

Techniques de Réalité Virtuelle

Abderrahmane Kheddar / David Roussel

UEVE / IIE-CNAM

kheddar@iup.univ-evry.fr / roussel@iie.cnam.fr

Réalité Virtuelle : définitions

- **virtuel, elle** *adjectif* [© Larousse]
(du latin *virtus*, force)
 1. Qui n'est qu'en puissance : potentiel, possible.
 2. Phys.– *Réalité virtuelle* : simulation d'un environnement réel par des images de synthèse.
- **Virtual Reality** [Jaron Lanier (VPL, 1987)]
 - *Littéralement* : qui fait office de réalité ≠ *Réalité Virtuelle*
- *Monde virtuel, de synthèse, dans lequel un individu peut évoluer et avec lequel il peut interagir, le tout en temps réel.* [Dictionnaire francophone de l'informatique]
- *Ensemble de techniques permettant de reproduire le plus fidèlement possible, par calcul temps réel, le comportement d'entités 3D en interaction entre elles [et avec le monde réel] composé entre autre d'un ou plusieurs utilisateurs exploitant de multiples canaux sensoriels* [Bruno Araldi (IRISA, 2002)]

Historique (origine)

Idée

*chercheur dans le domaine
du cinéma interactif ou 'total'*

Morton Heilig : Sensorama (1961)
Myron Krueger : Videoplace (1971)

Technologie

*Simulateur de vol (1975)
Ordinateur graphique
Ivan Sutherland (1973)*

Premier système

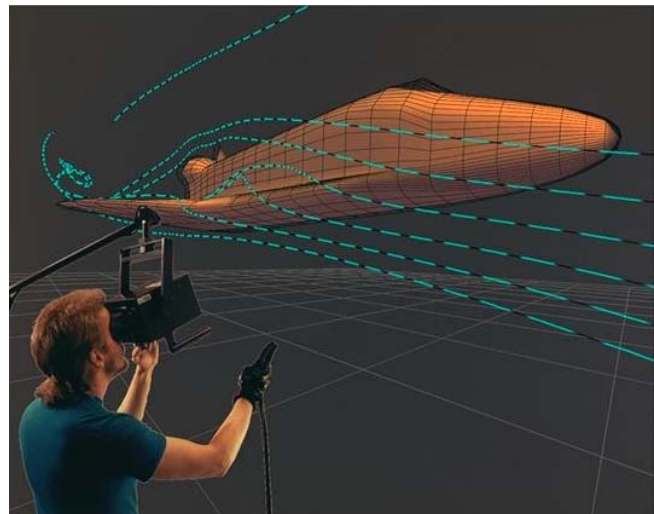
avec un HMD et scène graphique **NASA VIVED** (1981-83)
(Virtual Visual Environment Display)

addition d'un gant de donnée : **Jaron Lanier**, VPL (1987)

addition de son 3D : **Elisabeth Wenzel**, **NASA VIEW** (1988)
(Virtual Interface Environment Workstation)

3

Historique (produits obtenus)

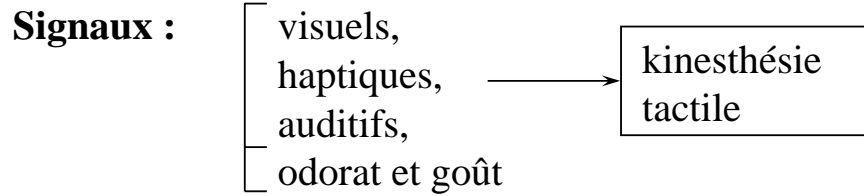


Notion d'immersion et d'interactivité : paradoxalement
l'immersion, dans ce cas, compromet l'interactivité.

4

En fait, le but est :

- Créer une scène **virtuelle** qui envoie à l'opérateur humain l'**ensemble** des signaux sensoriels émis par une scène **réelle** fonctionnellement équivalente



Notion d'*IMMERSION*

- Agir **dans** et **sur** la scène virtuelle

La scène doit réagir comme une scène réelle

Notion d'*INTERACTIVITE*

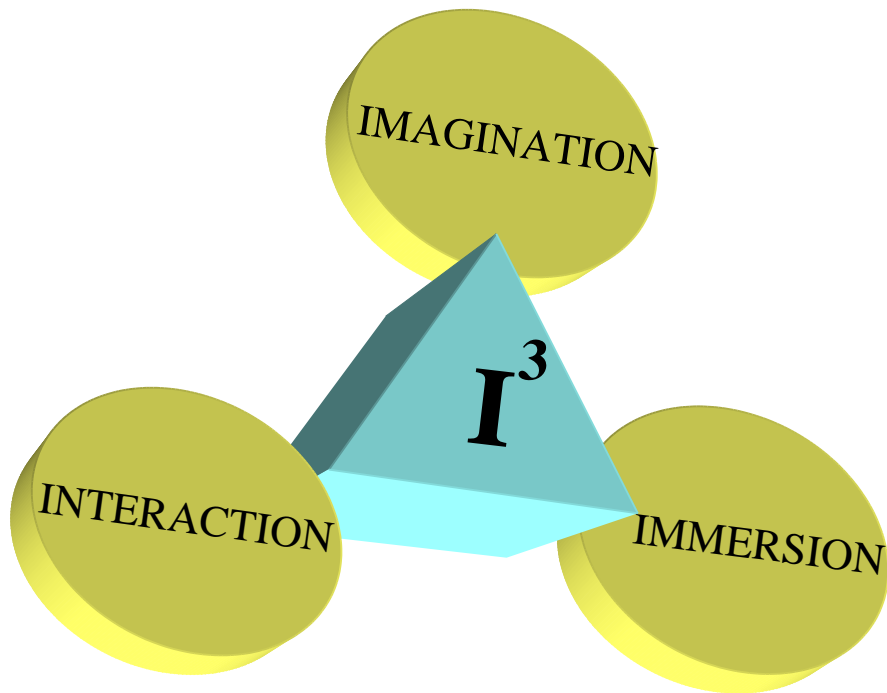
5

But scientifique

- Implanter sur ordinateur une
 - description
 - représentation } d'un environnement
- Qui peut être
 - affichée
 - exhibée
 - introduite } à l'homme
- De façon à ce que l'homme
 - [- pense
 - croie qu'il [est dans
- [fait partie d'
- un environnement [- réel
- [- physique

6

Le Triangle RV



7

Généralités

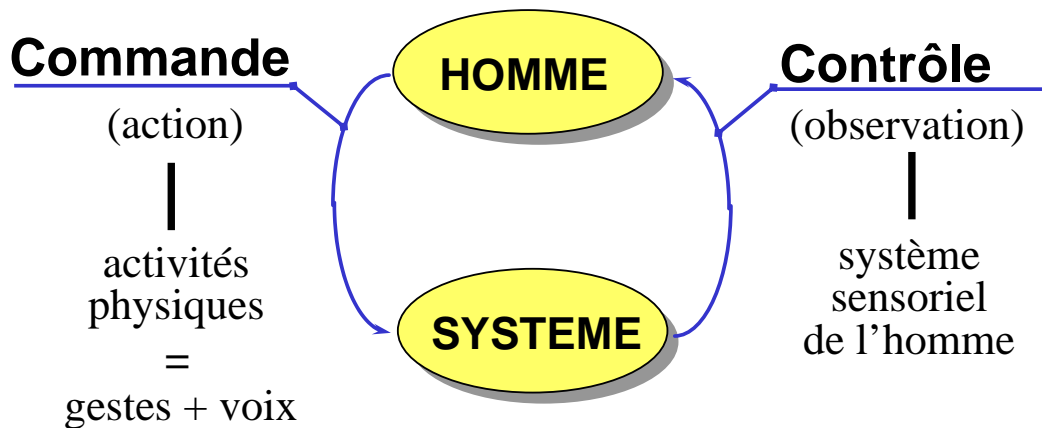
• Il y a deux parties distinctes :

- l'**HOMME**

à accepter tel quel ...

- le **SYSTEME**

à concevoir en fonction de l'homme ...



8

Il s'agit alors ...

- De créer un monde informatisé
 - qui peut **recevoir** les actions de l'homme
 - qui **réagit** comme un monde réel à ces actions
 - qui **transmet** les mêmes signaux de réactions à l'homme qu'un monde réel

- Deux questions de base se posent :

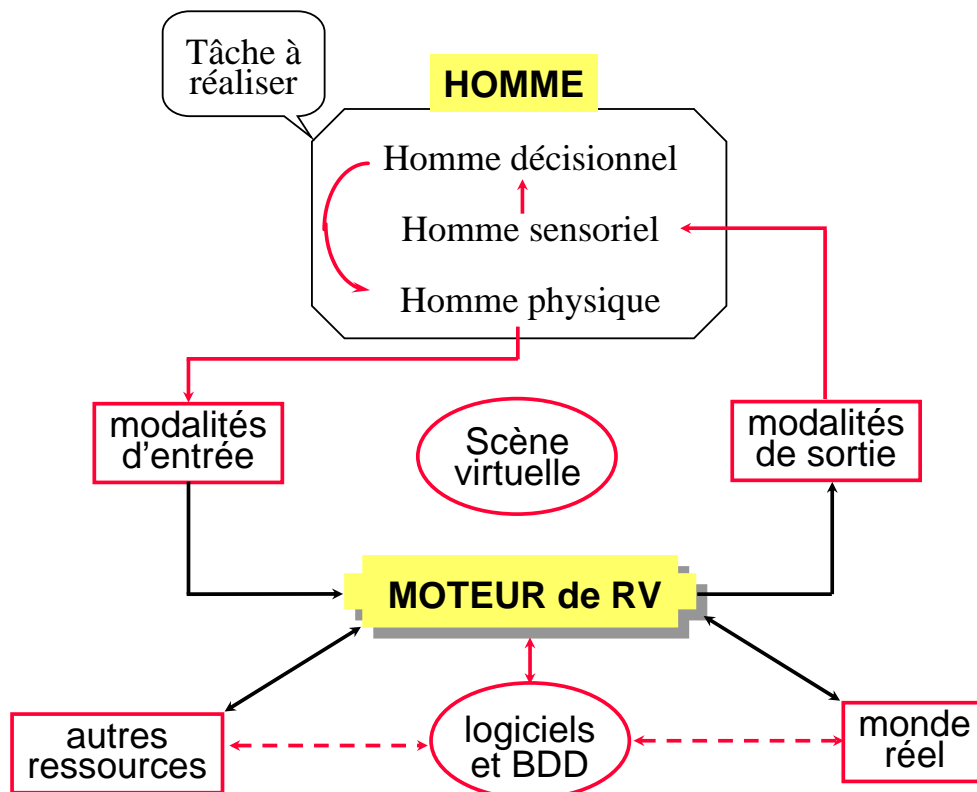
📁 Connaissons nous le système sensoriel humain
non mais ...

📁 Avons nous des ordinateurs assez puissants pour permettre ce challenge

non mais ...

9

Organisation d'un système de RV



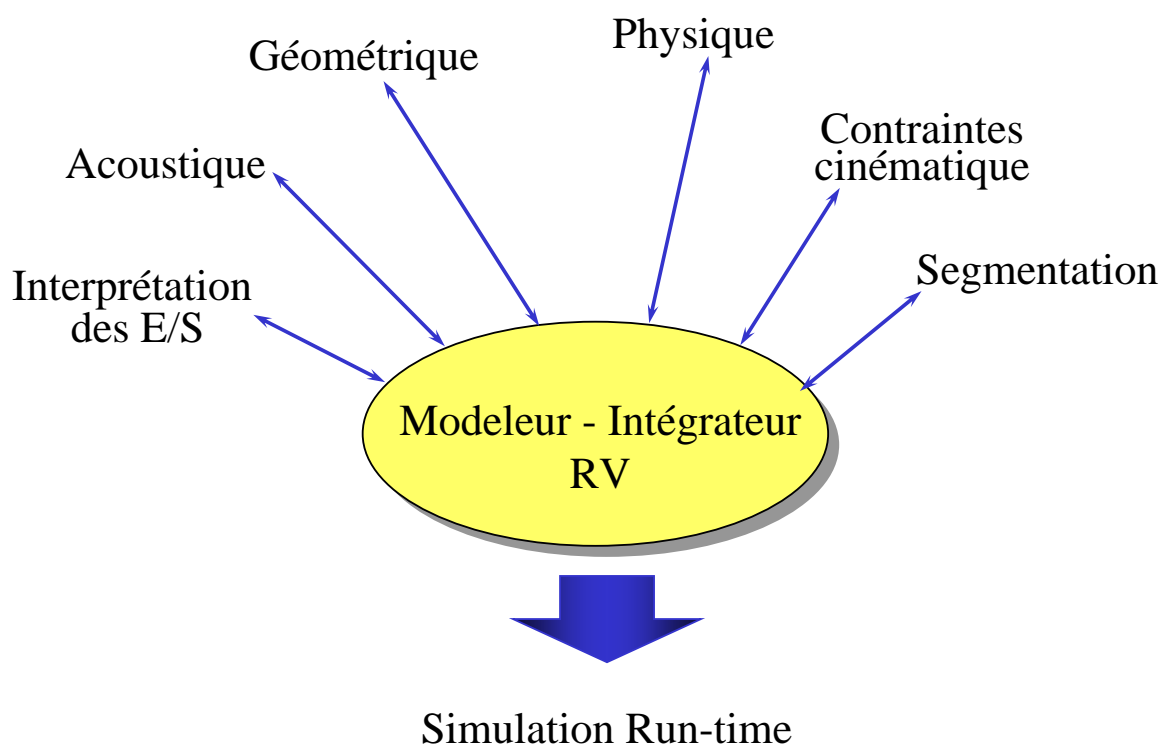
10

Logiciels et BDD

- Utilisés pour construire un modèle adapté de l'EV (hors-ligne)
- Ce modèle sera utilisé par le moteur de RV
 - *en temps réel*
 - *dynamiquement*
- afin de
 - *répondre aux instructions des modalités d'entrée*
 - *délivrer les bons signaux aux modalités de sortie*
- Les contraintes du modèle dépendent du
 - *choix des outils d'E/S*
 - *nature (type) des applications*

11

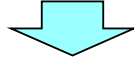
Construction et modélisation d'un EV



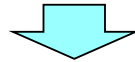
12

Construction et modélisation d'un EV (suite)

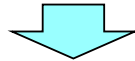
- Les modèles de RV → réalisme «statique»
- Le moteur de RV → réalisme «dynamique»



afin de respecter les temps de réaction de l'homme, le moteur de RV doit traiter un grand nombre d'information durant un petit laps de temps.



un des problème des moteurs de RV sont purement temps réel



travail sur l'architecture des ordinateurs et les algorithmes simplifiés (ou de simplification).

13

Méthodes d'immersion

• Immersion totale

L'opérateur avec tout son corps est censé se placer et se mouvoir à l'intérieur de la scène virtuelle

• Immersion partielle

L'opérateur est censé regarder la scène comme à travers une fenêtre, mais pouvoir y agir avec sa main ou un outil (pêche à la ligne par exemple !)

Ce choix induit des caractéristiques différentes pour les interfaces homme - monde virtuel.

14

Qu'en attendre au plan général ?

- Une véritable convivialité dans la relation homme-machine
- Un accroissement de la qualité/fiabilité de :
 - la simulation
 - la conception
 - le contrôlede systèmes
- La possibilité de maîtriser des systèmes plus complexes que ceux traités par des moyens classiques

15

RV : une technologie générique

- La RV est une technologie horizontale qui peut s'insérer partout dès qu'on fait appel à une simulation graphique.

Exemples: **Mieux simuler (interactivement) pour mieux**

Entraîner :	(pilotage, sport, gestes professionnels, etc.)
Enseigner :	(physique, anatomie, etc.)
Comprendre :	recherche : (comportement matériaux, fluides, syst. complexes, etc.)
Concevoir/Créer	des produits (nouvelles molécules)
	des procédés
	des missions (espace, fonds marins, nucléaire, etc.)
	des constructions (génie civile, architecture, etc.)
	des spectacles ...
Gérer :	des biens, des personnes, des armées, etc.
Divertir :	soi même, ou plusieurs personnes.

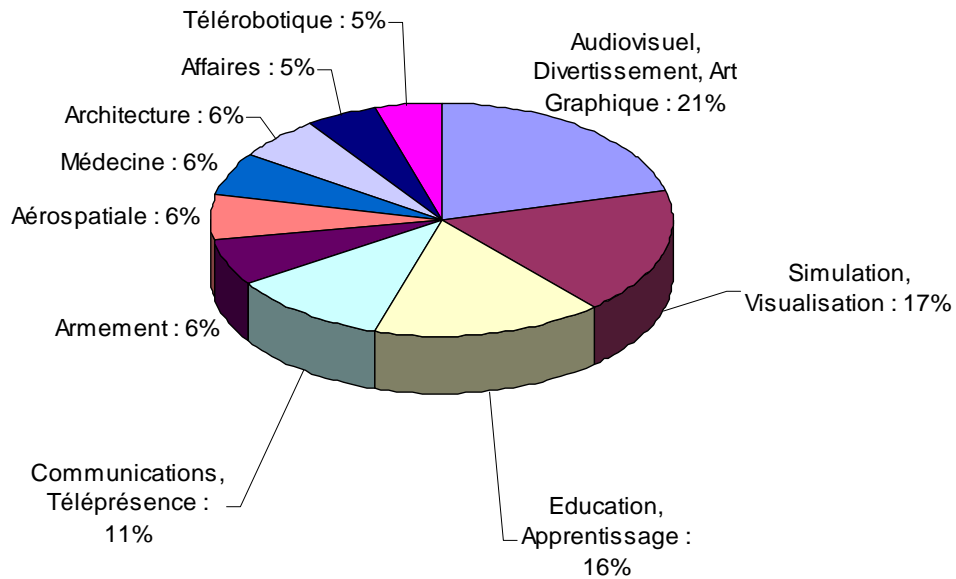
Communiquer : télécom, réseaux, échange de signaux sensoriels, etc.

Commande/Contrôle : télé-travail, réalité-augmentée, etc.

16

Données statistiques

Répartition des projets en RV

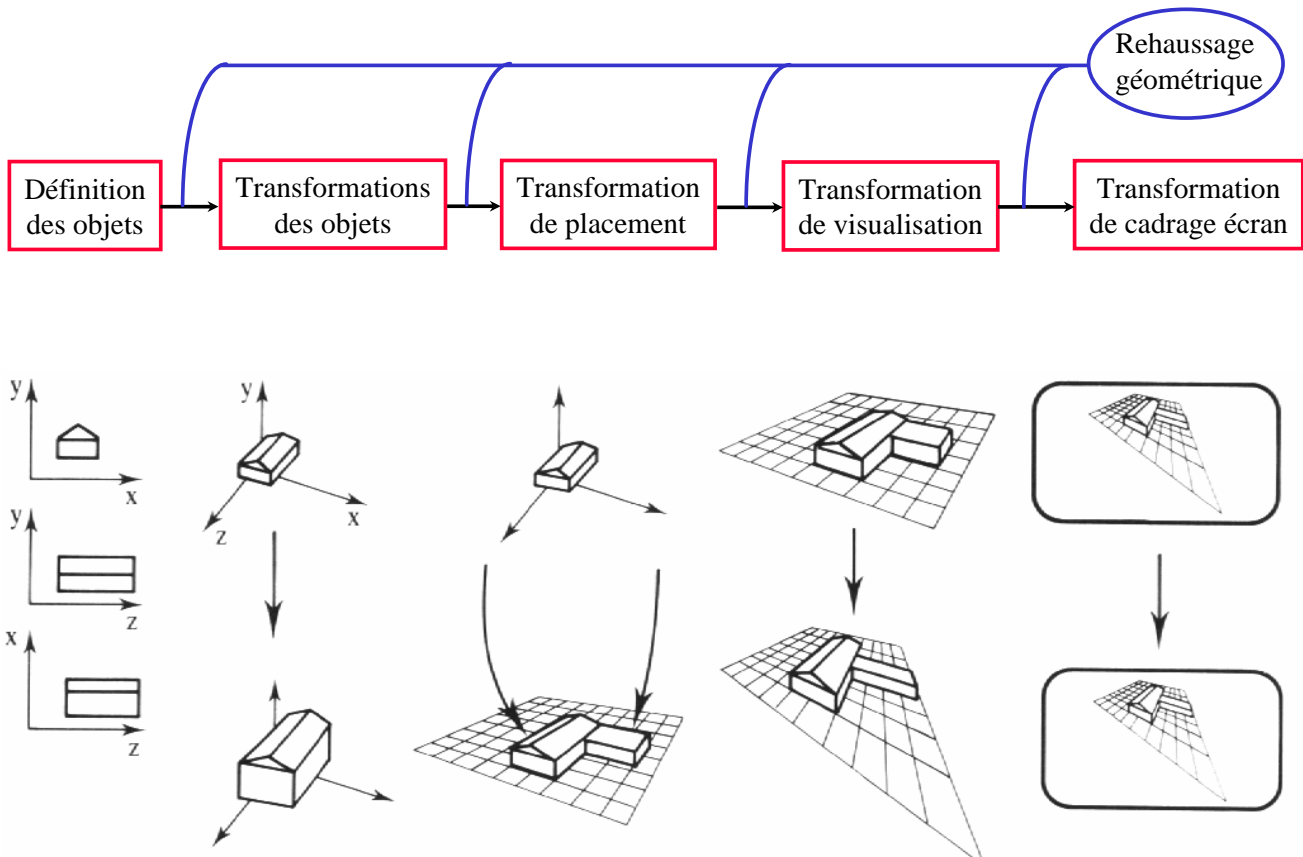


Helsel et Doherty 1993

17

Modélisation et retour visuel

Processus de représentation d'objets virtuels



Matrices de transformations

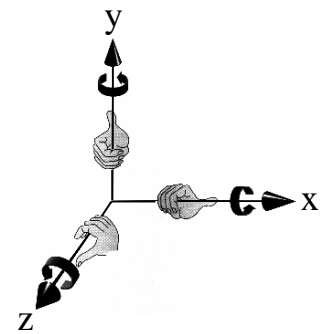
- Translation : $T(d_x, d_y, d_z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d_x \\ 0 & 1 & 0 & d_y \\ 0 & 0 & 1 & d_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

- Facteur d'échelle : $S(s_x, s_y, s_z) = \begin{bmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

- Rotations : $R_x(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $R_y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$, $R_z(\psi) = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & 0 & 0 \\ \sin \psi & \cos \psi & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$

$$R(U, \theta) = \begin{bmatrix} u_x^2 + \cos \theta(1 - u_x^2) & u_x u_y(1 - \cos \theta) - u_z \sin \theta & u_x u_z(1 - \cos \theta) + u_y \sin \theta & 0 \\ u_x u_y(1 - \cos \theta) + u_z \sin \theta & u_y^2 + \cos \theta(1 - u_y^2) & u_y u_z(1 - \cos \theta) - u_x \sin \theta & 0 \\ u_x u_z(1 - \cos \theta) - u_y \sin \theta & u_y u_z(1 - \cos \theta) + u_x \sin \theta & u_z^2 + \cos \theta(1 - u_z^2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; U = \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix}$$

- Cisaillement : $SH_{xy}(sh_x, sh_y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & sh_x & 0 \\ 0 & 1 & sh_y & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$



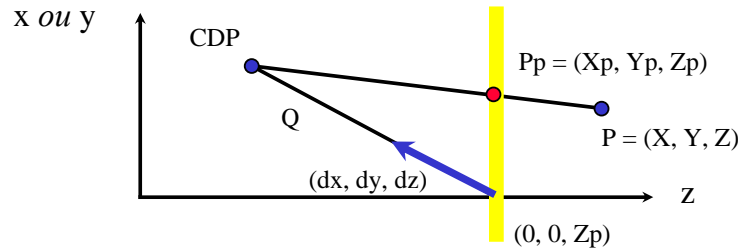
Matrices de transformations (suite)

• Ratio entre les axes

$$\begin{pmatrix} 1 & C_{XY} & C_{XZ} & 0 \\ C_{YX} & 1 & C_{YZ} & 0 \\ C_{ZX} & C_{ZY} & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

• Projection

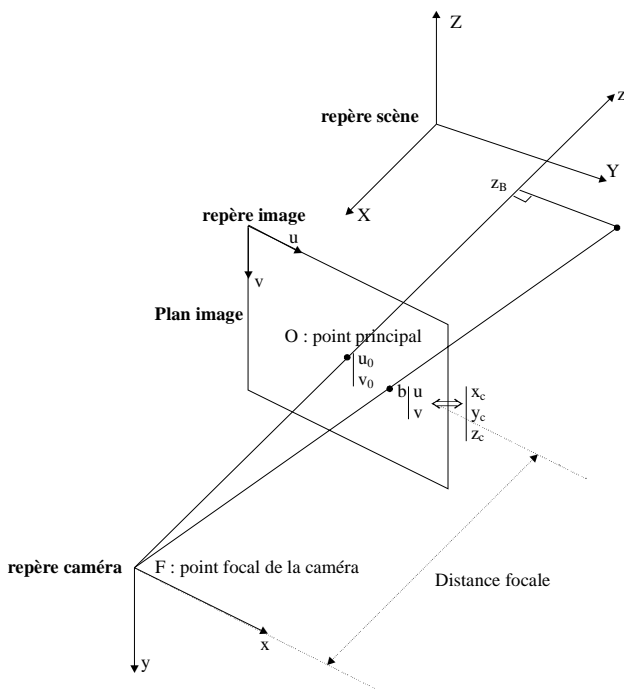
$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & -\frac{d_x}{d_z} & z_p \frac{d_x}{d_z} \\ 0 & 1 & -\frac{d_y}{d_z} & z_p \frac{d_y}{d_z} \\ 0 & 0 & -\frac{z_p}{Qd_z} & \frac{z_p^2}{Qd_z} + z_p \\ 0 & 0 & -\frac{1}{Qd_z} & \frac{z_p}{Qd_z} + 1 \end{pmatrix}$$



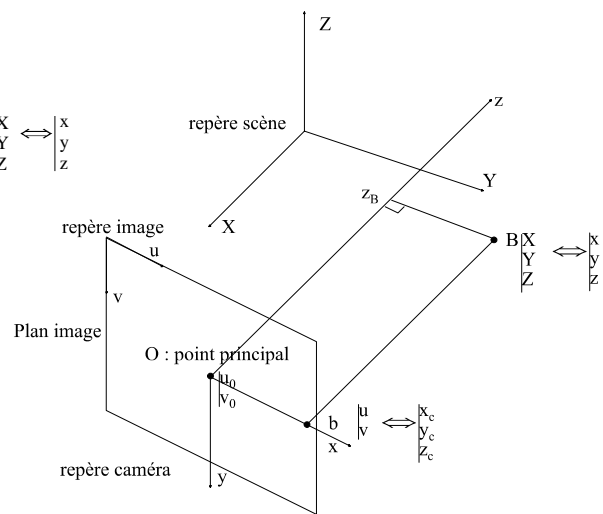
	Zp	Q	[dx	dy	dz]
• P. Orthographique	0	∞	[0	0	-1]
• P. Perspective	d	d	[0	0	-1]
• P. Perspective (autre)	0	d	[0	0	-1]
• P. Cavalière	0	∞	[sin(α)	cos(α)	-1]
• P. Cabinet	0	∞	[sin(α)/2	cos(α)/2	-1]

Modèles de projection

• Projection perspective



• Projection orthographique



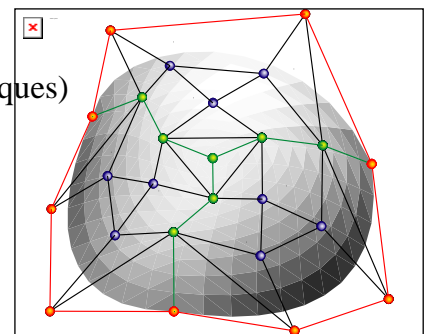
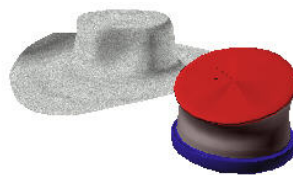
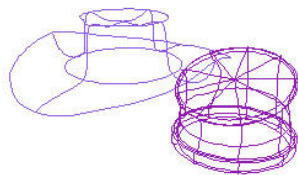
Représentations géométriques

- Modéliser la surface des objets
 - B-Rep : Boundary Representation
 - Rendu : simple car implémenté en hardware*
 - Intersection de surfaces : complexe
- Modéliser le volume des objets
 - Voxels
 - Rendu : nécessite de recalculer une surface
 - Intersection de volumes : simple

* : les formes discrètes seulement 23

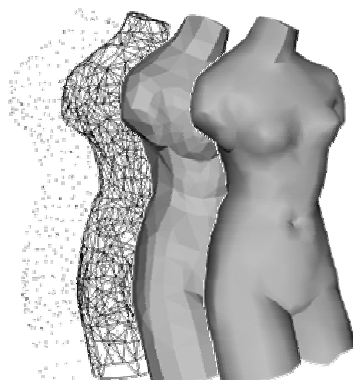
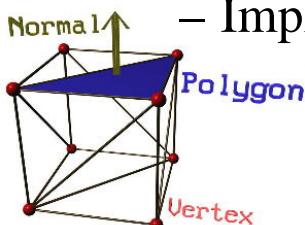
Représentations B-Rep

- Représentations continues
 - Surfaces paramétriques (bi ou tri-paramétriques)
 - Bézier, Spline, NURBS, etc ...



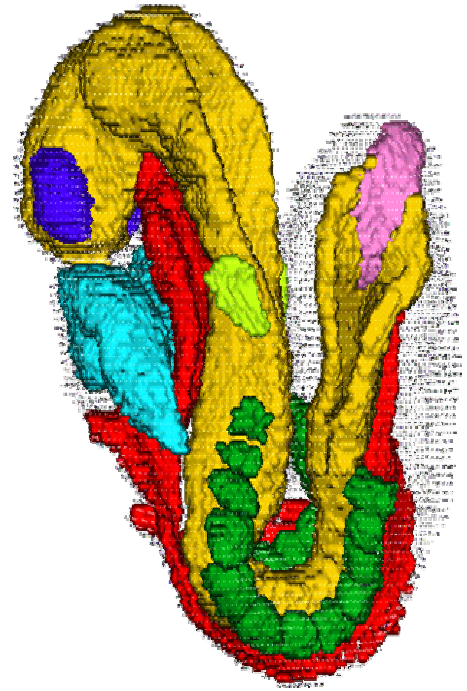
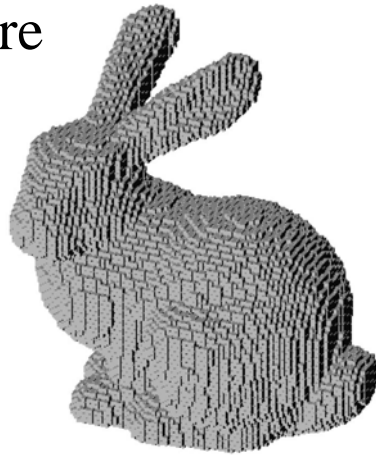
- Concision : équation, ou réseau de points de contrôle
- Complexité de calcul

- Représentations discrètes
 - Implémentation hardware



Représentation voxel

- Représentation discrète
- Interrogation simplifiée
- Taille importante des données
- Mal adapté au rendu hardware



25

Modélisation géométriques des objets virtuels

- Représentation analytique des surfaces :
équations d'ellipsoïdes, β -splines etc ...

Exemple : les superquadriques

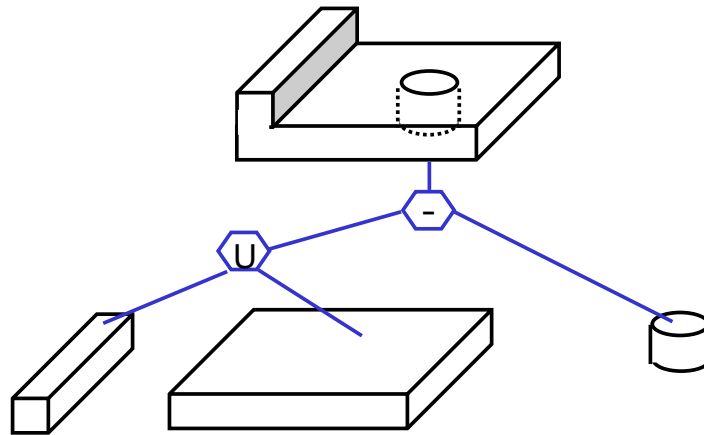
$$S(\theta, \varphi) = \begin{pmatrix} a_1 \cos(\varphi)^{\varepsilon_1} \cos(\theta)^{\varepsilon_2} \\ a_2 \cos(\varphi)^{\varepsilon_1} \sin(\theta)^{\varepsilon_2} \\ a_3 \sin(\varphi)^{\varepsilon_1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} \begin{cases} -\frac{\pi}{2} \leq \varphi \leq \frac{\pi}{2} \\ -\pi \leq \theta \leq \pi \end{cases}$$

- Modèle polyédrique (affichage graphique) :
sommets, arêtes, facettes

26

Modélisation géométriques : hiérarchisation

- CSG Constructive Solid Geometry

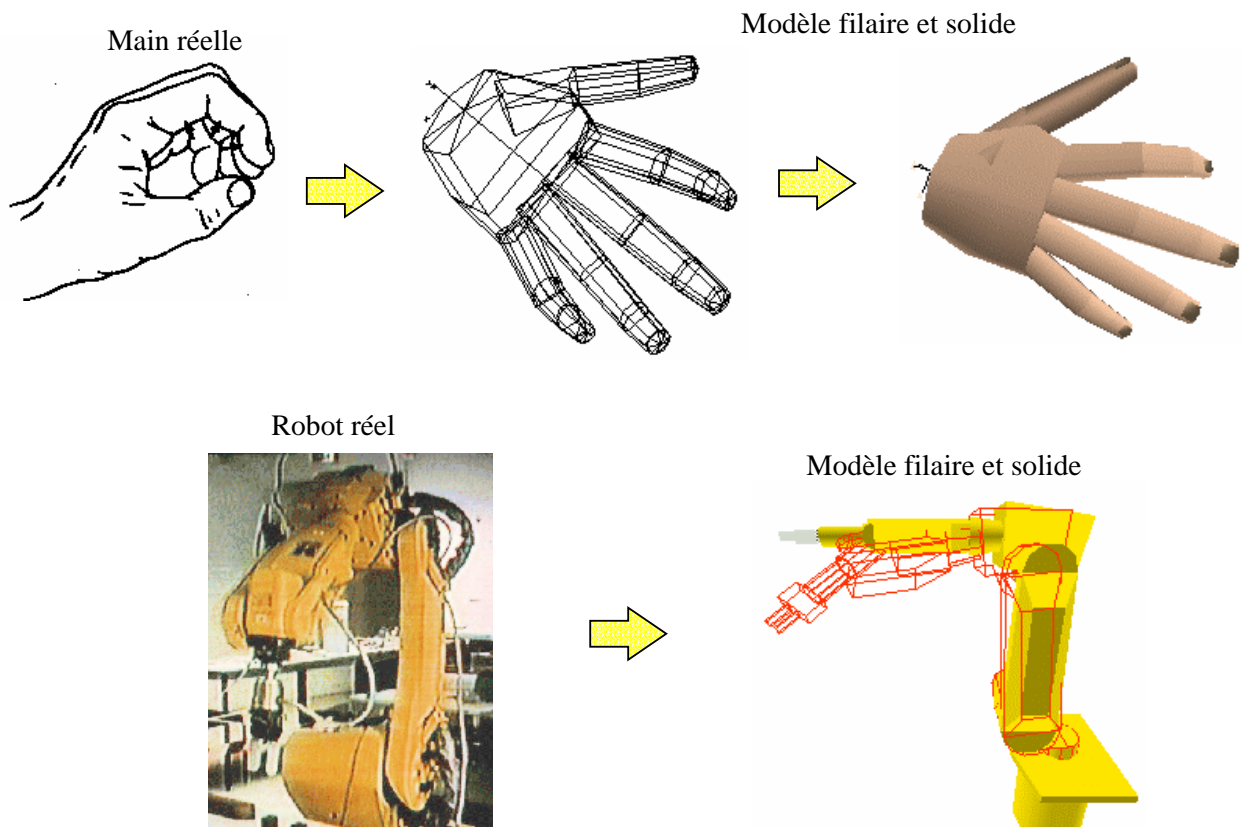


- Notion de Segments et Listes

- Objet  Sous Objets reliés par des matrices de transformations

27

Modèles géométriques : exemples



28

Éliminations des surfaces cachées

- Algorithme du Z-buffer (Catmull 1974)

Procédure Z-buffer

Var pz : Entier;

Début

Pour y **De** 1 **A** Y_max **Faire**

Pour x **De** 1 **A** X_max **Faire**

Début

Allume_Pixel (x, y, Couleur_de_fond);

Valeur_Z (x, y, 0);

Fin

Pour chaque_polygone **Faire**

Pour chaque_pixel_dans_la_projection_polygone **Faire**

Début

pz := la valeur Z du polygone aux coordonnées (x, y);

Si (pz >= Lire_Z (x, y) **Alors**

Début

Valeur_Z(x, y, pz);

Allume_Pixel(x, y, couleur_polygone en (x, y));

Fin

Fin

Fin Z-buffer

29

Autres traitements pour rehausser le réalisme

- **Couleur**

- combinaison RVB ou autres.

- **Luminosité**

- ambiante
- autres sources (localisation, intensité, direction, couleur, etc.)
- etc.

- **Transparence**

- exemple : $\alpha = v_{\max} - (v_{\max} - v_{\min}) \cos(\theta)^n$ $P_{cf} = \alpha P_s + (1 - \alpha) P_d$

- **Texture**

- modèles
- application à partir de bouts d'images (gif, jpg, etc.)

- **Ombrage**

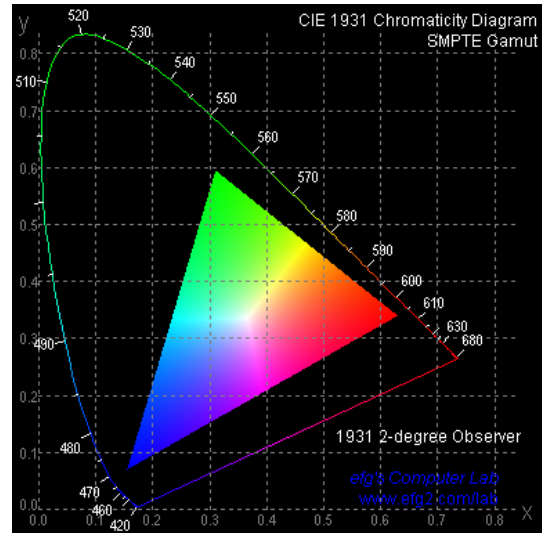
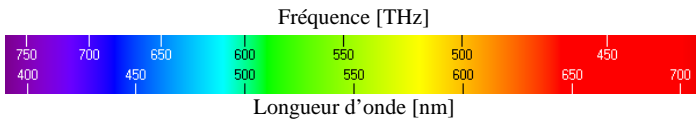
- **Lissage** (antialiasing)

- **Indices de profondeur**

30

Couleur

- Synthèse additive de 3 couleurs primaires (RVB)
 - Codage sur $8\text{bits} \times 3 = 24$ bits = 16 M couleurs
 - Palette (256 couleurs parmi 16M) obsolète.
 - La synthèse additive ne représente qu'une partie des couleurs possibles.

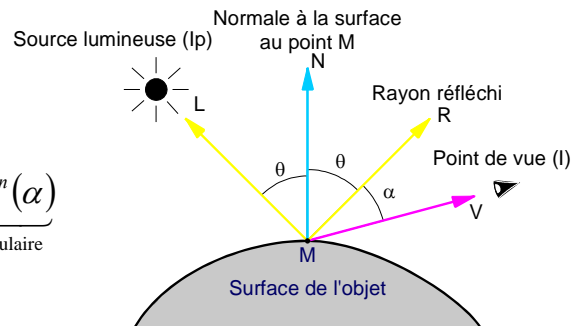


31

Luminosité / Ombrage

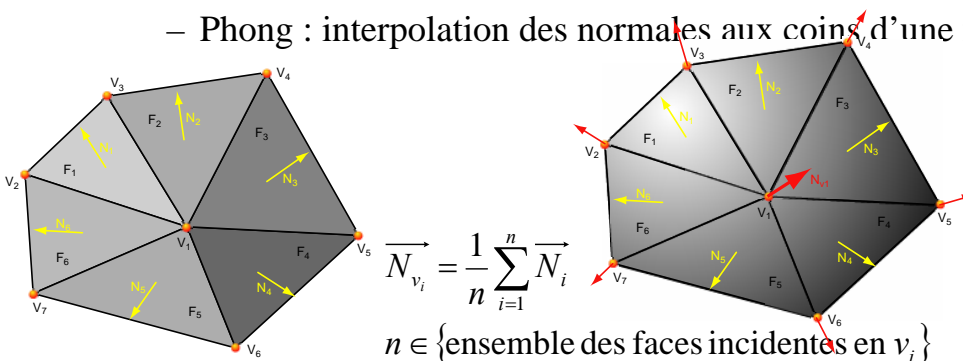
- Intensité lumineuse (modèle empirique)

$$I = \underbrace{I_a}_{\text{lumière ambiante}} + \underbrace{I_p k_d \cos(\theta)}_{\text{lumière diffuse}} + \underbrace{I_p k_s \cos^n(\alpha)}_{\text{lumière spéculaire}}$$



- Smooth Shading

- Calcul des normales par vertex
 - Gouraud : interpolation des couleurs aux coins d'une face
 - Phong : interpolation des normales aux coins d'une face



32

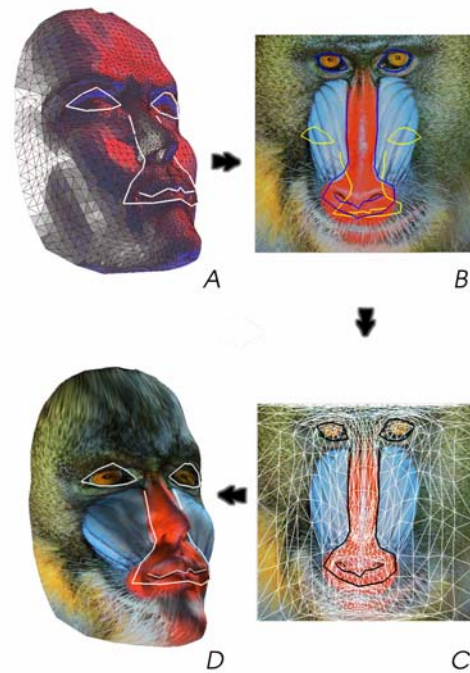
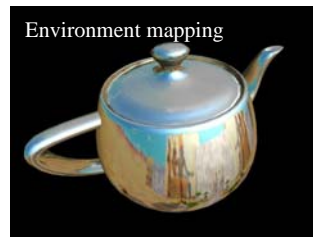
Texture

- Texture mapping

- Faire correspondre à chaque vertex du maillage une coordonnée image

- Mappings pour

- Couleur
- Transparence
- Normales (bump)



Siggraph 2001, *Constrained Texture Mapping*, B. Lévy

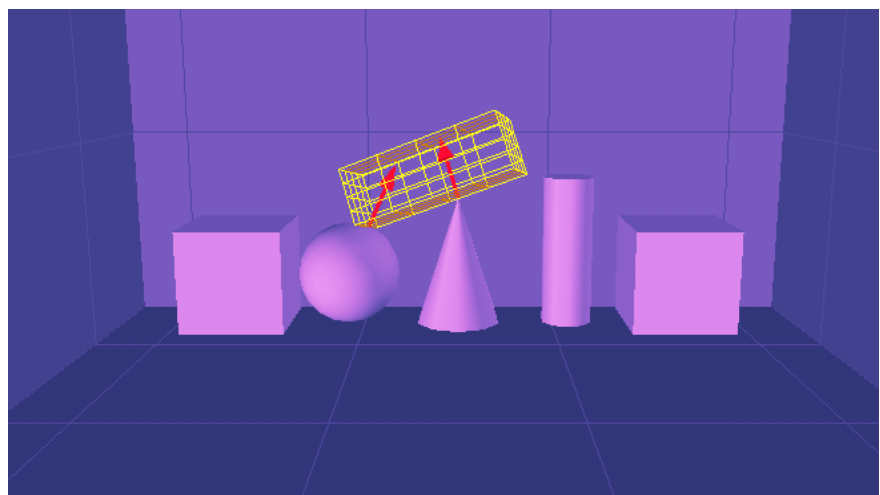
33

Détection de collision : intersection d'objets 3D

- Applications en Réalité Virtuelle
 - temps réel
 - intersections entre objets non-convexes
 - multiple points de contact
 - détermination de la déformation locale

Étape 1:
détection grossière

Étape 2:
détection précise



34

Moyens pour la modélisation

- *Les compétences du concepteur*
- *Quelques outils du commerce*

Bibliothèques graphiques standards	exigent une bonne maîtrise de l'infographie et programmation	GL, OpenGL, X, OpenInventor, Phigs, Starbase, PowerShade ...
BDD 3D du commerce	'statiques' mais avec fichier de conversion	Viewpoint Inc. ...
Numériseurs 3D	permet des modèles personnalisés	Mira Imaging, Médialab, Polhemus Inc. ...
Programmes CAO	modeleurs classiques interactifs	AutoCAD, 3D Studio, DADS ...
Éditeurs ou Modeleurs dédiés RV	interactifs, permettent des simulations complexes	Virtools Division Ltd., WTK, Dimension Ltd., Clovis, dVise Ltd. ...

35

Animation

- Éventuellement à partir d'interfaces externes,
- Dérivation des équations de contraintes,
- Équation dynamique de mouvement :

– Equation de Lagrange

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \Gamma_i \quad L = T(q, \dot{q}) - U(q)$$

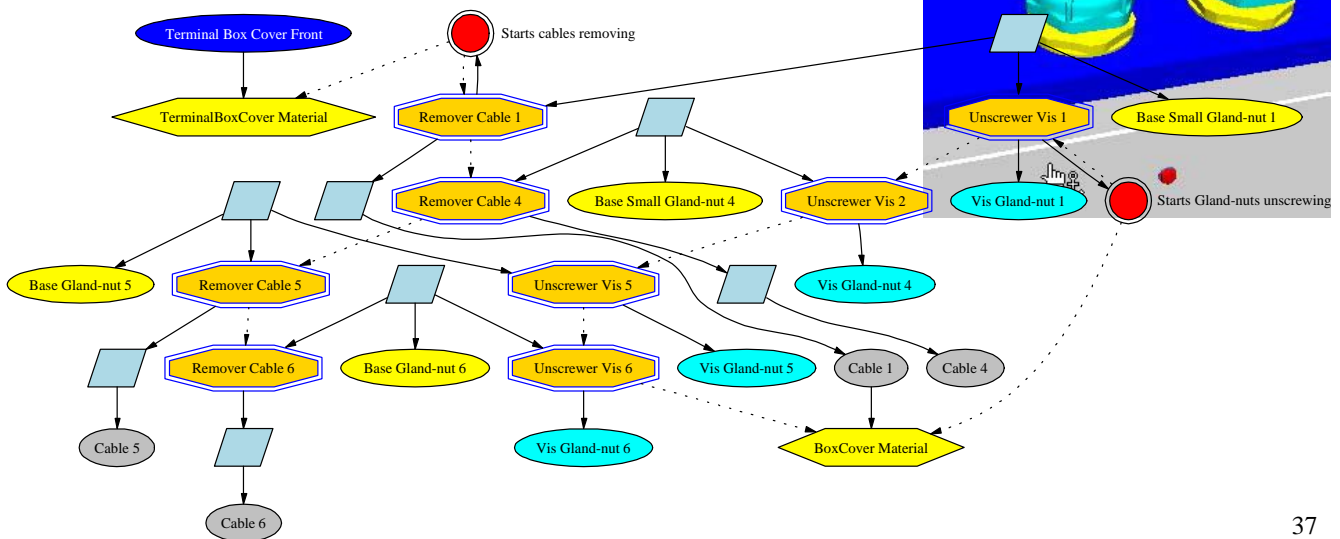
– Equation d'Euler-Newton

$$\begin{bmatrix} M & 0 & \Phi_r^T \\ 0 & I & \Phi_\pi^T \\ \Phi_r & \Phi_\pi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{r} \\ \dot{\omega} \\ \lambda \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F \\ n - \tilde{\omega} I \omega \\ \gamma \end{bmatrix}$$

36

Structuration

- Graphe de scène
 - Graphe de structuration d'une scène virtuelle



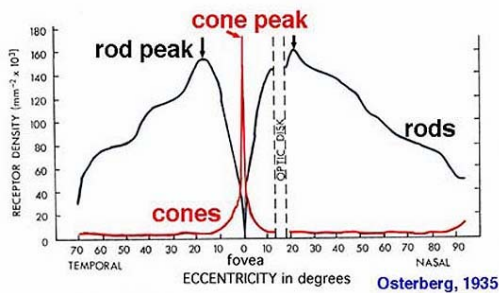
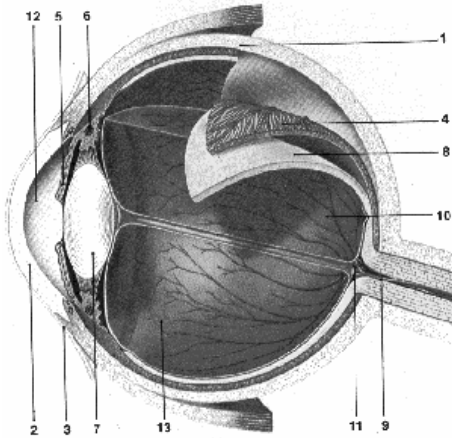
37

Visualisation : caractéristiques et requis de la vision humaine

- 70% des récepteurs sensoriels sont situés dans les yeux
- Relief
 - - deux images différentes (gauche et droite)
- Champ de vision
 - immersion totale (180° FOVh 150° FOVv)
 - immersion partielle (FOVs variables)
- Résolution
 - distinction de deux points distants de 0.05 mm à 20 cm (~1' d'angle),
 - 1700 couleur et 300 nuances de gris.
- Propriétés d'accommodation et convergence
- Persistance rétinienne
 - 1/30ème à 1/50ème de seconde

38

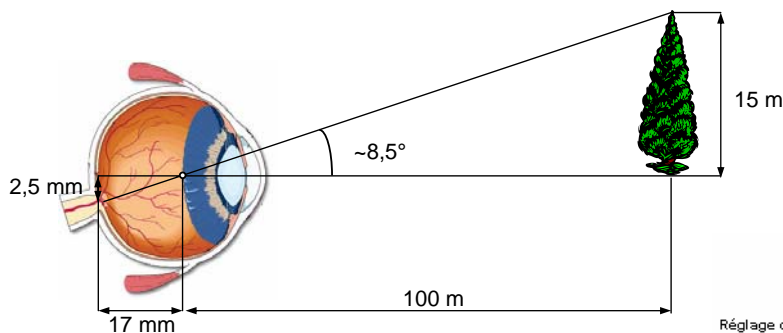
Perception d'une image : l'œil humain



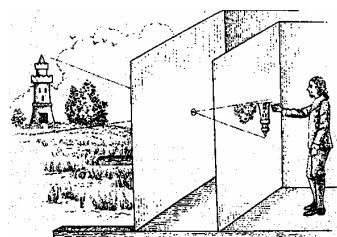
- 1. **Sclérotique** : enveloppe fibreuse avec les muscles moteurs au dessus et en dessous.
- 2. **Cornée** : dans la continuité de la sclérotique
- 3. **Conjonctive** : intérieur de la paupière
- 4. **Choroïde ou Uvée** : zone vasculaire qui irrigue l'extérieur de la rétine
- 5. **Iris**: extension du procès ciliaire
- 6. **Corps ou procès ciliaires** : muscles qui agissent sur le cristallin, émanation de la choroïde, secrète l'humeur aqueuse située entre le cristallin et la cornée.
- 7. **Cristallin** : change de forme grâce aux muscles du procès ciliaire
- 8. **Rétine** : neuro-sensorielle dans les 4/5 postérieurs (cônes + bâtonnets) ailleurs il n'y a pas d'axones
 - Cônes : cellules sensibles à la couleur (3 types) : ~ 6,400,000
 - Bâtonnets : Cellules sensibles à la luminosité : de 110,000,000 à 125,000,000
- 9. **Nerf optique + artère centrale de la rétine**
- 10. **Fovéa** : zone de concentration des cônes
- 11. **Point aveugle** : zone de convergence des axones qui constituent le nerf optique, il n'y a plus de cellules sensorielles à cet endroit
- 12. **Humeur Aqueuse** : sécrétée par les procès ciliaires
- 13. **Corps vitré** : masse gélatineuse non renouvelée.

39

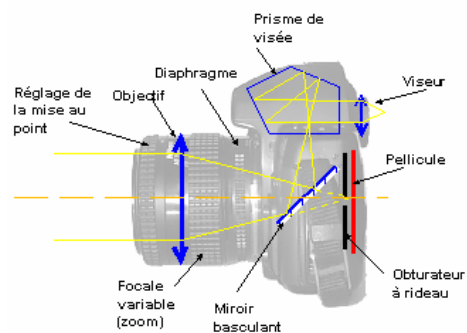
Principes de formation des images



- **Modèle sténopé (ou trou d'épingle)**



Camera obscura
~1500



40

Principe de la perception de la profondeur

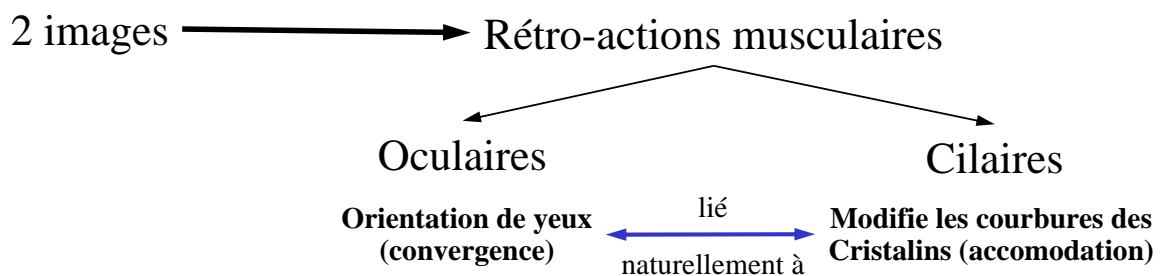
Vision monoculaire

- Ombre et lumière
- Dimensions relatives
- Interposition
- Gradient de la texture d'une surface
- Variation de visibilité dans une scène extérieure
- Mouvement relatif
- Perspective

41

Principe de la perception de la profondeur

Vision binoculaire (Wheatstone 1838)

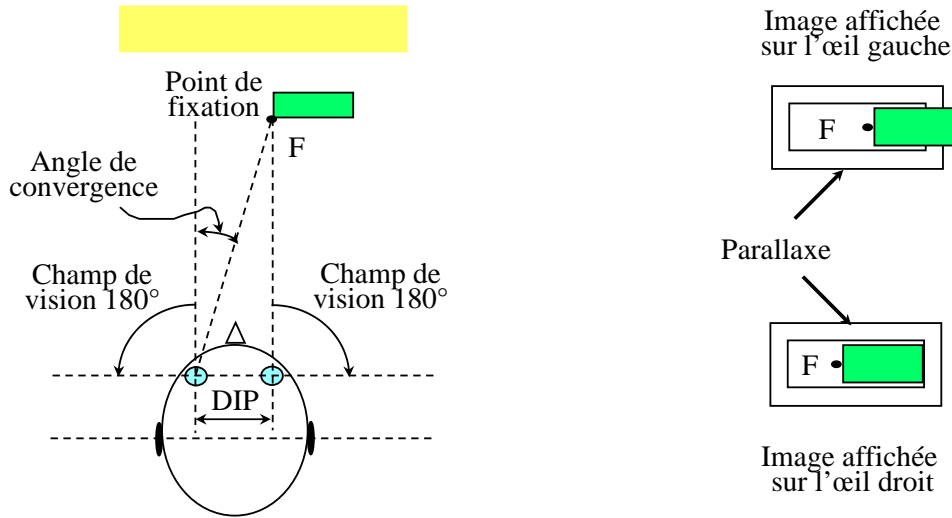


- Disparité rétinienne causé par la non convergence des axes optiques visuels / objet
- Disparité nulle quand les axes optiques convergent

La superposition des deux images différentes renseigne sur la profondeur : stéréopsie

42

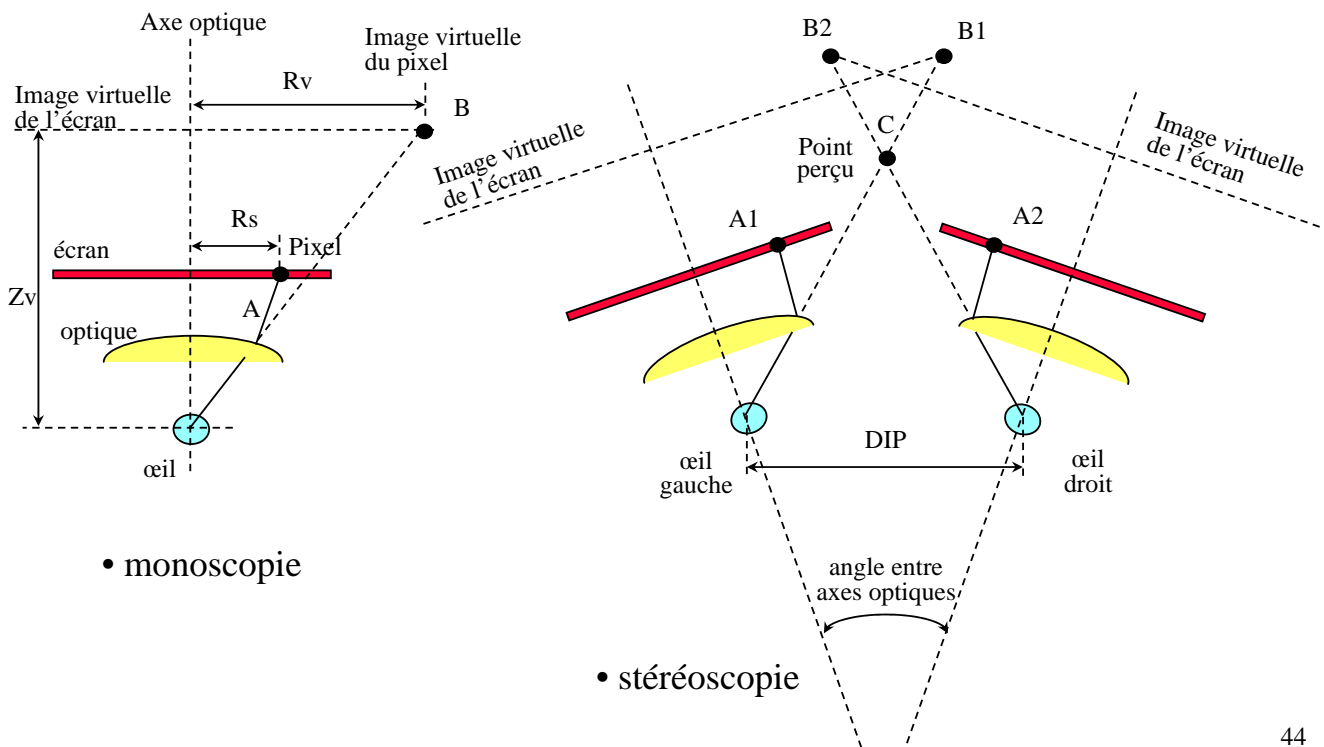
Modèle physiologique de la vision stéréoscopique



DIP : Distance Intra-Pupillaire (entre 53 à 73 mm)

43

Modèle monoscopique et stéréoscopique



• monoscopique

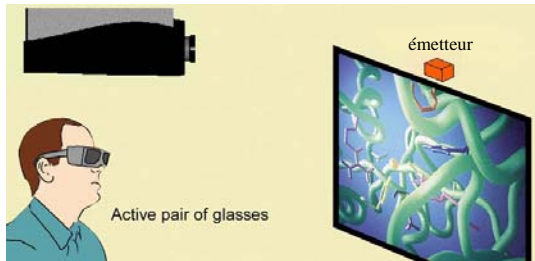
• stéréoscopie

44

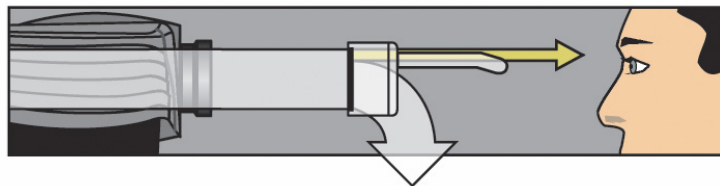
Technologies de projection stéréo (1/2)

- Stéréo active

- Projection alternative des images gauches et droites
 - Nécessite des lunettes à cristaux liquides (Shutter glasses) pour occulter alternativement chaque œil.



- Rendement < 20 %





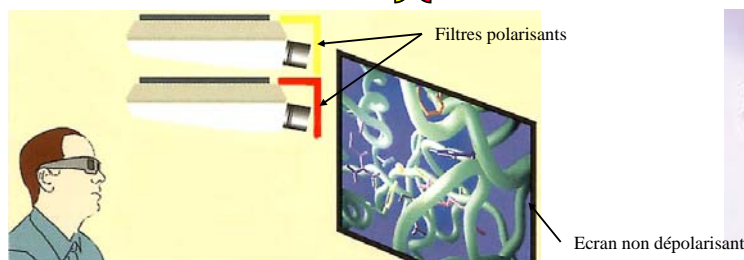
45

Technologies de projection stéréo (2/2)

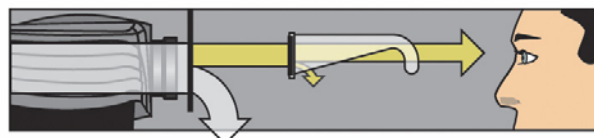
- Stéréo passive

- Projection simultanée de deux images polarisées différemment
 - Nécessite deux projecteurs
 - Polarisation

- Linéaire : pb d'orientation du point de vue 
- Circulaire 



- Rendement : ~40 %



46

Écrans de visualisation par projection stéréo

Lunettes actives



Immersion desk



47

Interface de visualisation

Head Mounted Displays ou HMD *quelques produits du commerce*

Kaiser
ProViewXL 40/50 STm



- 2 x LCD (vert)
- 1024x768 Pixels / Eye
- 8 Bits Green Color
- Stereoscopic
- 26° (V) x 47° (H) FOV
- \$50,000

N-Vision
Datavisor 80



- 2 x CRT
- 640 x 480 Pixels / Eye
- 24 Bit Color
- Stereoscopic
- ~40° round FOV
- \$90,000

N-Vision
NVISOR SX



- 2 x LCOS
- 1280 x 1024 Pixels / Eye
- 24 Bit Color
- Stereoscopic
- 60° diagonal FOV
- \$23,900

48

Interface de visualisation

Workbench



Holobench®



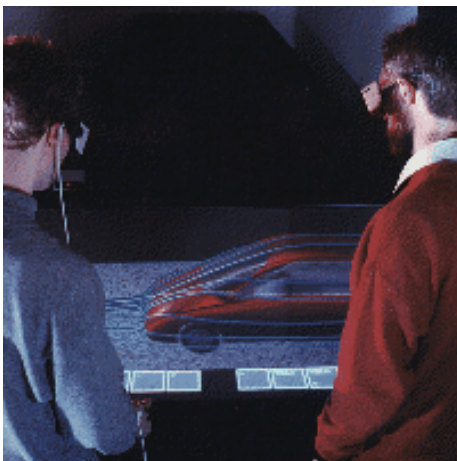
©TAN

49

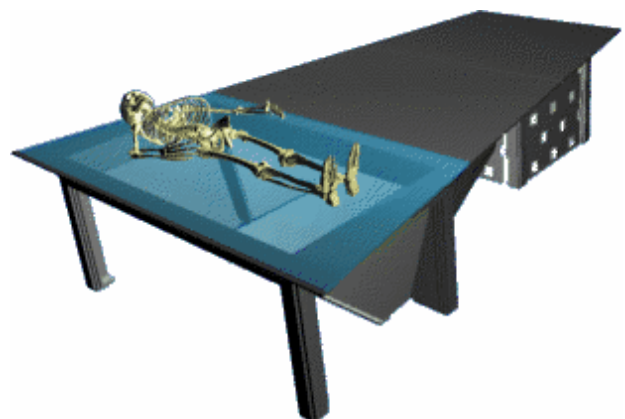
Interfaces de visualisation

table de vision

Visualisation de phénomènes
de l'aérodynamique.

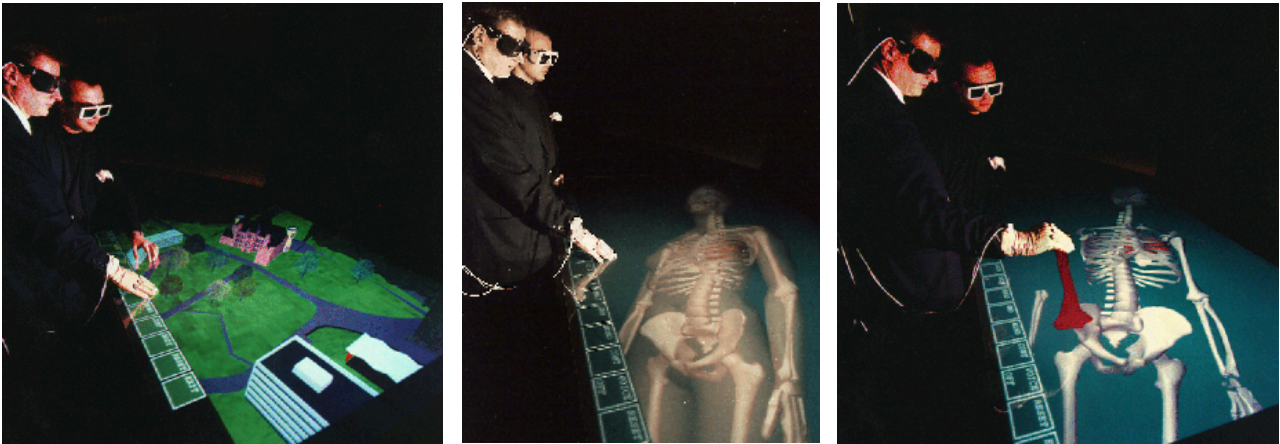


Visualisation 3D pour médecins
et chirurgiens.



50

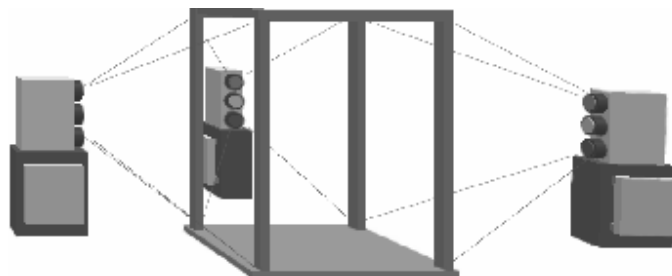
Workbench ou table de vision *applications concrètes*



51

CAVE® : Cave Automatic Virtual Environment

- Principe



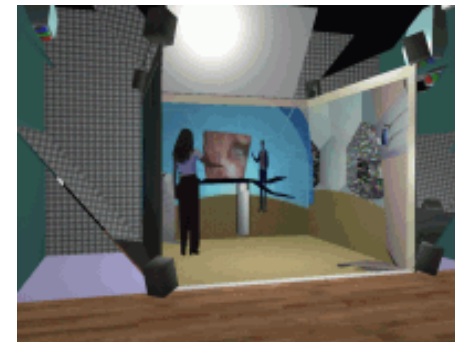
- Résultat



52

Interfaces de visualisation

CAVE



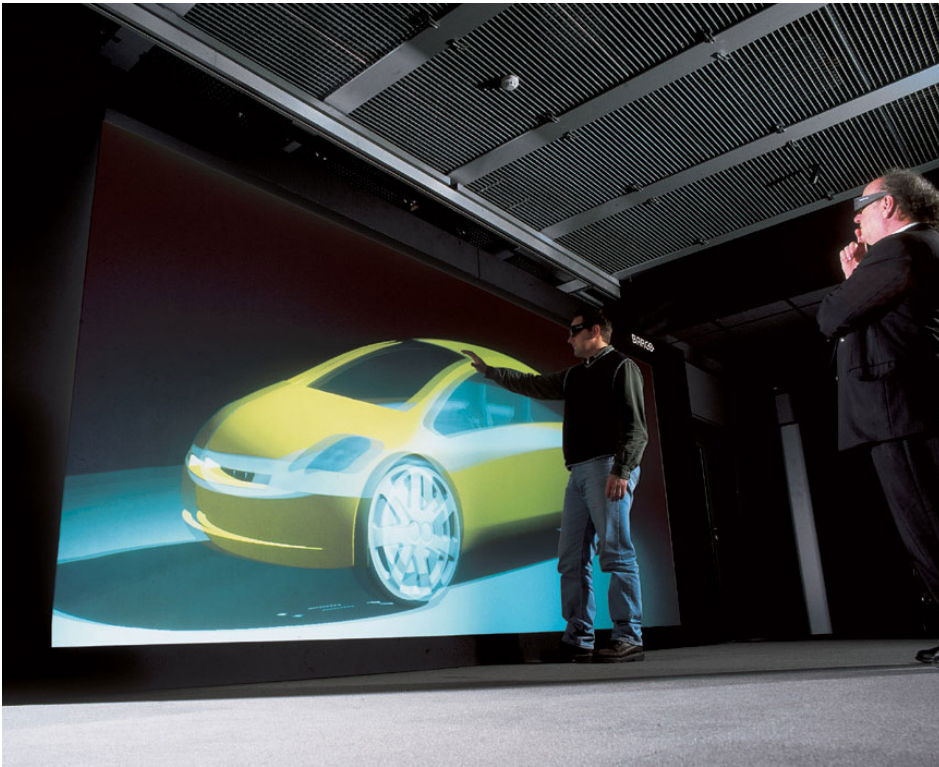
53

Interfaces de visualisation

Reality Center®



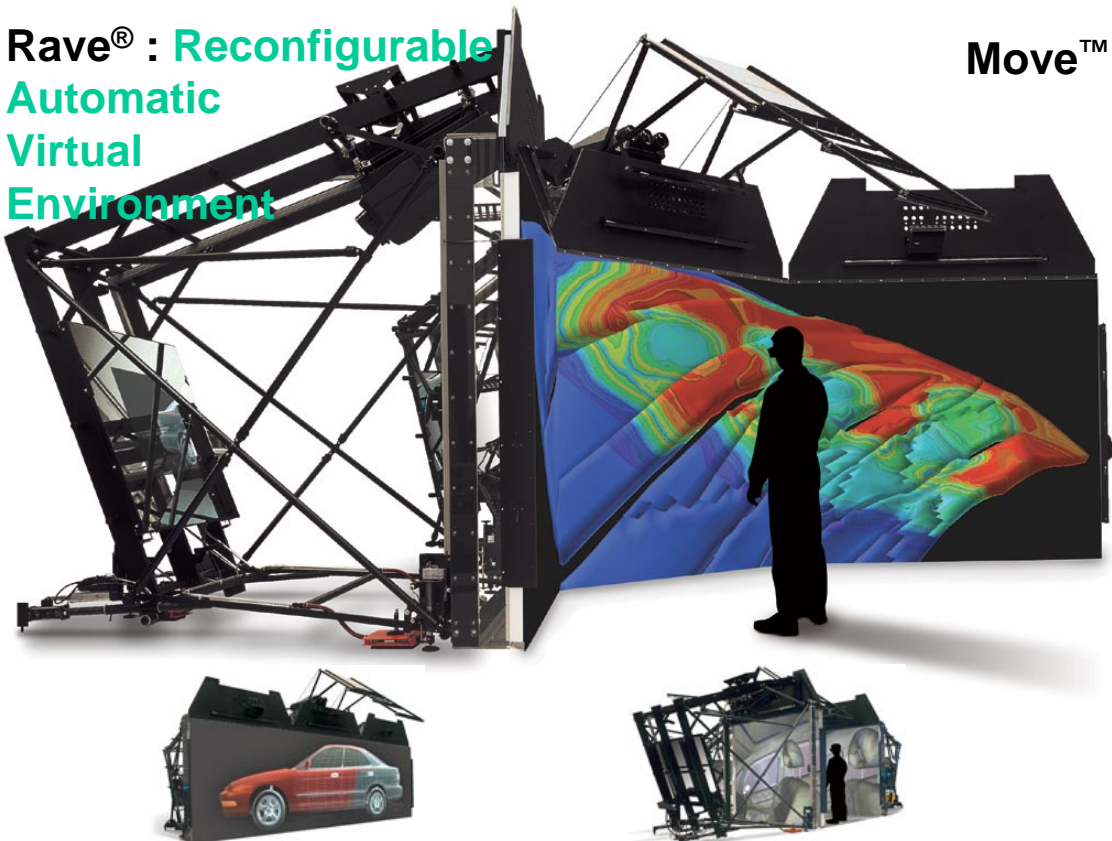
CAD Wall™



™Barco

Rave® : Reconfigurable
Automatic
Virtual
Environment

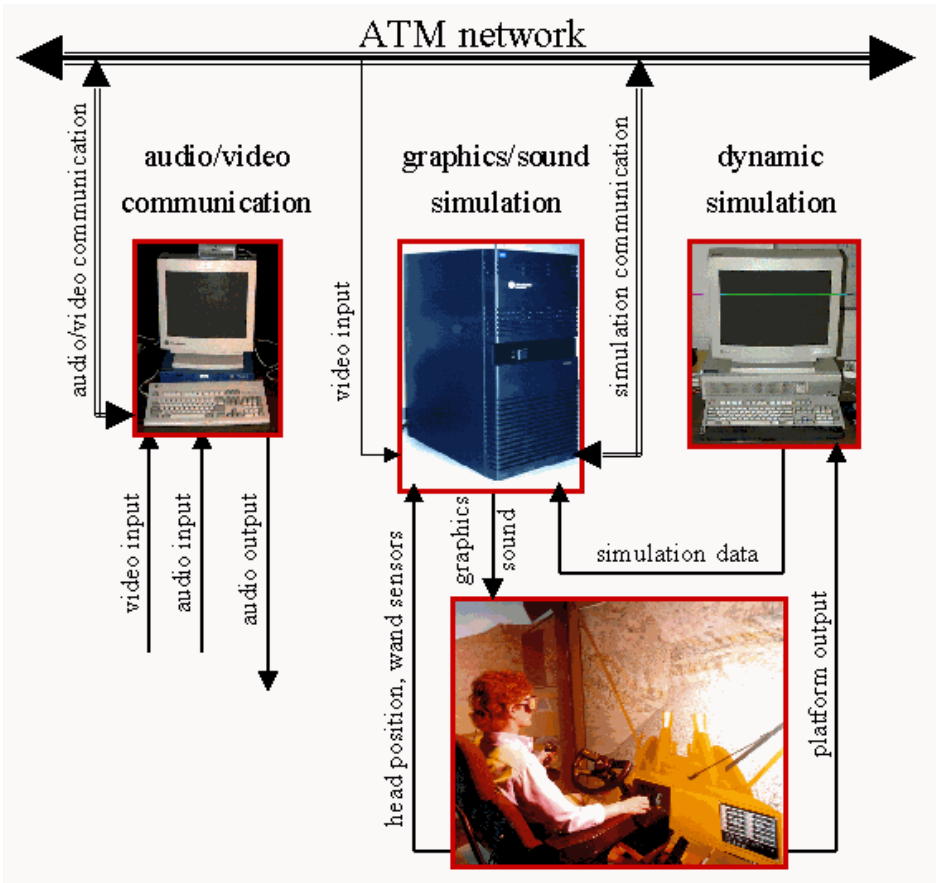
Move™



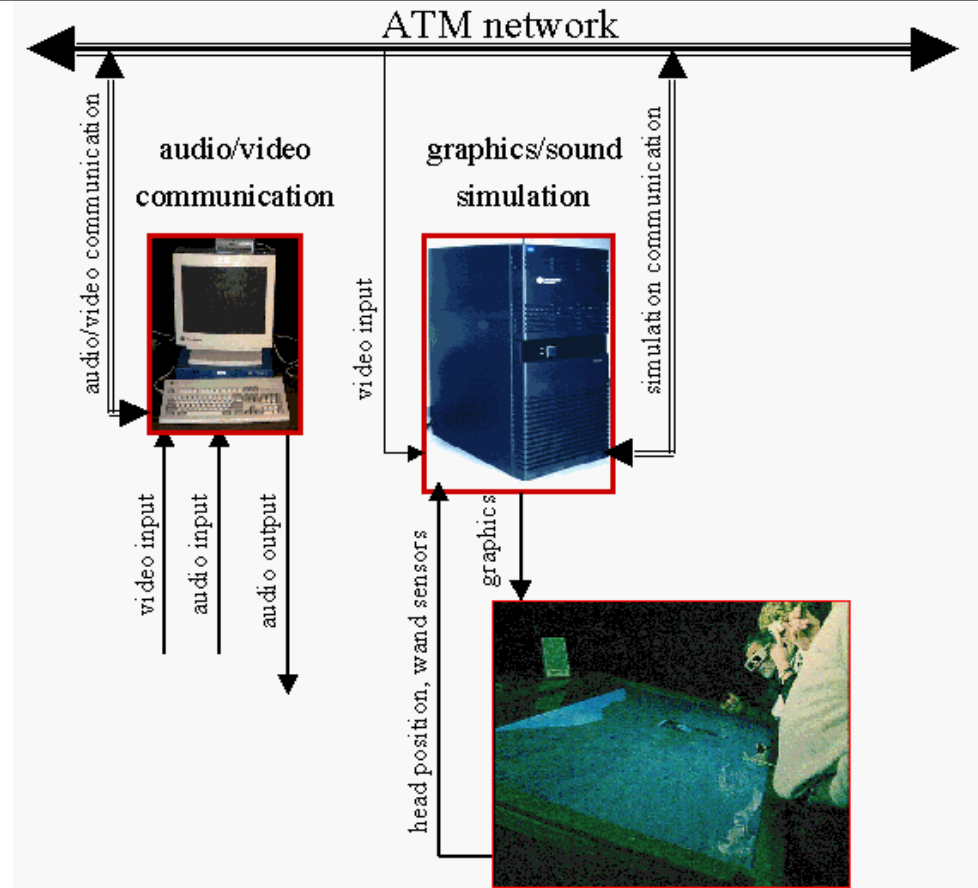
© Fakespace Systems ???

™Barco

Interfaces de visualisation : application CAVE+Workbench



Interfaces de visualisation : application CAVE+Workbench



Technologies de Projection

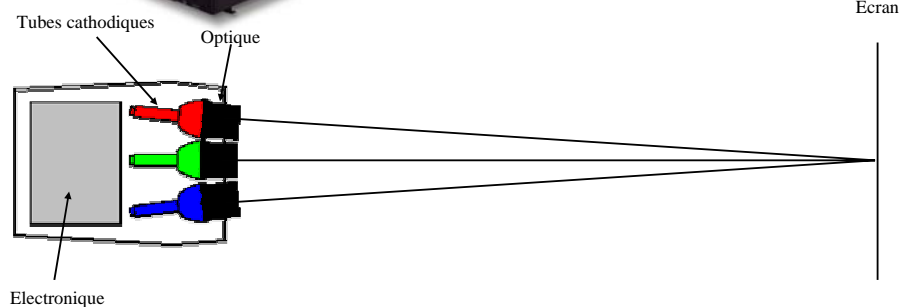
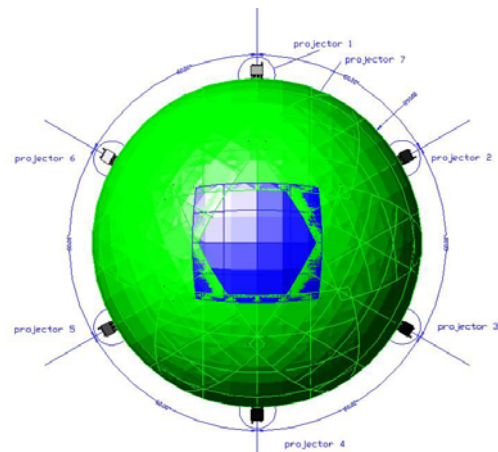
- CRT : Cathode Ray Tube
 - Bonne résolution
 - Meilleur contraste
 - Faible luminosité
- LCD : Liquid Crystal Display
 - Faible coût
 - Rémanence importante
- DLP : Digital Light Processing
 - Bonne luminosité
 - Bon contraste
 - Coût élevé



59

CRT : Cathode Ray Tube

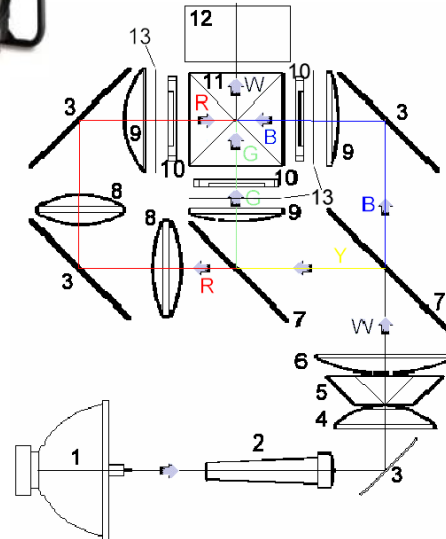
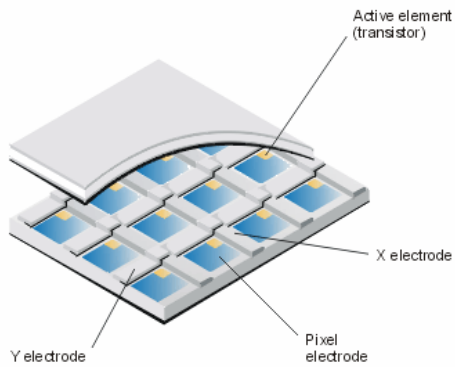
- Applications
 - Environnement faiblement lumineux
 - Stéréo active
 - Multi-écrans



60

Liquid Crystal Display / Liquid Crystal On Silicon

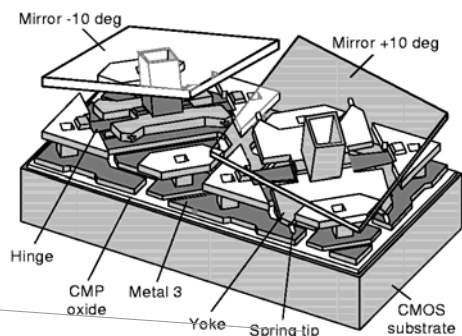
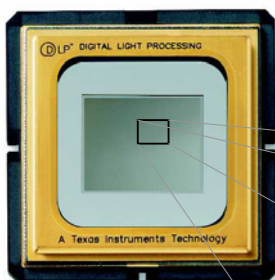
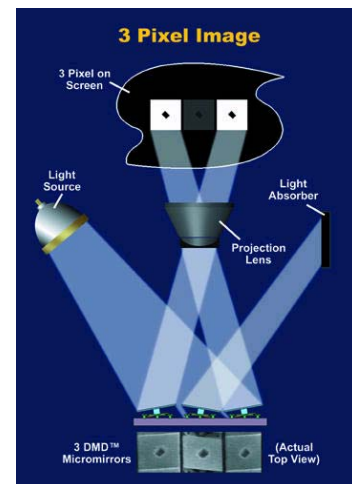
- Applications
 - Stéréo passive



61

Digital Light Processor

- Applications
 - Cinéma numérique
 - Stéréo active ou passive
 - Environnement lumineux



62

Comparatif des Technologies de Projection

Technologies	CRT	LCD	DLP
Résolution max	3200x2560	1600x1200	1280x1024
Puissance lumineuse max	500 lm	5000 lm	18000 lm
Ratio de contraste	> 1000:1	500:1	700:1
Stéréo passive	oui	oui	oui
Stéréo active	oui	non	oui
Durée de vie lampe	5000 h	1000 h	1000 h
Prix consommable	tube 9" : 6200 €	750 €	5000 lm : 5488 €
Fréquence	120 Hz en 1600x1200	60 Hz en 1600x1200	100 Hz en 1280x1024
Rendement lumineux en stéréo active	16%	-	16%
Rendement lumineux en stéréo passive	38%*	59%**	38%*

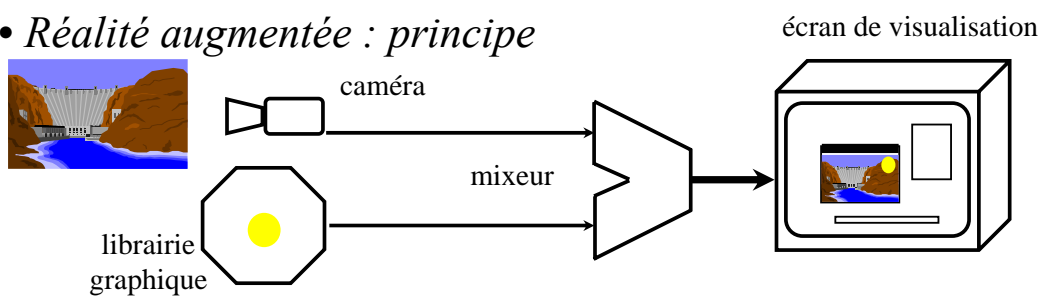
* : polarisation externe

** : polarisation interne

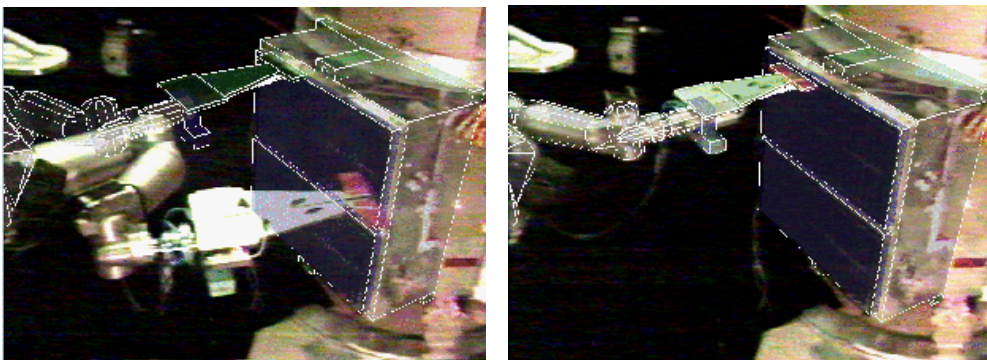
63

Incrustation et Mixage : Images hybrides

• *Réalité augmentée : principe*



• *Exemple d'application : télé-opération en présence de retard*



64

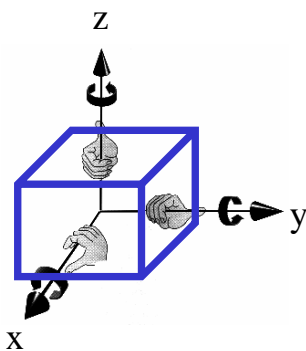
Acquisition pour la modélisation et l'animation

Capteurs de position et d'orientation 3D

Application

robotique, biomécanique, architecture, art, CAO, éducation ...

Système de coordonnées d'un objet en mouvement



Exemple:
Angles d'Euler

Rotations : $R_0^1 = R_{z,\phi} \cdot R_{y,\theta} \cdot R_{z,\psi}$

Matrice homogène composée :

$$U = \begin{pmatrix} c_\phi c_\theta c_\psi - s_\phi s_\psi & -c_\phi c_\theta s_\psi - s_\phi c_\psi & c_\phi s_\theta & x' \\ s_\phi c_\theta c_\psi + c_\phi s_\psi & -s_\phi c_\theta s_\psi + c_\phi c_\psi & s_\phi s_\theta & y' \\ -s_\theta c_\psi & s_\theta s_\psi & c_\theta & z' \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Solution inverse :

$$\theta = \arctan\left(u_{33}, \pm\sqrt{1-u_{33}^2}\right)$$

$$\phi = \arctan(\pm u_{13}, \pm u_{23})$$

$$\psi = \arctan(\mp u_{31}, \pm u_{32})$$

Capteurs de position et d'orientation 3D

- Utilisation à des fins d'animation

Acquisition du mouvement de l'opérateur :

<i>tête</i>	détermine le champ de vision sert à l'affichage et au cadrage
<i>pupilles</i>	détermine le point de vue, sert aussi à optimiser l'affichage, le cadrage et le réalisme
<i>main(s)</i>	transfert d'actions au sein de l'EV.
<i>autres organes</i>	transfert d'actions au sein de l'EV.

Acquisition du mouvement d'autres objets :

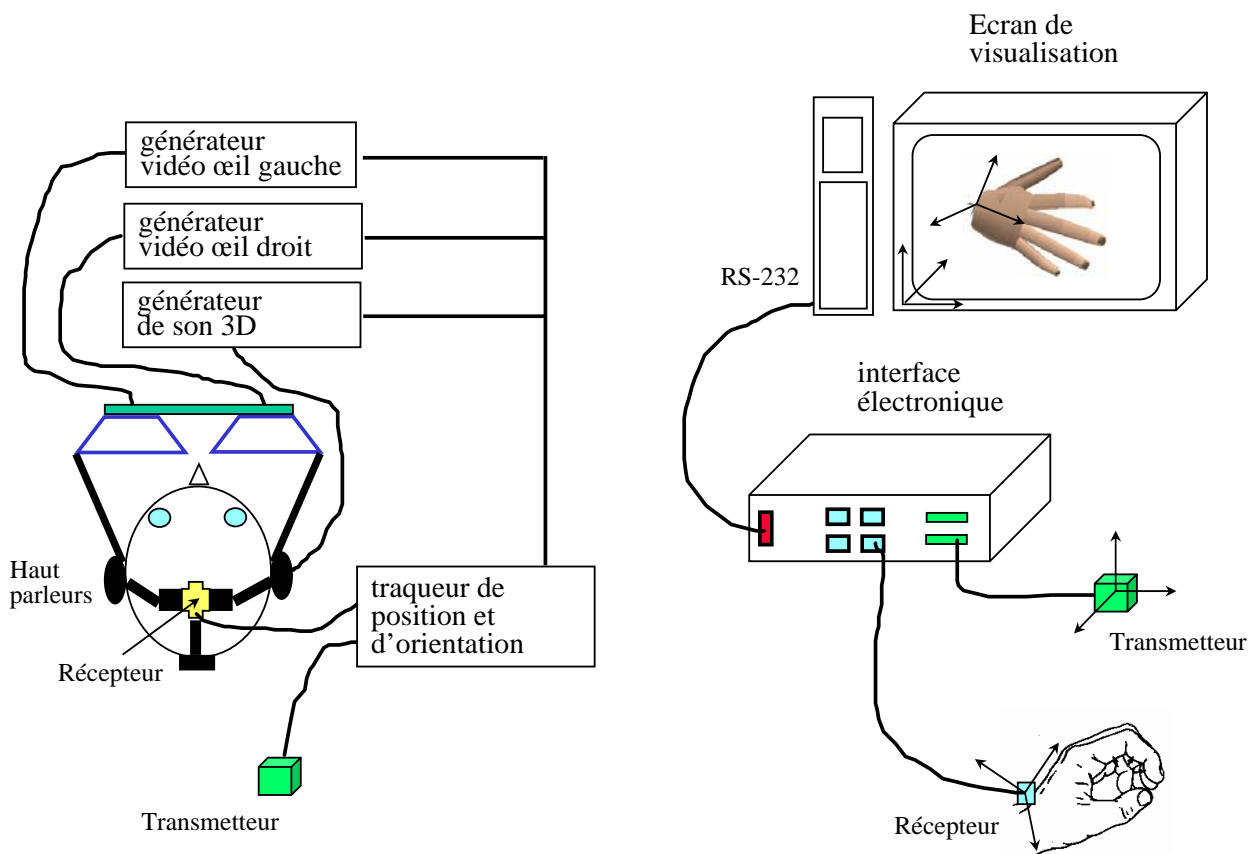
animation et transfert d'action

- Utilisation à des fins de modélisation

Construction point à point et par interpolation des modèles graphiques

67

Exemple d'utilisation

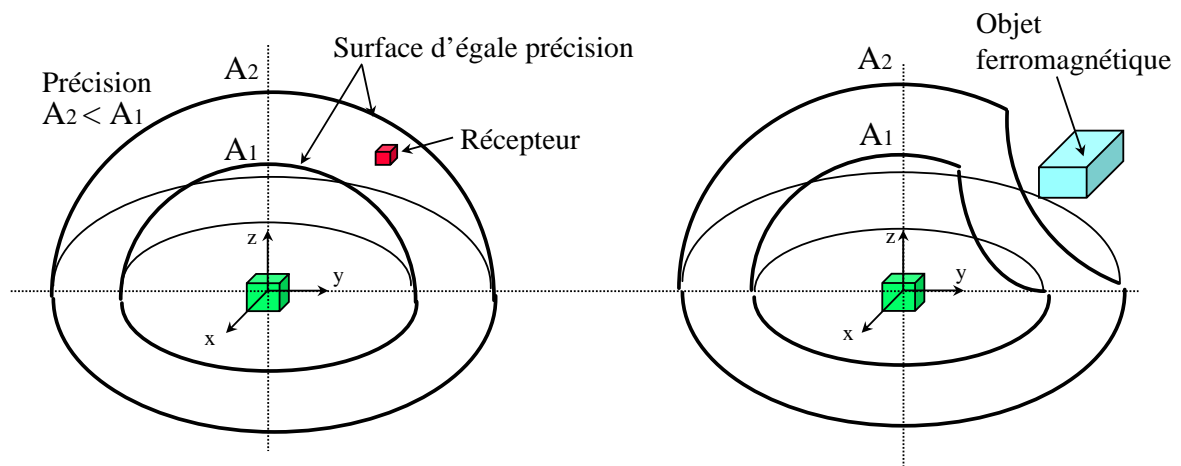


68

Capteurs 3D magnétiques

• Principe

- Très utilisé, le traqueur magnétique est formé de deux ensembles d'antennes magnétiques orthogonales entre elles. Le premier ensemble est placé à l'intérieur d'un émetteur et le second à l'intérieur d'un récepteur. Le signal (champ magnétique) reçu par le récepteur permet de déduire la position et l'orientation de celui-ci par rapport à l'émetteur.



69

Capteurs 3D magnétiques du commerce



Le Flock of Birds d'Ascension



Le Fastrack de Polhemus

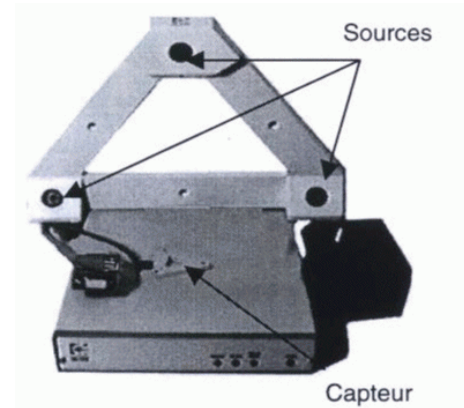
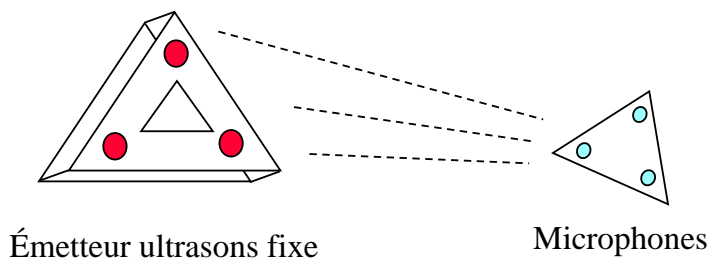


70

Capteurs 3D à Ultrason

• Principe

- Le traqueur à ultrasons aussi appelé traqueur acoustique est constitué d'un émetteur, d'un récepteur et d'une unité électronique. L'émetteur est constitué de hauts parleurs ultrasonores et le récepteur de microphones montés sur un bâti. Prix peu élevé par rapport aux autres systèmes, sensible cependant aux bruits de fond de la pièce est obligé une vision mutuelle directe entre le récepteur et l'émetteur.

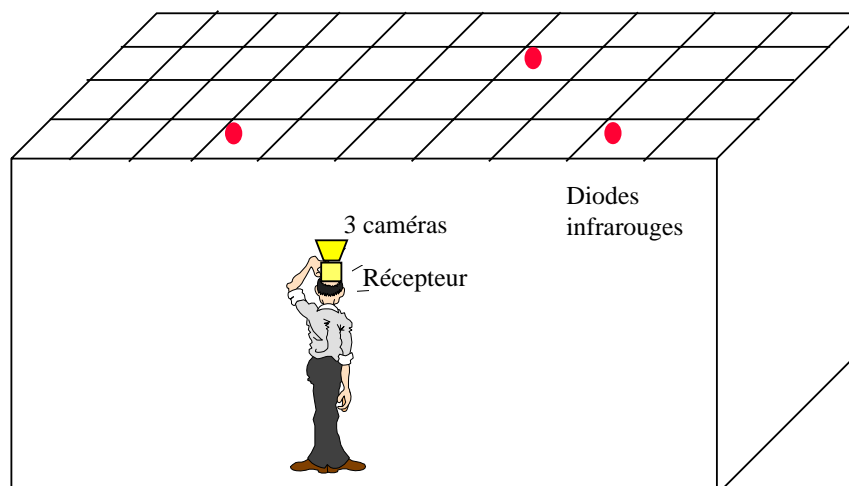


71

Capteurs 3D optiques

• Principe

- Les émetteurs ultrasonores sont remplacés par des photodiodes, placées généralement sur le plafond. Le récepteur est une caméra vidéo placée sur la tête de l'opérateur.
- Une grande variété de capteurs optiques existent sur le marché.
- Précis mais sensible à l'éclairage.



72

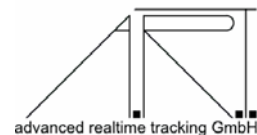
Tracking optique

- Principe

- Des marqueurs sont placés sur l'objet à tracker
 - Marqueurs passifs (retro-réfléchissants)
 - Marqueurs actifs (diodes infrarouge)
- Des capteurs (caméra infrarouge munies de flash infrarouges) suivent les groupes de points formant les objets à tracker



- Avantages
 - Sans fil
 - Suivi d'un grand nombre de cibles
- Inconvénient
 - Prix élevé

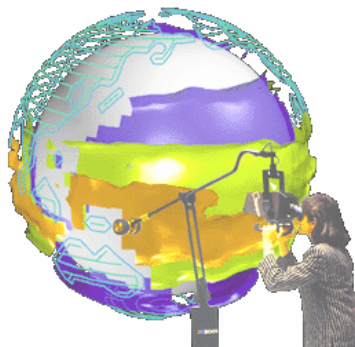


advanced realtime tracking GmbH 73

Capteurs 3D mécaniques

- *Principe*

- Les traqueurs mécaniques mesure les variations d'un système mécanique relié à l'opérateur. Formé généralement de câbles et potentiomètres. Précis, pas très coûteux mais assez encombrants.



Capteurs 3D caméra

- *Principe*

- Traitement d'images nécessitant des «patch» sur l'opérateur



75

Évaluation technologique

Système	Précision	Réponse	Robustesse	Sociabilité	Commentaires
Mécanique	Bonne	Bonne	Bonne Faible sensibilité à l'environnement	Encombrement assez important	Bien adapté pour le retour d'effort. Application téléopération
Optique	Bonne La précision et la résolution diminuent quand le volume de travail augmente	Bonne Ces systèmes sont bien adaptés au temps réel.	Bonne Certains systèmes peuvent être affectés par la lumière ambiante	Sensible au masquage des marqueurs ou caméras. Encombrement assez important	Peut demander des installations complexes pour obtenir de bons résultats.
Magnétiques	Bonne dans les petits espaces de travail. Dépend fortement de la présence de métal dans la zone de travail	Fréquence d'échantillonnage relativement faible	Grande sensibilité au métal dans la zone utile	Bonne dans les petits espaces de travail.	Le plus couramment utilisé. Possibilités de suivre plusieurs objets simultanément en rajoutant des capteurs au système.
Acoustique	Bonne	Dépendant de la distance	Dépendant de la distance	Sensible au masquage des capteurs ou des sources.	Extrêmement stable dans la zone utile. Peu onéreux et peu encombrant.

76

Outils de modélisation : Souris 3D

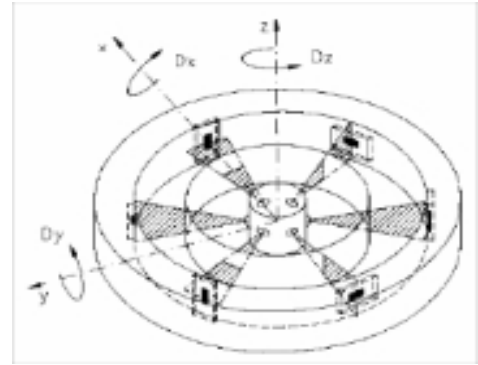
• *Principe*

- capteur d'effort optique (figure ci-contre)

$$d_i = \ell(F)$$

$$\dot{P} = \wp(d_i)$$

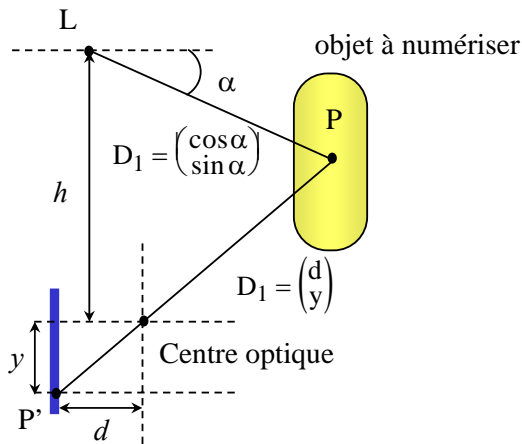
- capteur d'effort à base de jauges de contraintes.



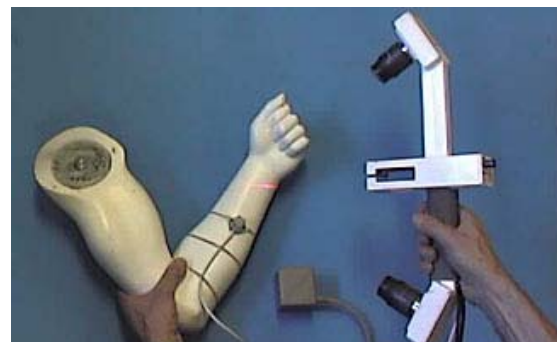
Acquisition 3D laser pour la modélisation

• *Principe*

- triangulation laser plane



- les coordonnées de P sont calculées par l'électronique du capteur.



Acquisition 3D par Probes : dispositifs mécaniques

• *Principe*

- Mécanisme avec codeurs optiques ou résistances variables.

- Point de calibrage en général sur le probe.



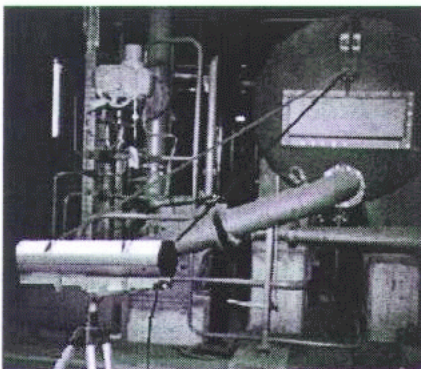
- Utilisation des équations géométriques de la structure mécanique pour déterminer la position finale (composition des matrices homogènes).

79

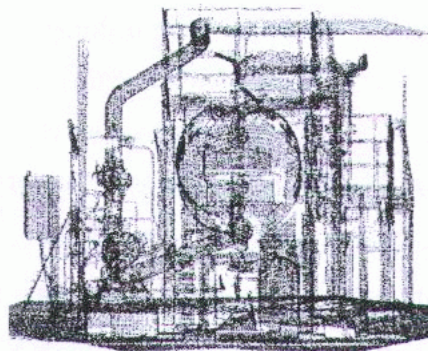
Acquisition 3D par Triangulation

• *Principe*

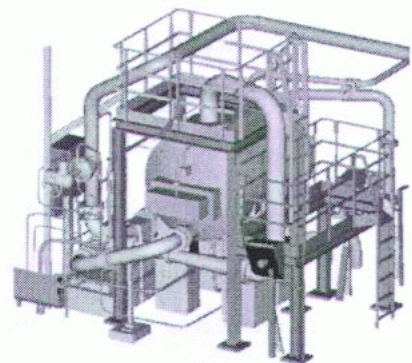
- Algorithmes de traitement d'images et de reconstruction en général assez difficile à mettre en œuvre.



Usine réelle (capteur SOISIC)
MENSI France



Nuage de points



modèle graphique obtenu

80

Acquisition 3D par Temps de Vol (TOF)

81

La main comme organe d'E/S privilégié

- *Pour la commande on a besoin de :*
 - Position
 - Orientation
 - Configuration
 - Force développée
- *Pour le contrôle on a besoin de :*
 - Sensation des efforts (réaction de l'objet : élastique, mou ...)
 - Sens tactile (lisse, rugueux, chaud, froid, pointu ...)

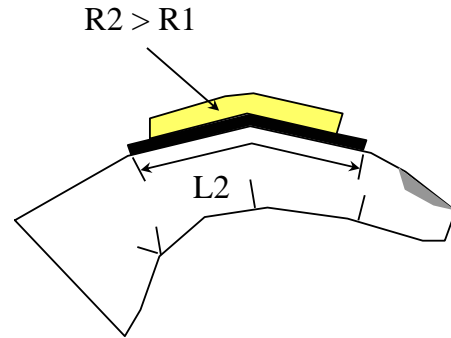
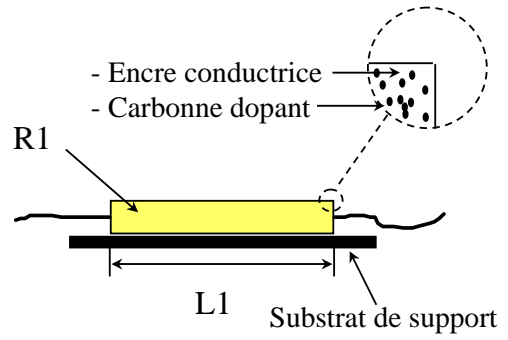
On aura donc dans la scène une main virtuelle à commander et contrôler par la main de l'opérateur

82

Gants de données (le PowerGlove)

• *Principe*

- A encre conductrice
- Conçu pour les jeux de NINTENDO



Gants de données (Cyberglove)

• *Principe*

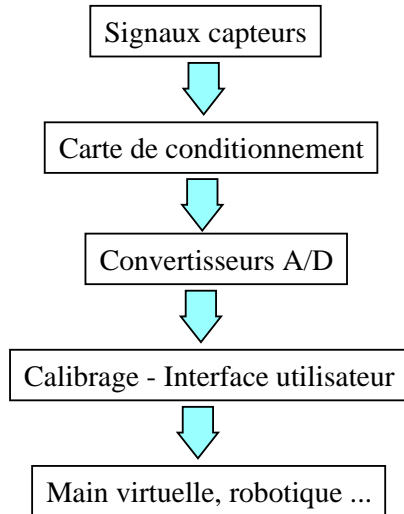
- Jauges de contraintes collées sur un nylon élastique (de 16 à 24 capteurs).



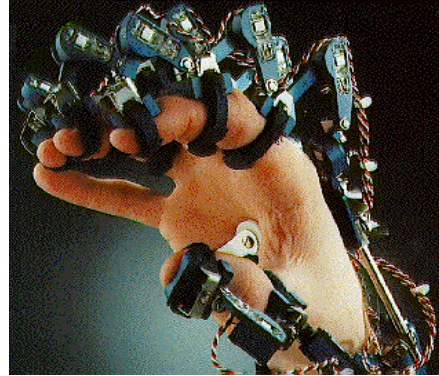
Gants de données exosquelette (mécaniques)

• Principe

- Mécanique avec codeurs optiques ou résistances variables ou à effet Hall.



Gant à effet Hall d'EXOS Inc.



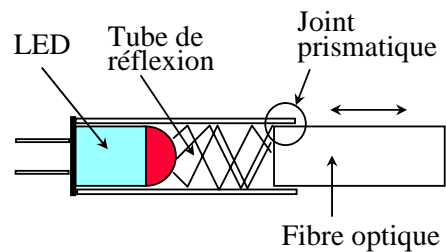
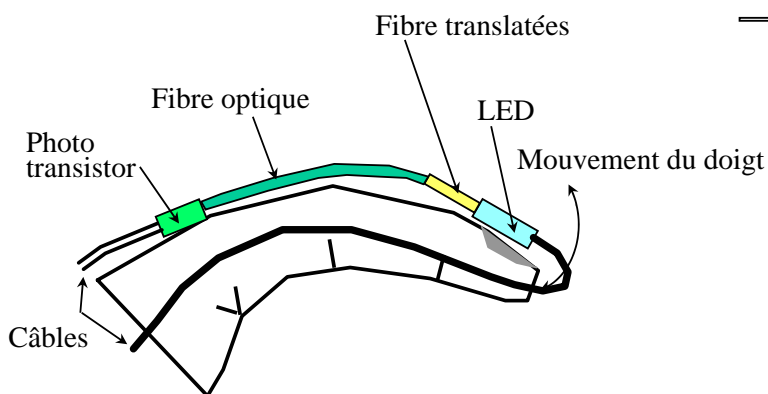
- Utilisation des équations géométriques de la structure mécanique pour déterminer les flexions angulaires de chaque phalanges.

85

Gants de données (VPL)

• Principe

- Optique



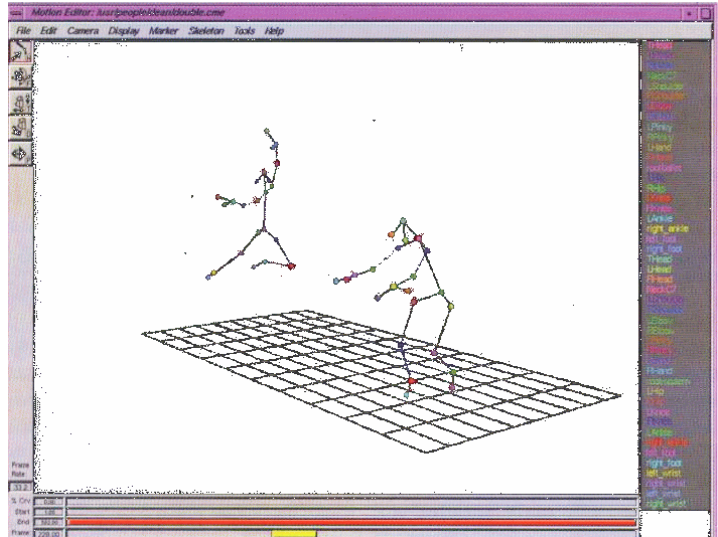
Gant de données optique de 5DT



86

Applications sportives (biomédicales)

Perfectionnement du geste, du mouvement ou de la technique sportif assisté par ordinateur



87

Applications artistiques

Évaluation du geste artistique

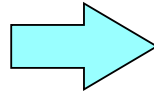
L'acteur virtuel Tarbo-Chan



88

Applications artistiques

- *Capteur magnétique sans fil !*

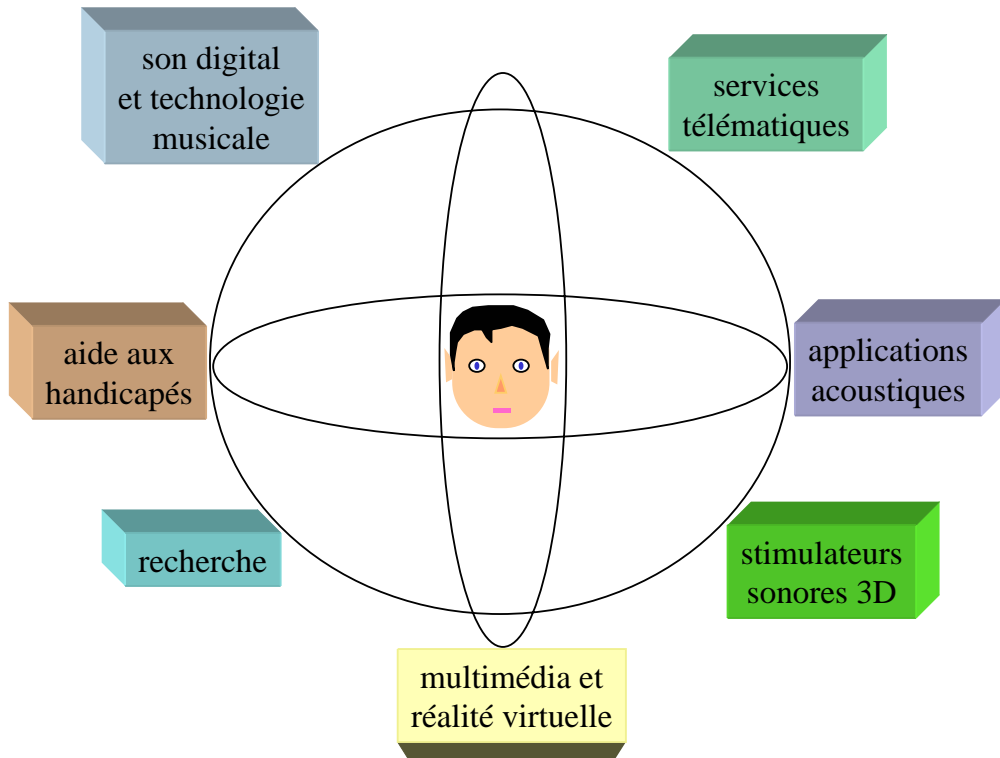


Animation temps réel



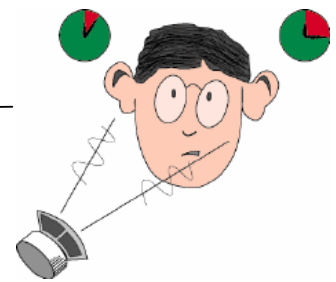
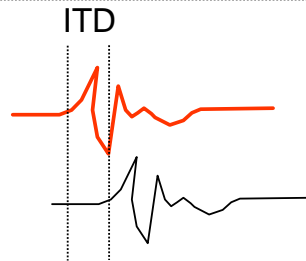
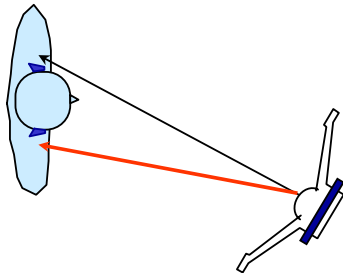
Retour Sonore 3D

Le retour sonore 3D : quelles applications

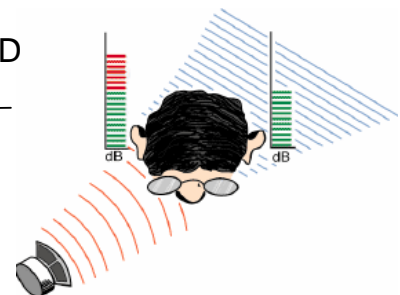
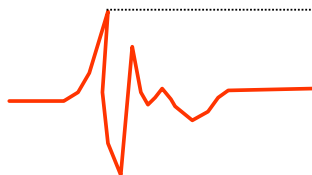
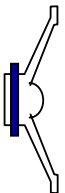


Psycho-acoustique

- Différence de temps intra-aurales (ITD)
Le son arrive plus tôt à l'oreille la plus proche de la source

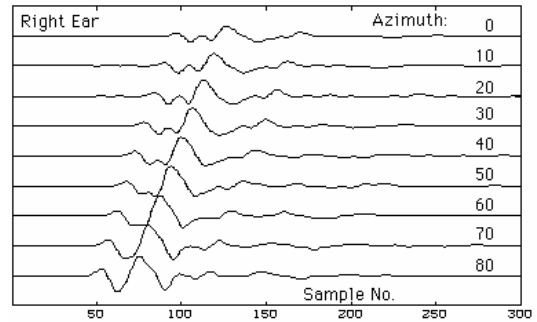
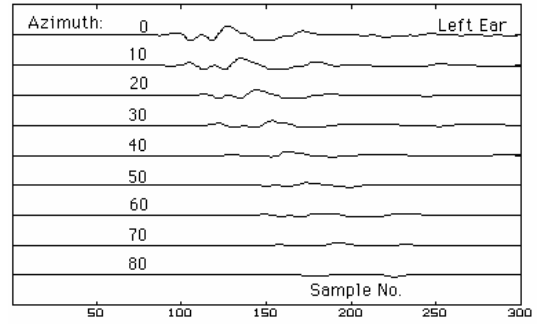
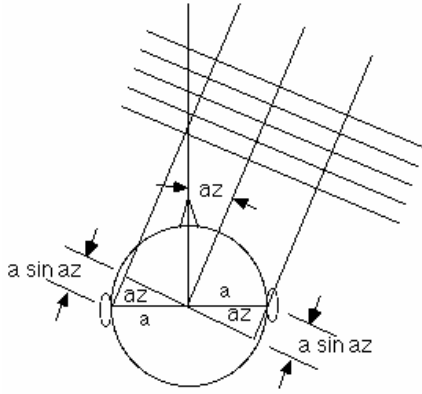


- Différence d'intensité intra-aurales (IID)
Le phénomène d'écran dû à la tête : un son est ressenti avec une plus grande intensité pour l'oreille la plus proche



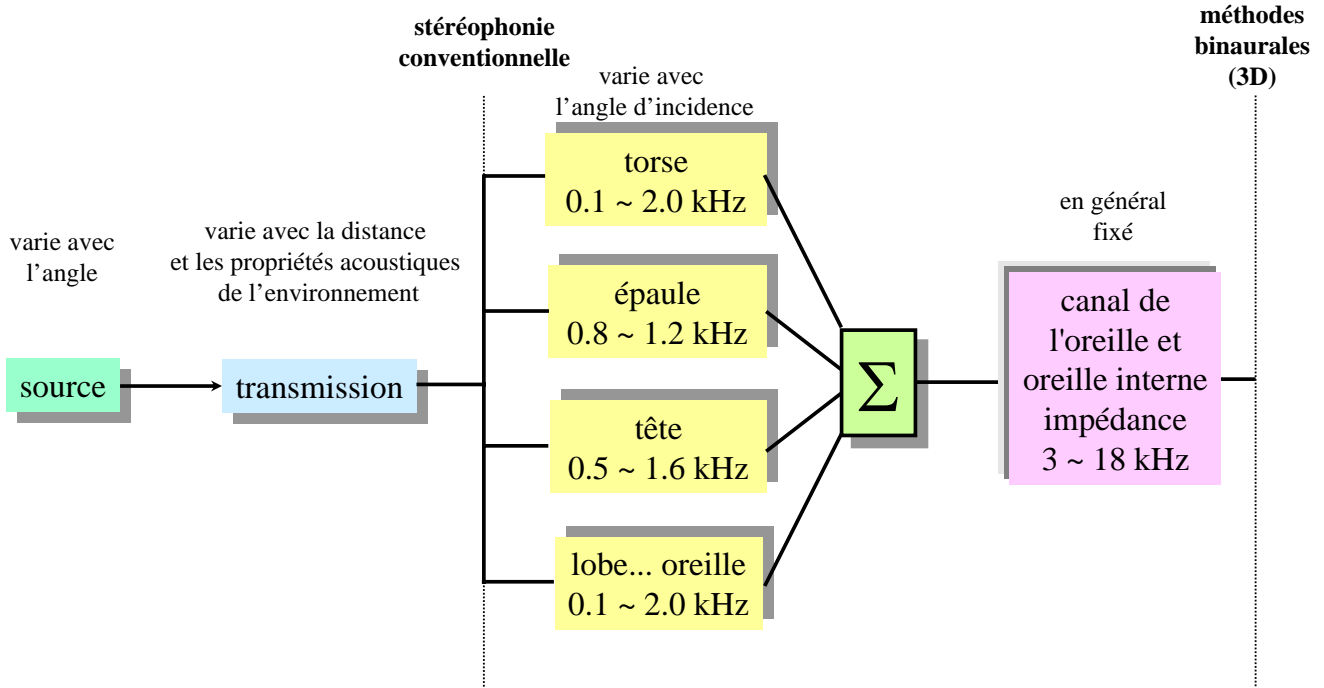
Perception sonore 3D

différence en distance $2a \sin(az)$



Expérimentation faisant apparaître l'ITD et l'IID

Son 3D

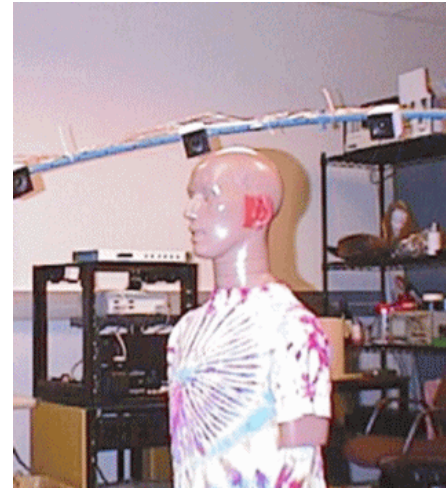
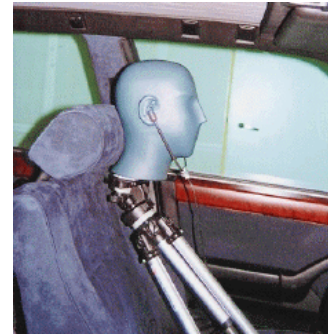


Filtrage spectral de l'oreille externe

- HRTF unique pour chaque source sonore
- HRTF unique pour chaque auditeur
- les différences de phase et d'amplitude dépendent des fréquences

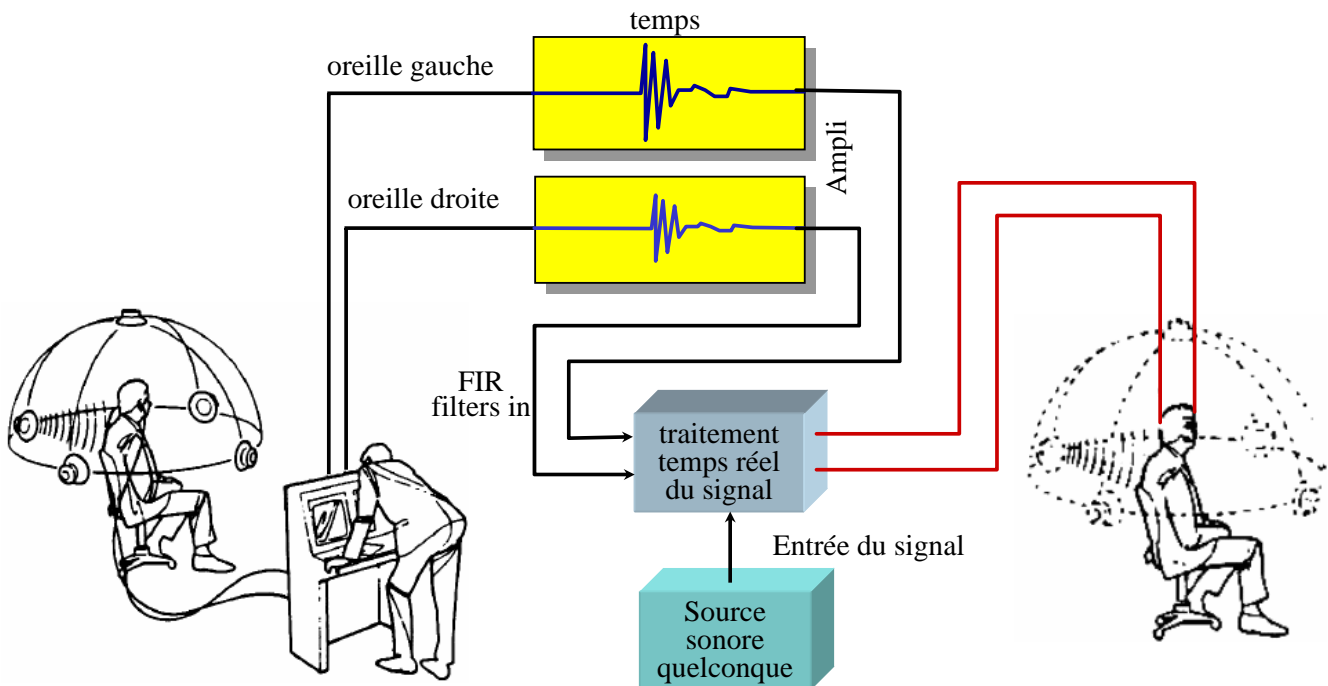
HRTF
Head Related Transfer Function

Dispositifs d'évaluation et d'étude



95

Montage expérimental de la NASA (E.M. Wenzel (1992))



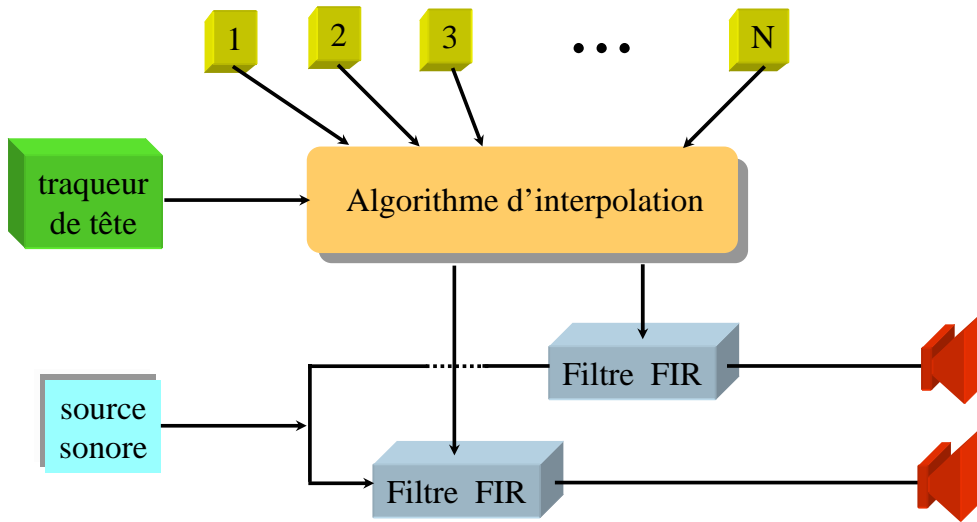
Réponses de l'oreille externe mesurées à l'aide de microphones

Transformées des réponses à l'aide de filtres discrets à réponse impulsionnelle finie (FIR)

Caractéristiques synthétisées

96

Synthèse du HRTF

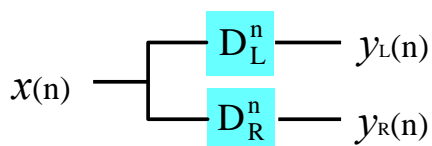


Calcul très complexe avec :

- sources sonores multiples
- prise en compte de propriétés acoustiques réalistes de l'environnement

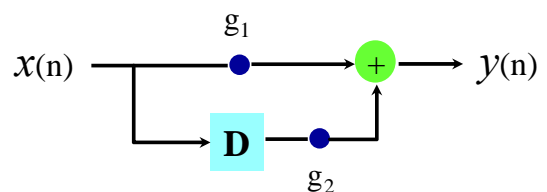
97

Implémentation de l'IID et de l'ITD



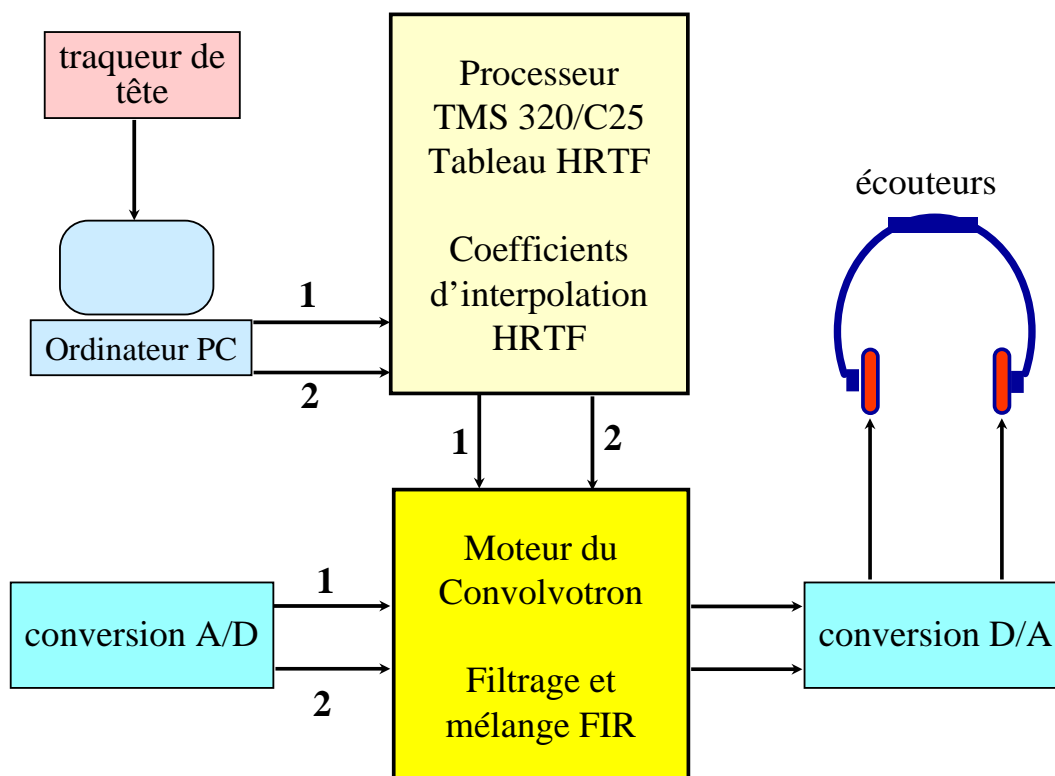
des retards appropriés sont utilisés pour placer la source à la location (position) désirée.

Filtre FIR (simulation de l'environnement)
diverse fonctions de transfert peuvent être implantées
adaptation pour la simulation des murs,
atténuation de l'air, les HRTFs ...



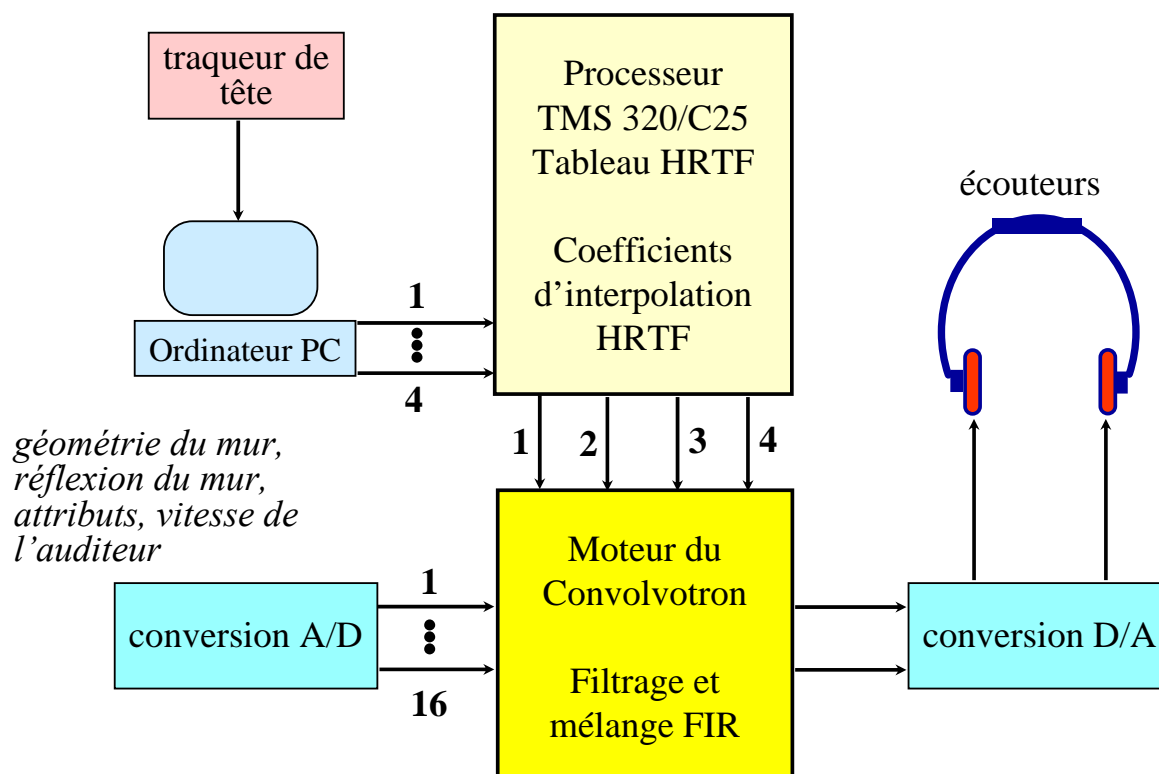
98

Le Beachtron



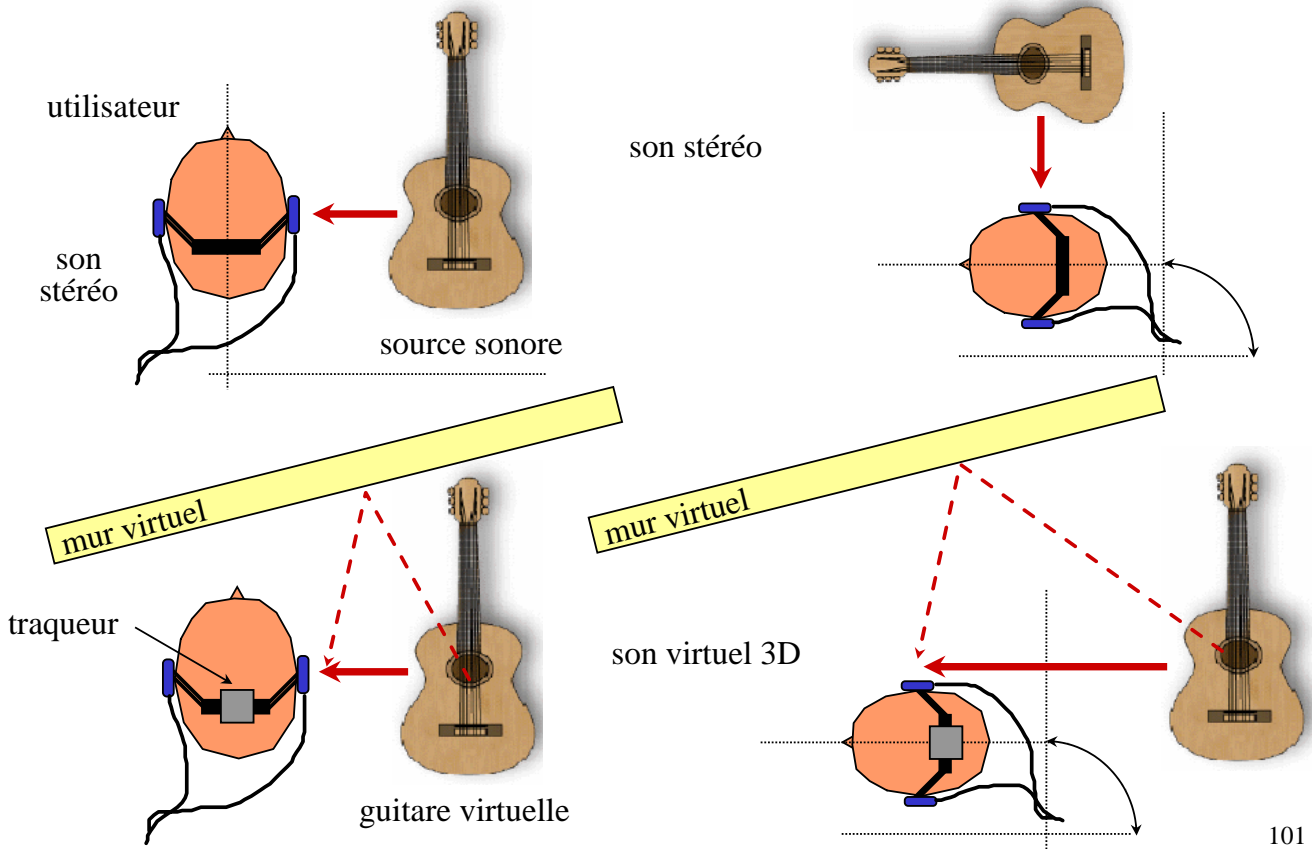
99

L'Acoustetron

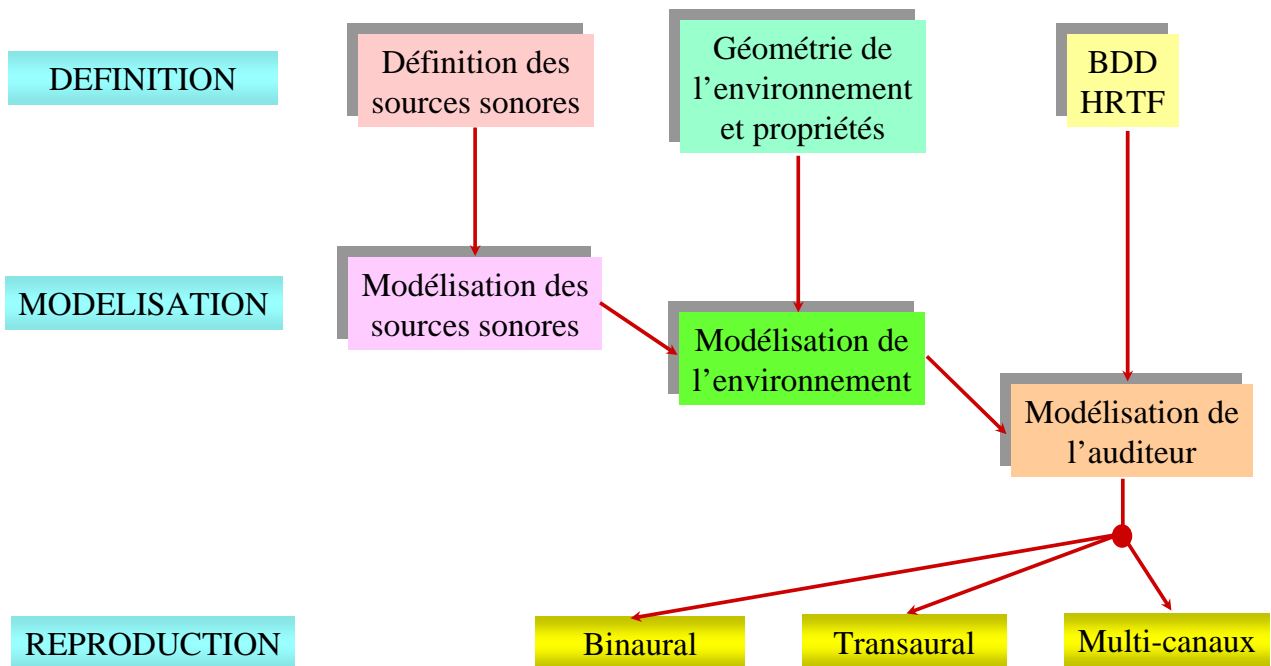


100

Son stéréo et son 3D (implémentation en EV)



Son 3D virtuel

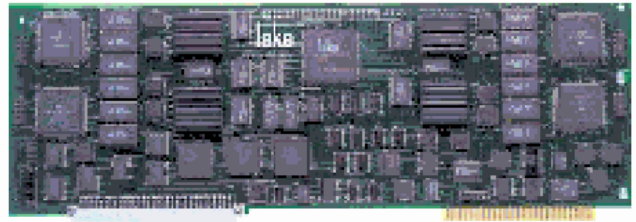


Carte son 3D

- Convolotron (Cristal River Engineering)
 - Prix de sortie 15,000 \$
 - De nos jours les prix ont beaucoup baissé (en 1992 il valait 1,800 \$)
- De nos jours, plusieurs cartes son 3D sont désormais commercialement disponibles.

Exemple :

Four Motorola 560002
40 MHz
12 Mbits DRAM
1.5 Mbits SRAM
256,000 tap FIR implantations



Retour Haptique

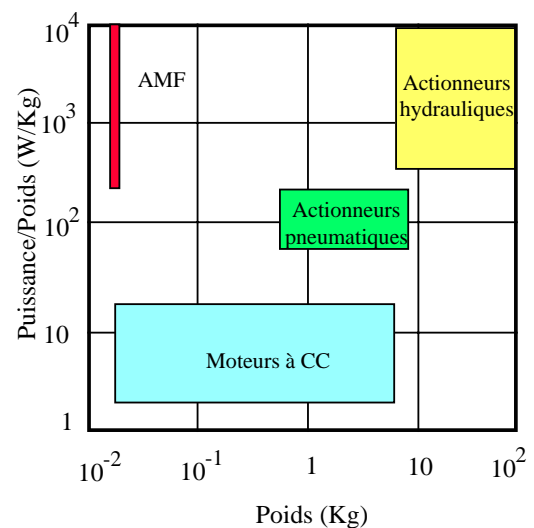
Quelques mots clés

- Manipulation *virtuelle*
 - *interactivité sensori-motrice multimodale*
 - *immersion / présence*
- Perception *haptique*
 - *kinesthésie (forces / mouvements)*
 - *toucher (informations cutanées)*
- Retour *kinesthésique*
 - *appliquer des forces*
 - *contraindre des mouvements*

105

Les actionneurs : l'élément fondamental du retour kinesthésique

- Moteurs électriques
 - les moteurs à courant continu sont de loin les plus utilisés
 - $\tau_{charge} = \tau_m - J_m \dot{\omega}_m - b_m \omega_m \quad \tau_m = Ki$
- Freins magnétiques
 - Avantageux pour la simulation des chocs durs
 - $\tau_b = K_b i_b \quad E_i = \tau_b \omega_b > 0$
- Matériau à Mémoire de forme (AMF)
 - Pour rendre des petites forces
 - le déplacement (force) est lié au courant.
- Actionneurs hydraulique
 - Pas très utilisé
 - $F_{linéaire} = A_p (p_A - p_B) \quad \tau_{rot.} = V_0 (p_A - p_B)$
- Actionneurs pneumatique
 - Amortissement naturel
 - $F_{double_action} = \mu A_p (p_A - p_B)$
- Autres ...



106

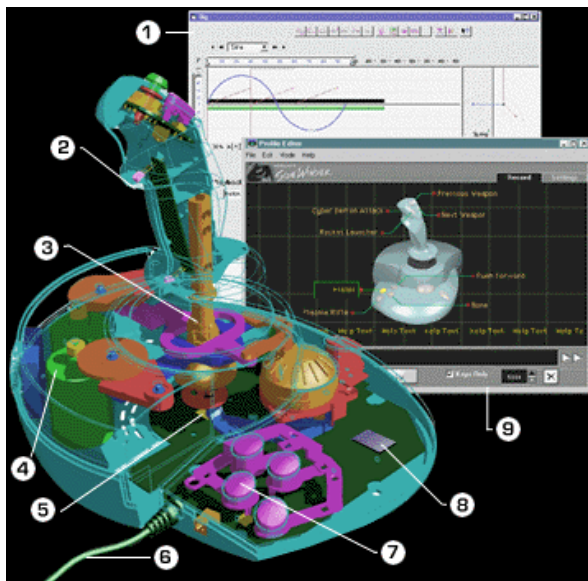
Dispositifs à retour d'effort

- Un assemblage mécatronique actif permettant
 - le transfert d'actions en terme d'effort au sein de l'environnement virtuel
 - la restitution de la réaction (force) issue de l'action (interaction)
 - nécessité d'un actionneur afin de contraindre les mouvements de l'opérateur
- Pour les dispositifs portables
 - ils ne doivent pas contraindre le mouvement de l'opérateur
 - prévoir une compensation du poids !
- Pour les dispositifs non portables
 - Prévoir une astuce pour augmenter l'espace de travail
- Sécurité : l'opérateur travaille selon les axes de puissance.
- Ergonomie
 - Facilité à l'utilisation
 - facilement adaptable d'un opérateur à un autre
- Systèmes basés sur la technologie de la téléopération

107

Joystick à retour d'effort

Joystick force Fx Feedback d'Immersion Corp.



- 1- Logiciel de conception de l'effet.
- 2- Capteur infrarouge pour la main
- 3- Construction résistante
- 4- Moteurs de précision
- 5- Système optique à infrarouge
- 6- Câble de raccordement
- 7- Touches de fonction
- 8- Coprocesseur de force
- 9- Logiciel de paramétrage de jeu

108

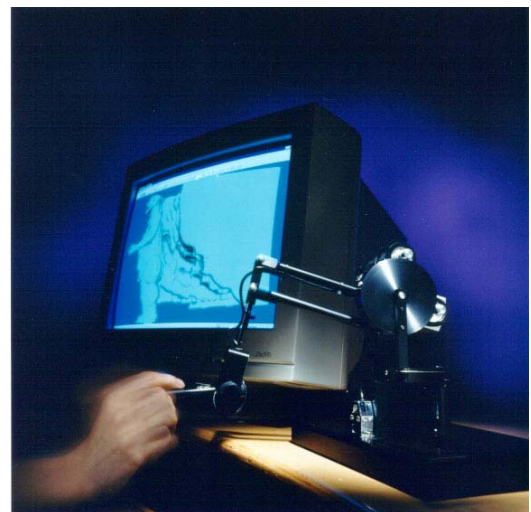
Souris à retour d'effort

- *Commercialement disponibles !*



109

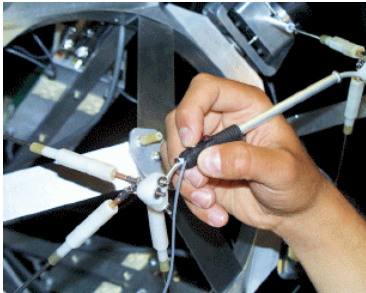
Pointeurs à retour d'effort (Sensible Inc. USA)



Application au sculptage virtuel

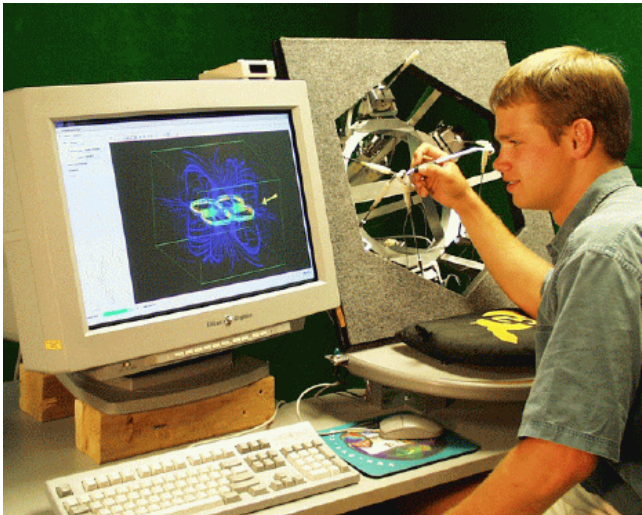
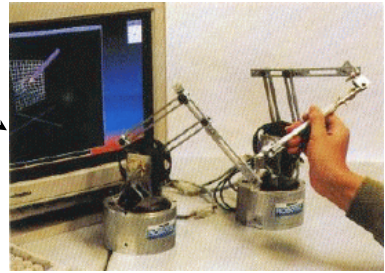
110

Stylos à retour d'effort (*haptisation* de l'information)



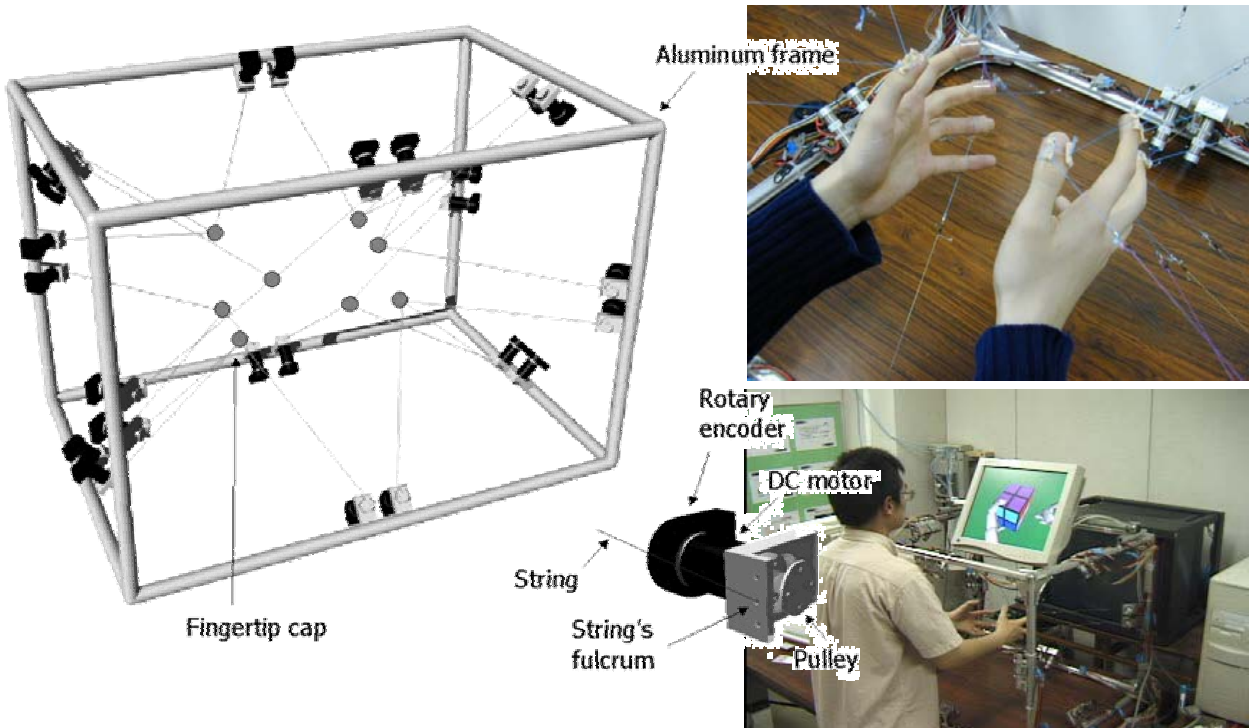
Université de Tsukuba (Japon)

Université de Colorado (USA)



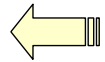
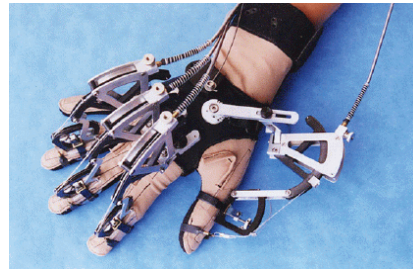
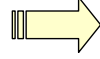
SPIDAR

- SPIDAR : SPace Interface Device for Artificial Reality



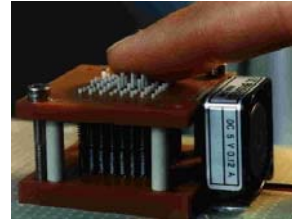
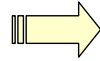
Autres exemples

Gant exosquelette
À retour d'effort



Bras maître

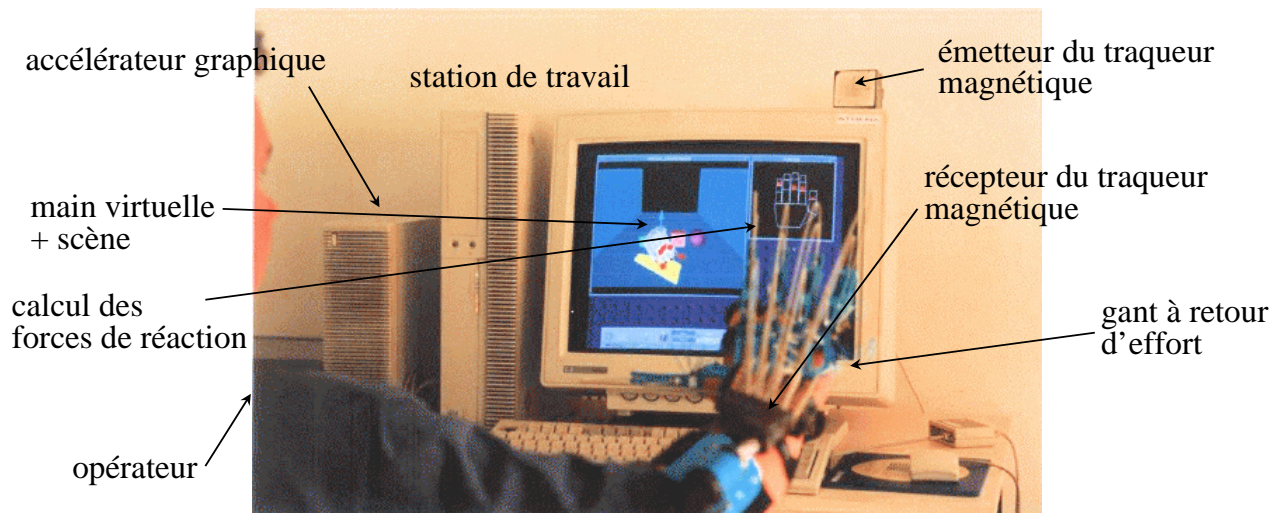
Matrice tactile



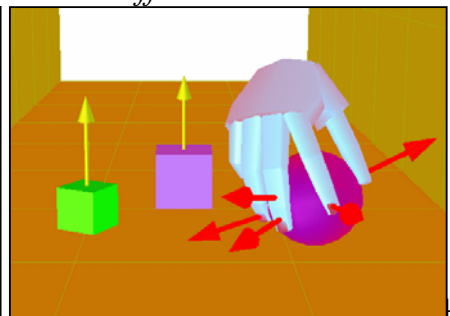
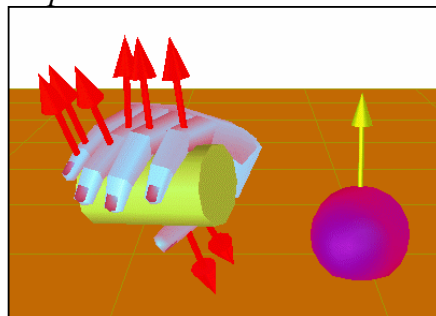
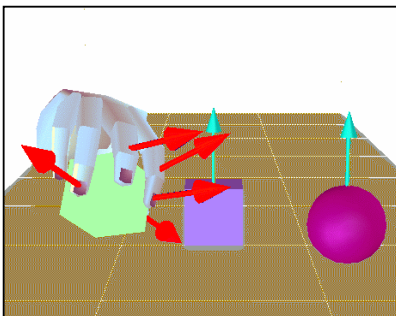
Voir module RV3, thème Réalité Virtuelle

113

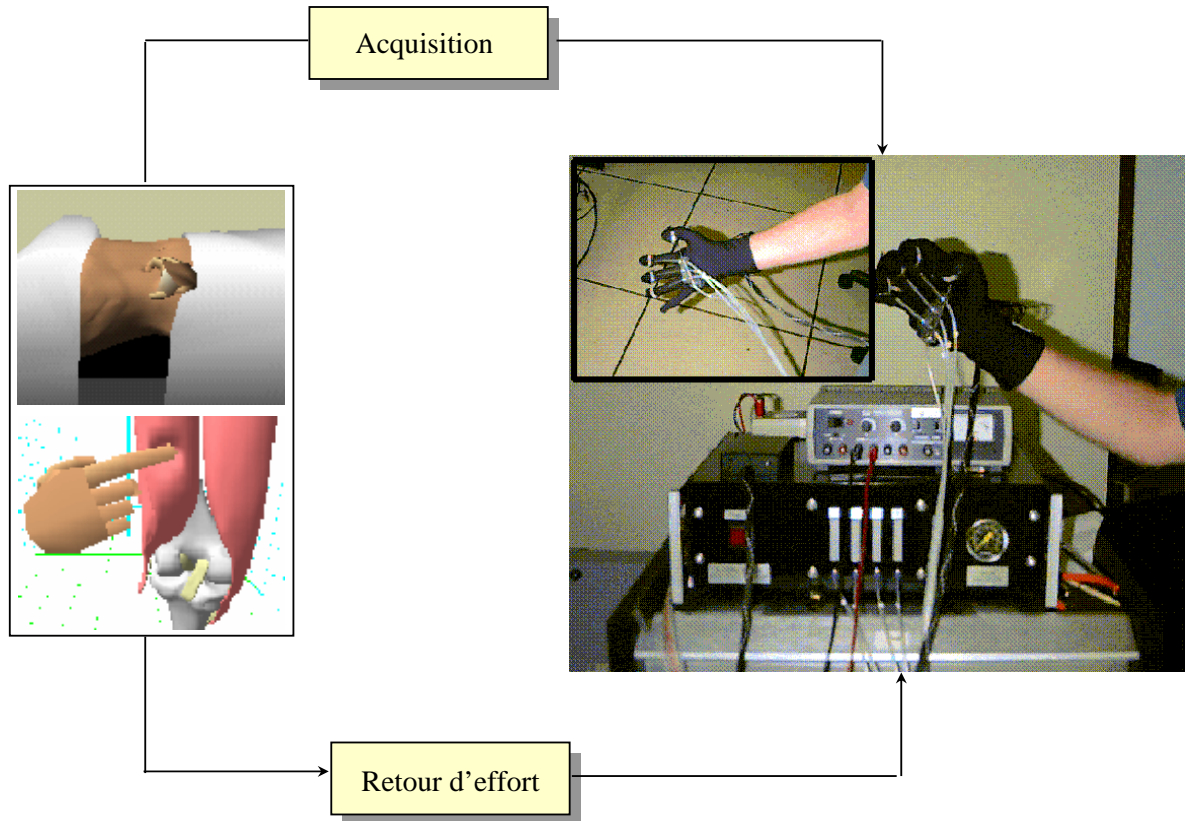
Exemple d'architecture à retour d'effort (LRP - CNRS)



Trois exemples de saisies virtuelles avec retour d'effort



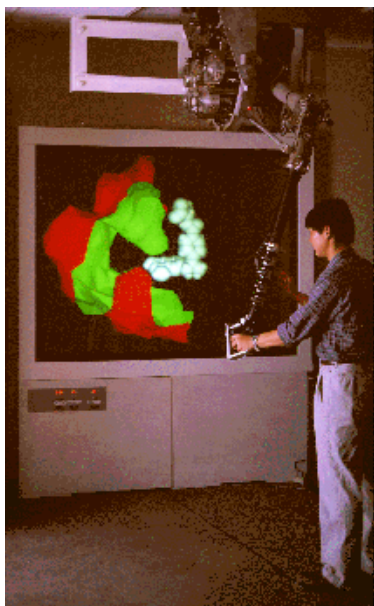
Exemple d'architecture à retour d'effort



115

Applications chimiques

- *Conception de nouvelles molécules : UNC (USA)*



- Sensation des forces
d'interaction moléculaires

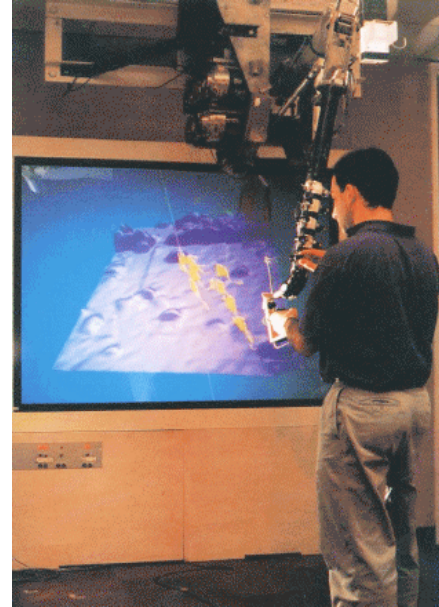
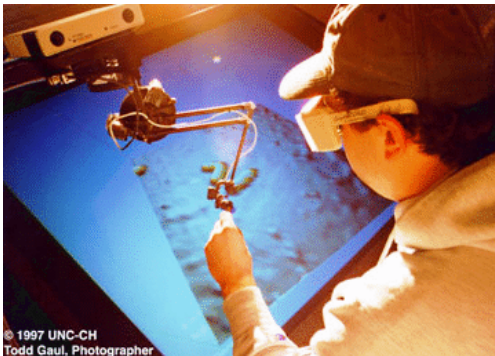


116

Télé Manipulation à l'échelle nanométrique

Sensation des forces :

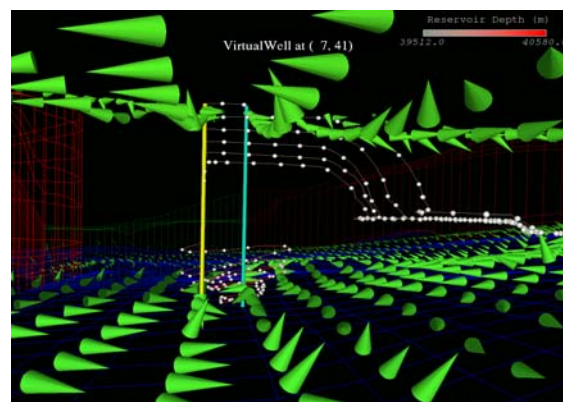
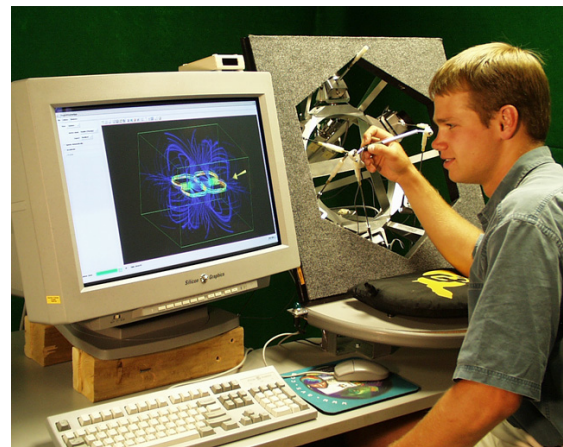
- van der Waals
- Électrostatiques
- Forces capillaires
- etc.



117

Haptisation de l'information

- Utiliser le rendu haptique pour enrichir une information de nature non haptique
- Suppléer le rendu visuel ou sonore quand ces derniers s'avèrent non suffisant
- Aider l'utilisateur à interpréter des données multi-attributs, à appréhender et comprendre des phénomènes complexes (ondes de chocs, divers flux, etc.)



118