pouvons regrouper en trois volets :

- **Les mathématiques** : Dans les mathématiques, nous nous intéressons aux outils de la géométrie nous permettant de produire et transformer des objets, de manipuler des primitives et des positions. Ceci concerne :
 - **Les repères** : Ou les systèmes de coordonnées qui nous permettent de localiser les objets.
 - **Les transformations** : Modélisées souvent par des calculs vectoriels et matriciels. Exemple : Un triangle représenté par ses coordonnées, peut être translaté, déformé, suivant un vecteur, et par un calcul matriciel.
 - **Les projections** : C'est dans cette phase de visualisation où nous pouvons dessiner les objets 3D sur un écran 2D.
- **La modélisation 3D** : Ou comment représenter un objet tridimensionnel sur la machine ? Nous pouvons distinguer deux modes de modélisation :
 - **La représentation géométrique** : par des points, des lignes, et des faces. Exemple : triangles, tétraèdres... Avec ces primitives, nous pouvons approximer n'importe quelle surface ou volume.
 - **La représentation analytique des courbes** : Dans ce mode, les courbes et les surfaces sont représentées avec précision en tous points dans le domaine. Nous citons ici deux modèles de représentation : Le modèle paramétrique (Où les coordonnées euclidiennes sont fonctions d'un paramètre t $x=x(t)$ $y=y(t)$) ; Et le modèle non paramétrique (Où les coordonnées sont dépendant des axes $y=f(x)$).
- **Le rendu visuel** : Il s'agit ici du rendu final, où la gestion des couleurs, de la luminosité, des textures, et de tous les autres effets et performances de visualisation sont projetés sur écran.

2.9.2. Les animations (*Computer Animations*) :

Dans cette partie du travail, le concepteur développe les méthodes d'animation (en temps réel, image par image), le contrôle et la capture de mouvement, et la génération des mouvements par des procédures bien définies.

III. GESTION DES DONNEES

Dans un environnement virtuel, l'observateur évolue dans un monde qui est une représentation d'une partie de la réalité ou d'un environnement imaginaire.

Dans la plupart des cas, la représentation qui est exposée à l'observateur est en premier lieu visuelle. Cette représentation visuelle est construite par la projection d'un modèle géométrique tridimensionnel de l'environnement virtuel sur une ou plusieurs images planes bidimensionnelles par l'intermédiaire de caméras virtuelles dont le mouvement peut être lié à celui de l'observateur.

3.1. Les types d'objets à modéliser

Avant de modéliser des objets géométriques, il faut pouvoir répondre à la question : que cherche-t-on à modéliser ? Il est évident que la modélisation d'un solide indéformable est différente de celle d'un fluide compressible.

- L'objet le plus simple est bien sûr **le solide rigide non déformable**. Cet objet ne peut subir que des transformations solides $T = (R ; t)$, où R est une rotation dans l'espace et t une translation.

Les modèles non-rigides peuvent se décomposer quant à eux en plusieurs catégories :

- **Les solides articulés** : Ce sont des solides rigides indéformables reliés entre eux par des liaisons mécaniques (par exemple une liaison pivot) ;
- **Les solides déformables** dont les déformations suivent les lois de la mécanique (ou pas, dans un monde imaginaire) ;
- En dernier, nous avons **les modèles non-solides**, qui représentent tout ce qu'on ne peut pas associer à la notion d'objet.

3.2. Les modes de représentations en 3D

La modélisation 3D répond à la question : comment l'ordinateur représente un objet 3D en mémoire ? Plusieurs approches ont été développées pour représenter un modèle tridimensionnel sur ordinateur. Nous allons citer dans les paragraphes qui suivent les techniques les plus utilisées, et les plus citées dans la littérature.

3.2.1. Représentation géométrique

Ce type de représentation consiste à représenter les objets par des arrangements de sommets (points) dans un espace 3D. Il existe trois primitives de bases pour représenter un objet 3D, que nous appelons simplexes :

1. Les sommets, qui représentent géométriquement des points (Représentées par des triplets réels (x,y,z) dans un repère euclidien). Les sommets sont les simplexes d'ordre 0.

2. Les arêtes, qui représentent géométriquement des segments (Représentées par deux sommets $[s_1, s_2]$). Les arêtes sont des simplexes d'ordre 1.
3. Les facettes, qui représentent géométriquement des polygones (Représentées par une suite ordonnée de sommets $\{s_1, s_2, \dots\}$). Les facettes sont des simplexes d'ordre 2.
4. Les faces, qui représentent géométriquement des polyèdres (Représentées par une suite ordonnées de facettes $\{f_1, f_2, \dots\}$). Les faces sont des simplexes d'ordre 3.

3.2.2. Représentation analytique des courbes

La représentation analytique préserve la continuité des formes géométriques. La forme est alors définie en tout point ce qui lui confère les avantages suivants :

- Une précision absolue, par définition.
- Une représentation compacte : Le coût de stockage est optimal car il consiste uniquement en la formule et quelques transformations (comme les images en format vectoriel).
- Possibilité d'extrapolation : Un calcul simple des points intermédiaires peut se faire lorsque le nombre de points représentatifs de la forme n'est pas suffisant.

Nous distinguons deux types de représentations analytiques : paramétriques et non paramétriques :

a. La représentation paramétrique :

Dans les représentations paramétriques, les coordonnées de la forme (courbe, surface ou volume) sont des fonctions paramétrées sur un domaine de valeurs.

En Dimension 3, si t est le paramètre de la représentation, le vecteur de position d'un point donnée est défini comme suit :

$$P(t)=[x(t), y(t), z(t)]$$

Les bords de la forme (les extrémités de la courbe par exemple), ainsi que son étendu (sa longueur par exemple) sont définies par l'intervalle de définition du paramètre t .

Exemple : Equation paramétrique du cercle :

$$P(t) = [r \cdot \cos t, r \cdot \sin t], 0 \leq t \leq 2\pi$$

Où r est le rayon du cercle et t est le paramètre de la représentation associé à l'angle en radian dans le sens direct.

Cas des *splines*

Les *splines* sont un cas particulier de la représentation paramétriques des formes géométriques. Cette technique repose sur la définition d'un ensemble de points de contrôle, et d'un schéma d'interpolation pour engendrer la courbe.

Exemple : La courbe de *Bézier* d'ordre 2 et de degré 1 : En utilisant 2 points de contrôle :

$$P(t) = B_0 + (B_1 - B_0)t = (1 - t)B_0 + tB_1; 0 \leq t \leq 1.$$

Les courbes de *Bézier* sont caractérisés par :

- La courbe suit la forme du polygone formé par les points de contrôle, et contenu dans l'enveloppe convexe de celui-ci.
- Les extrémités de la courbe coïncident avec le premier et le dernier point de contrôle.
- Le premier et le dernier segment coïncide avec les vecteurs tangents des extrémités de la courbe (très important pour la continuité de la courbe).
- La courbe est transformée et ce, en manipulant juste les points de contrôle.

b. La représentation non paramétrique

Cette représentation correspond à la représentation explicite définie par l'une des coordonnées en fonction des autres :

$$y=f(x, z)$$

Par exemple : $y=a*x+b$, est l'équation d'une ligne droite où, pour chaque x , est définie une valeur pour y .

Dans ce type de représentations, nous avons également la représentation implicite définie par toute équation de la forme :

$$f(x, y, z)=0$$

Par exemple (une section conique):

$$ax^2 + 2bxy + cy^2 + 2dx + 2ey + f = 0$$

Comme nous pouvons le constater par les définitions des deux types de représentation, la représentation non paramétrique est dépendante des axes du repère alors que la représentation paramétrique ne l'est pas.

IV. L'IMMERSION VISUELLE :

L'utilisation du sens visuel est quasiment indispensable en réalité virtuelle. Les dispositifs n'exploitant pas la vision sont extrêmement rares. Le progrès informatique en termes de puissance de calcul et de traitement en temps réel a permis la génération d'images tridimensionnelles de plus en plus fines et de qualité. Les images photoréalistes sont de plus en plus proches des images réelles, et l'utilisation des interfaces visuelles autres que les écrans permettent des immersions complètes et totales.

4.1. L'immersion du regard :

Le but à atteindre dans un système de réalité virtuelle est que l'utilisateur voit toujours le monde virtuel là où il tourne la tête ou dévie le regard. C'est ce que nous appelons l'immersion du regard. Cette immersion peut être :

- Une immersion totale : Les mouvements pour lesquels la perception du monde virtuel est définie ne sont pas limités dans l'espace, le degré de liberté est maximal.
- Ou une immersion partielle : Les mouvements pour lesquels la perception du monde virtuel est définie sont limités dans l'espace.

Les interfaces visuelles sont conçues pour atteindre ces objectifs et arriver à réaliser l'immersion du regard souhaitée. Ces interfaces sont soit à support fixe ou à support mobile.

4.2. Les interfaces visuelles à support fixe :

Parmi les interfaces à support fixe nous pouvons citer :

- Les visiosalles (ou CAVE, voir section 2.7.2) constituées de salles dans lesquelles les images sont projetées sur les murs et le plafond. Les utilisateurs sont munis de lunettes différenciant les images de gauche et de droite pour permettre la stéréovision.
- Les visiobureaux qui sont des plans de travail pour l'ingénierie tridimensionnelle.
- Les écrans de différents types qui font l'objet de ce chapitre.

4.2.1. Les écrans monoscopiques :

Un écran d'ordinateur classique (monoscopique) est souvent utilisé pour différents domaines proches à celui de la réalité virtuelle : Jeux vidéo, CAO⁵, téléopération et télévirtualité. Mais sa capacité à produire une immersion de qualité reste restreinte ce par son incapacité à produire la vision tridimensionnelle nécessaire à la perception de la profondeur du monde virtuel.

4.2.2. Les écrans stéréoscopiques :

⁵ CAO : Conception assistée par ordinateur.

L'objectif souhaité dans ce type d'interfaces est de produire pour chaque œil une image différente de l'autre. L'écran doit alors séparer du signal deux images distinctes, cette séparation peut se faire à deux niveaux :

- Séparation au niveau de l'écran lui-même.
- Séparation au niveau des lunettes.

a. Ecran autostéréoscopique avec illumination :

L'écran autostéréoscopique avec illumination est un écran construit par deux plans superposés :

- Un premier plan constitué d'un écran à cristaux liquides ;
- Juste derrière ce premier plan : des fines colonnes illuminées séparées entre elles par des zones sombres (une colonne de lumière pour deux colonnes de pixels de l'écran à cristaux liquides).

Chaque colonne de lumière est espacée de telle façon qu'un observateur dans une bonne position voit celle-ci à travers la colonne paire de pixels avec son œil gauche, et à travers la colonne impaire de pixels avec son œil droit. Il reste à noter que les pixels ne sont visibles dans ce dispositif que s'ils sont éclairés.

b. Ecran autostéréoscopique à réseaux lenticulaire :

L'écran est couvert d'un réseau lenticulaire (un plan de lentilles demi-cylindriques d'axes parallèles aux colonnes de l'écran). Celles-ci ont des caractéristiques optiques qui impliquent que chaque œil de l'utilisateur voit des colonnes différentes de pixels, correspondant à deux images différentes.

Derrière chaque lentille cylindrique, on a pour chaque œil 1, 2 ou 4 colonnes de pixels. S'il y en a plusieurs, en déplaçant légèrement la tête, l'observateur voit la scène affichée en continu sous différents points de vue.

c. La séparation par différenciation colorimétrique :

C'est un procédé très ancien et bien connu utilisant des lunettes bicolores (procédé anaglyphe). Il permet facilement de créer sur un écran une vision stéréoscopique. Chaque œil ne voit qu'une des deux images de couleur différente, rouge et cyan (la couleur complémentaire du rouge), grâce à deux filtres sur la paire de lunettes.

d. La séparation par lunettes à obturateurs électroniques (Lunettes actives) :

Ces lunettes sont composées de deux écrans à cristaux liquides qui obturent alternativement 60 (ou 50) fois par seconde chaque œil, pendant que le moniteur affiche les images à la fréquence de 100 hertz.

Pour synchroniser les obturateurs avec l'affichage du moniteur, la synchronisation est transmise soit par un câble reliant les lunettes au moniteur (dispositif à faible coût), soit par des liaisons infrarouges (solution plus souple d'emploi).

e. La séparation par lunettes polarisantes (lunettes passives) :

Il y a deux techniques pour la polarisation au niveau de l'écran :

- **Le multiplexage temporel** : Devant le moniteur est placé un écran permettant une polarisation de la lumière différente dans le temps pour chaque couple d'images stéréoscopiques. Avec des lunettes ayant deux filtres ne permettant que la transmission de l'image désirée pour chaque œil, l'observateur voit les images en relief.
- **Le multiplexage spatial** : Alternativement une ligne sur deux de l'affichage est polarisée différemment. Avec une paire de lunettes polarisante, chaque œil ne voit qu'une ligne sur deux de l'écran correspondant à la bonne image stéréoscopique.

4.3. Les interfaces à support mobile :

Parmi les interfaces à support mobile, nous citons les visiocasques qui peuvent réaliser des immersions totales lorsqu'ils englobent le regard complet de l'utilisateur, ou des immersions partielles lorsqu'ils sont des simples visiolunettes ou des casques semi-transparents. Le diagramme suivant récapitule les spécifications techniques pour chaque contrainte exigée sur la performance des visiocasques :

V. L'IMMERSION HAPTIQUE :

La représentation du monde virtuel ne peut engendrer une immersion que lorsqu'elle est dynamique. Une représentation statique (impalpable et sans localisation de position ni retour d'information) ne peut offrir une interaction correcte. Nous avons à cet effet deux aspects à prendre en considération :

- Localiser la position et la posture de l'utilisateur par le système.
- Permettre l'action de l'utilisateur sur les objets du monde virtuel.

Dans ce chapitre, nous allons présenter les interfaces et les techniques permettant de réaliser cette interaction entre le monde virtuel et l'utilisateur dans les deux sens.

5.1. Les interfaces à retour d'effort :

Pour ce type d'interface, l'effort est appliqué sur les muscles pour transmettre une information globale sur les forces de contact entre elles et l'objet virtuel. Le but de ces interfaces à retour d'effort étant de :

- Appliquer des efforts variables sur la personne (la partie en contact avec le monde virtuel comme la main).
- Résister partiellement aux mouvements de la personne.
- Empêcher un mouvement de la personne.

Comme :

- Simuler le poids d'un objet virtuel tenu par la main ;
- Simuler l'enfoncement de la main dans un corps déformable ;
- Simuler un obstacle fixe virtuel sur le parcours de la main.

Les efforts sont donc transmis par contact : La loi de la statique entre l'action et la réaction impose que tout solide en contact avec le corps de l'utilisateur soit aussi en contact ailleurs.

5.2. Les interfaces à sensibilité cutanée :

Ce sont des interfaces qui procurent des stimuli tactiles, avec efforts répartis de faible intensité sur les parties du corps. Ces interfaces peuvent être utilisées isolément ou avec les interfaces à retour d'effort.

Ces interfaces informent l'utilisateur sur les effets du contact sous ses différentes formes :

- L'intensité des forces de contact et de glissement à la surface de contact ;
- L'aspect superficiel de l'objet :
 - la forme locale de sa surface, sa matière et sa texture.

Ces interfaces, quel qu'il soit leur type, sont composées de capteurs qui doivent stimuler localement des petites surfaces dont le total génère la sensation de la sensibilité réelle. Ces

interfaces doivent être également légers, petits et le moins encombrant possible pour ne pas entraîner de fatigue pour l'utilisateur.

5.2.1. Les interfaces à retour thermique :

Les sensations qui apparaissent lors d'un changement de température dépendent de la vitesse de changement, de l'étendue de la surface stimulée et de la température initiale. L'ordinateur commande une petite pompe à chaleur à effet Peltier pour simuler des variations de température.

5.2.2. Les interfaces à retour tactile :

Les interfaces à retour tactile sont des interfaces sensorielles qui permettent de stimuler la peau de la personne. Nous employons le terme retour car dans les applications de téléopération et de Réalité Virtuelle, les stimuli tactiles sont en général créés par l'ordinateur en retour à une action motrice de la personne.

a. Le retour tactile pneumatique :

L'air sous pression est fourni par un petit compresseur. La pression n'étant pas très élevée, cette interface procure des sensations de toucher et de pression sur la peau. En gonflant le ballon dans la paume de la main à plus haute pression (2 bars environ), on peut bloquer le mouvement de la main.

b. Le retour tactile à matrice d'aiguilles :

Une autre technique consiste à utiliser des plaquettes de matrices d'aiguilles qui sont actionnées par des fils en alliage à mémoire de forme et viennent à la rencontre des doigts. Ces fils en alliage de nickel et de titane (appelé aussi *Nitinol*) ont la particularité de se raccourcir quand on les monte en température, ce qui leur permet de prendre une forme mémorisée.

c. Le retour tactile à vibrations :

Pour un retour de vibrations, on peut employer des bobinages électriques, comme celles utilisées dans les haut-parleurs. En excitant ces bobines à une fréquence (100 à 250 Hz) avec amplitudes variables, on applique des vibrations à la peau. Ces bobines sont normalement en contact avec l'extrémité des doigts et ne donnent qu'une seule information homogène sur la peau. Les retours de vibrations peuvent servir à la simulation d'une pièce virtuelle en train de vibrer mais peuvent servir comme information symbolique. Elles demandent peu de puissance électrique. Néanmoins, elles sont bruyantes et relativement coûteuses.

VI. L'OUÏE OU L'IMMERSION SONORE :

Le son 3D est la clé pour produire un environnement de réalité virtuelle réaliste. Il joue différents rôles dans les environnements virtuels produisant ainsi :

- **Des informations complémentaires** : Les échos et les réflexions du son donnent des informations sur l'orientation des objets, leurs directions, et leurs distances, ainsi que les dimensions des environnements (les résonnances dans un grand amphithéâtre sont différents que celles dans un petit bureau). Les sons permettent aussi une bonne immersion dans l'espace : Ceux venus de l'extérieur du champ visuel décrivent des espaces non vus. Ils décrivent aussi les propriétés des objets dans le monde virtuel : Les sons diffèrent selon les natures des surfaces, et les caractéristiques physiques des objets.
- **L'interactivité de l'interface** : Les sons constituent une partie intégrante de tout système d'interfaçage homme-machine. Ils peuvent être des réponses à des commandes ou des alertes et avertissements du système ou de la scène virtuelle.
- **Modalité d'interaction alternative** : Les sons peuvent représenter également des canaux de représentation à part entière utilisant la reconnaissance vocale, et la synthèse des sons.

6.1. Enregistrement et reproduction des sons 3D :

Ils existent trois méthodes pour acquérir le son en vue de le reproduire dans les scènes virtuelles. Ces méthodes diffèrent de par leurs moyens et protocoles d'enregistrement :

1. **Enregistrement monaural** : En utilisant un seul microphone, sans aucune information sur la position du son.
2. **Enregistrement Stéréo** : utilisant deux microphones distants. L'information contient la position du son (direction et source qui sont généralement perçus dans la tête de l'auditeur !).
3. **Enregistrement binaural** : Cet enregistrement semble plus réel. Les microphones simulant les propriétés de capture des oreilles sont placés sur une tête imaginaire. Les sons sont filtrés par des HRTF⁶ pour générer des sons réalistes.

6.2. Synthèse des sons 3D :

La synthèse consiste à traiter le signal sonore pour produire des sons réalistes suivant les positions des sources, les dimensions des environnements, ainsi que les autres caractéristiques physiques. Cette synthèse doit respecter les contraintes techniques liées à

⁶ La fonction de transfert relative à la tête ou HRTF (Head-Related Transfer Function).

l'immersion comme le rendu en temps réel, la fidélité à l'amplitude et à la nature des sons, et le respect des propriétés physiques du temps et de l'espace.

a. Le rendu sonore :

Le rendu sonore est souvent utilisé pour accompagner les animations. Les sons généralement sont associés aux différents objets. Ces sons sont soit échantillonnés, soit générés artificiellement. Ce rendu considéré comme un pipeline à quatre niveaux :

1. Génération de chaque son associé à un objet séparément des contraintes de l'environnement ou de l'espace.
2. Association des sons aux mouvements des objets en tenant compte des distances et des propriétés de l'environnement.
3. Calcul des convolutions nécessaire à la description des sources sonores dans la scène.
4. Association des convolutions aux différentes sources sonores pour produire la scène sonore finale.

b. Approximation 3D : Cette approximation consiste vise à augmenter la perception de l'immersion, elle est résumée en quatre étapes :

1. Récolte des informations sur le trajet Source – Utilisateur (Milieu, obstacles).
2. Traiter les sons émis par des algorithmes simples, ou des effets sonores classiques.
3. Les écouteurs sont utilisés pour jouer le son final suivant la position de l'utilisateur en offrant le rendu en stéréo.
4. Positionnement des haut-parleurs : Dans les cas des systèmes de réalité virtuelle à faible coût.

6.3. Les systèmes sonores pour la RV :

Un système sonore pour la réalité virtuelle est un pipeline à différents niveaux satisfaisant certains critères dont nous citons les plus cruciales :

- a. Localisation 3D :** Calcul les positions des sources des sons virtuels correspondant aux objets virtuels associés.
- b. Simulation acoustique :** Pour percevoir les propriétés spatiales du monde virtuel comme les dimensions de la salle, et les propriétés de réflexion des murs.
- c. Temps de traitement :** Le compromis à gérer entre le réalisme des sons (tenant en compte les propriétés physique des matériaux), et le traitement en temps réel est très difficile à gérer.

6.4. Les périphériques du son :

L'implantation matérielle des sons peut être classifiée comme suit :

a. Playback :

- **Haut-parleurs** : mieux adaptés à CAVE, moins cher, mais sensibles aux réflexions et aux obstacles.
 - **Ecouteur (oreillettes)** : Contrôle spatial (deux sons différents), et le son est direct (pas de réflexion).
- b. Haut-parleurs multiples** : pour simuler l'ouïe naturelle : plusieurs sons, de différentes intensités, pour générer des sons « naturels ».

Références bibliographiques :

1. Stepping into Virtual Reality. Mario A. Gutiérrez A. - Frédéric Vexo - Daniel Thalmann. Springer 2008.
2. Artificial Life and Virtual Reality. Nadia Magnenat Thalmann - Daniel Thalmann. John Wiley and Son Lmt 1994.
3. Traité de la Réalité Virtuelle
4. Virtual Reality: The Revolutionary Technology of Computer-Generated Artificial Worlds - and How It Promises to Transform Society. Howard Rheingold. Simon & Schuster. 1992.
5. The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality. Jason Jerald. Morgan & Claypool Publishers. 2015.
6. La présence en réalité virtuelle : Une approche centrée utilisateur. Patrice Bouvier. Thèse de Doctorat. Université Paris-Est. 2009.
7. Réalité augmentée haptique : Théorie et Applications. Benjamin BAYART. Thèse de Doctorat. Université d'Evry-Val d'Essonne. 2007.
8. Structure de données compactes. Abdelkrim Mebarki. Thèse de Doctorat. Université de Nice-Sophia Antipolis. 2008.
9. Traité de la réalité virtuelle. Association Française de réalité virtuelle, augmentée, mixte et 3D. 2009.