

A person is standing in a virtual reality environment, viewed from behind. The environment is a brightly lit, modern interior space with white walls and floors. The person is wearing a dark long-sleeved shirt and dark pants. The background shows a large screen or wall with some text and graphics, including the word 'REALYZ' in a stylized font. The overall scene is dimly lit, with the primary light source being the virtual environment's lighting.

# FONDEMENTS DE LA RÉALITÉ VIRTUELLE

## 2 - CANAUX SENSORI-MOTEURS ET INTERFACES

**ensiie**  
école nationale supérieure d'informatique  
pour l'industrie et l'entreprise

**ibiSc**

**université  
evry**  
val-d'essonne

**université  
PARIS-SACLAY**

[guillaume.bouyer@ensiie.fr](mailto:guillaume.bouyer@ensiie.fr)

[www.ensiie.fr/~bouyer/](http://www.ensiie.fr/~bouyer/)

# Canaux et interfaces ?

---

Systèmes de RV permettent à un ou des utilisateurs d'être immergés et d'interagir (i.e. agir et percevoir) naturellement dans un environnement 3D pour y réaliser des tâches

-> Comprendre le **fonctionnement sensori-moteur humain**

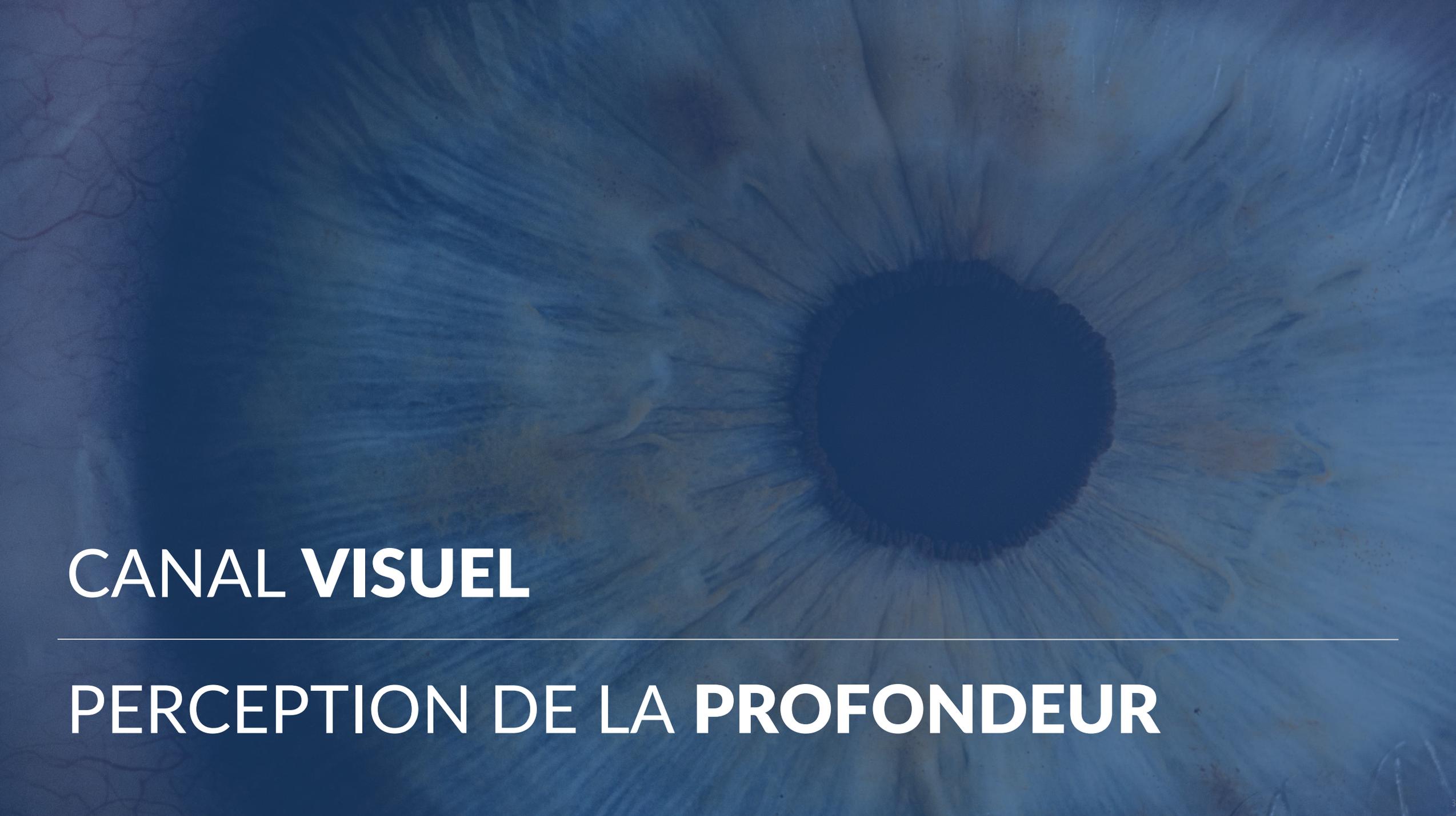
Vision, audition, proprioception...

Capacités, limites

-> Connaitre les **interfaces et techniques de RV** associées à ces canaux

Écrans, stéréoscopie, rendu haptique, capteurs, commandes...

Techniques d'interaction (cours 3)



**CANAL VISUEL**

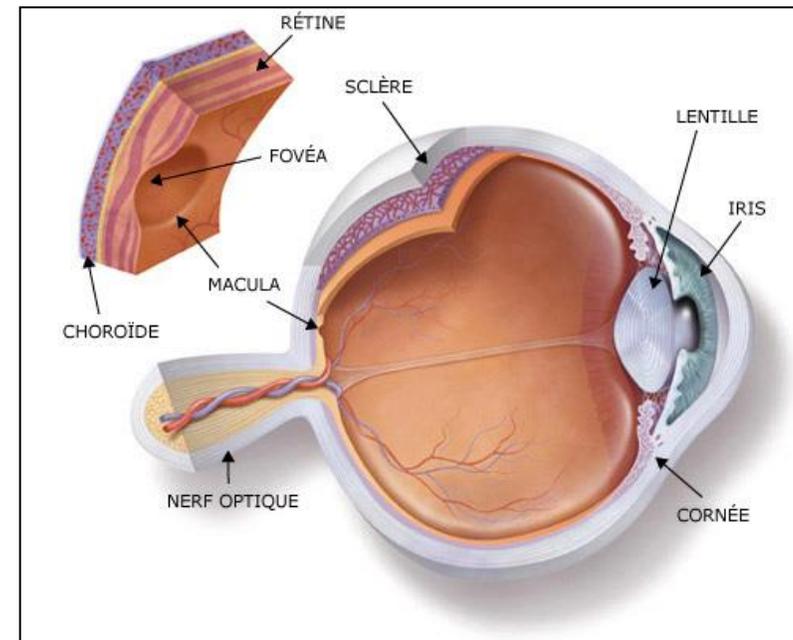
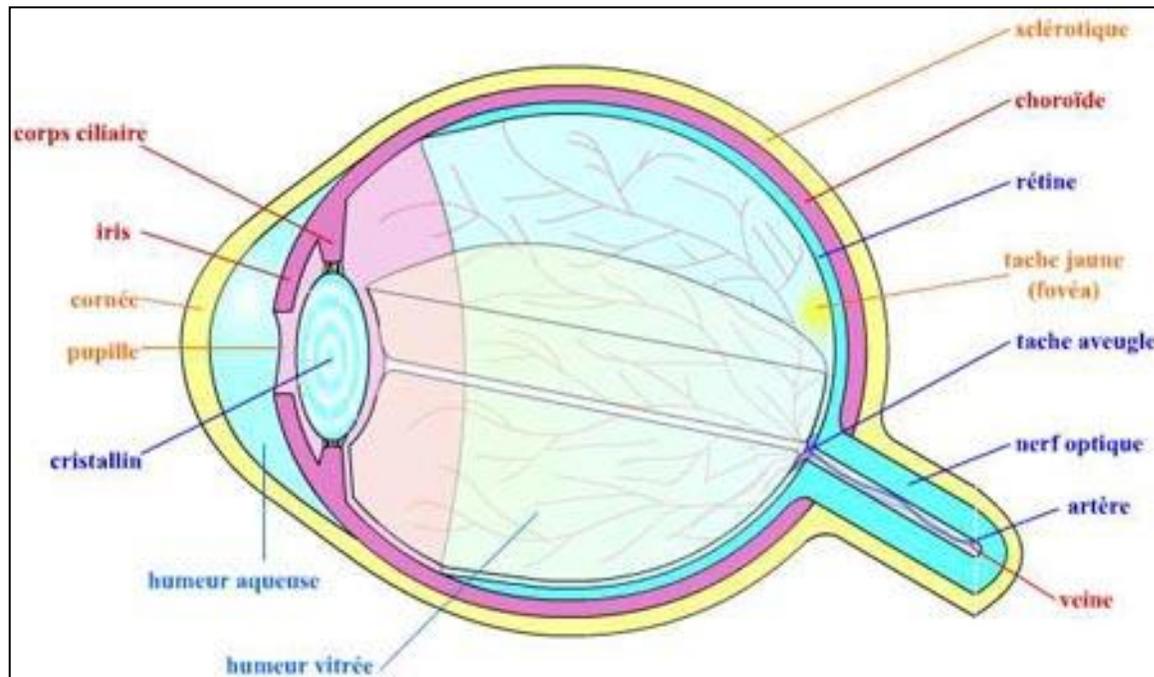
---

**PERCEPTION DE LA PROFONDEUR**

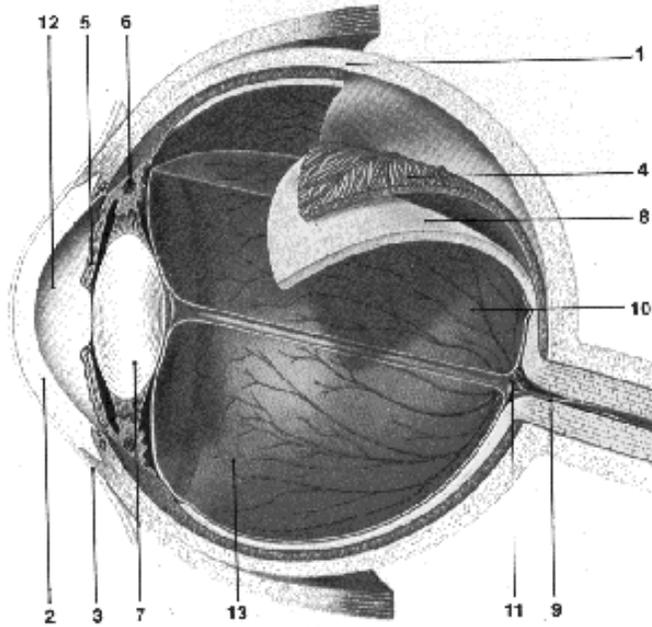
# L'œil humain

Canaliser la lumière émise ou réfléchiée par un objet pour créer une image nette qui s'imprime sur la rétine (partie de l'œil couverte de récepteurs sensoriels)

Succession de milieux transparents qui jouent le rôle d'une lentille convergente, dont la focale globale peut varier par modification de la courbure du cristallin



# L'œil humain



Sclérotique : enveloppe fibreuse avec les muscles moteurs au dessus et en dessous.

Cornée : dans la continuité de la sclérotique

Conjonctive : intérieur de la paupière

Choroïde ou Uvée : zone vasculaire qui irrigue l'extérieur de la rétine

Iris: extension du procès ciliaire

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.

Cristallin : change de forme grâce aux muscles du procès ciliaire

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

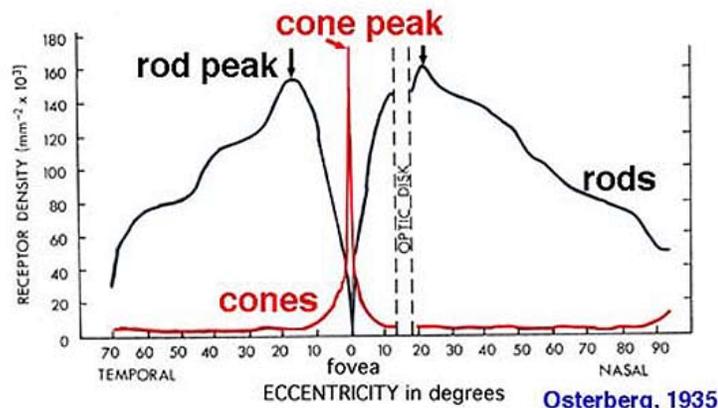
Nerf optique + artère centrale de la rétine

Fovéa : zone de concentration des cônes

Point aveugle : zone de convergence des axones qui constituent le nerf optique, il n'y a plus de cellules sensorielles à cet endroit

Humeur Aqueuse : sécrétée par les procès ciliaires

Corps vitré : masse gélatineuse non renouvelée.



# Caractéristiques de la vision

Sens complexe et prépondérant

70% des récepteurs sensoriels sont dans les yeux

Champ visuel - yeux immobiles :

↔ 90° tempe - 45° nez

↕ 45° haut - 70° bas

Champ visuel - tête mobile :

↔ 200° tempe - 130° nez

↕ 140° haut - 170° bas

Acuité visuelle

Fente éclairée sur fond noir : 30" d'arc

2 points clairs sur fond noir : 1' d'arc

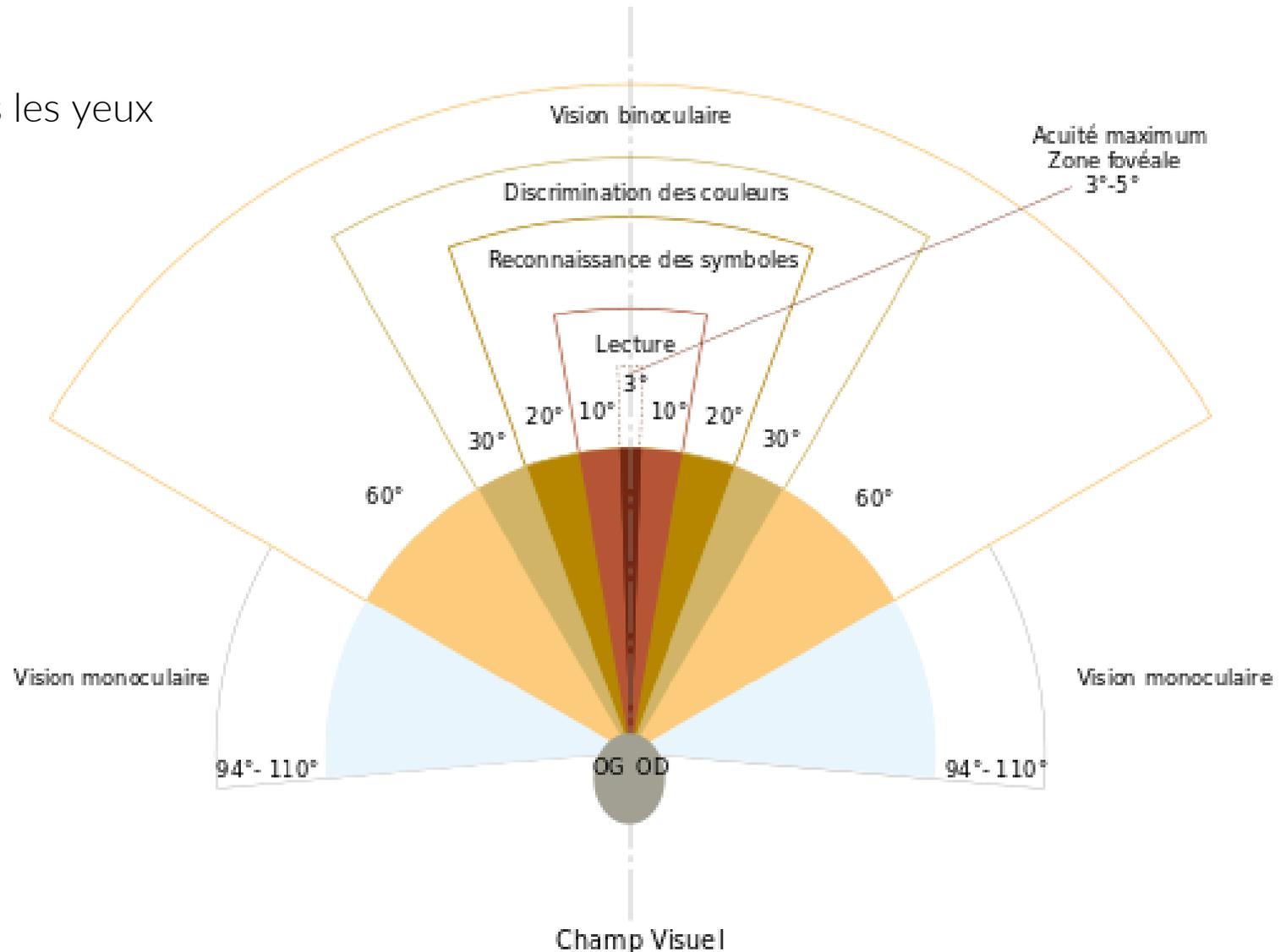
2 points noirs sur fond clair : 2' d'arc

Couleurs

Entre 2 et 8 millions

Persistance rétinienne

1/30ème à 1/50ème de seconde

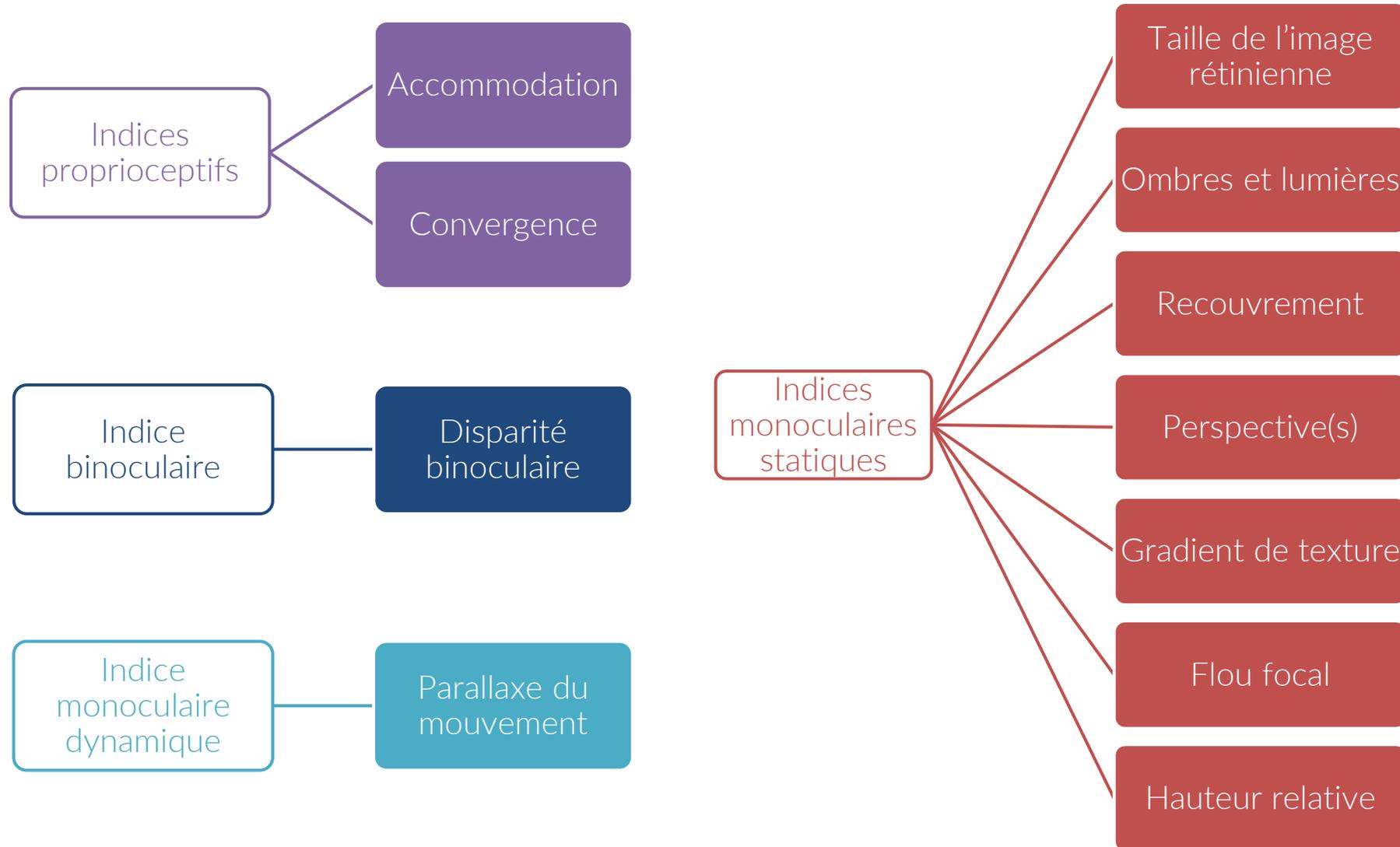


# Perception de la profondeur

---

Quels indices ?

# Perception de la profondeur



# Indices proprioceptifs

---

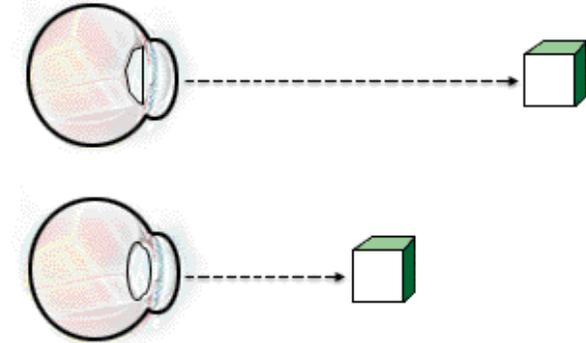
Indices retournés par les **muscles oculomoteurs et le cristallin** sans prendre en compte les images projetés sur les rétines

**Accommodation et convergence** sont fortement couplés et fiables à faible distance ( $< 0,5$  m)

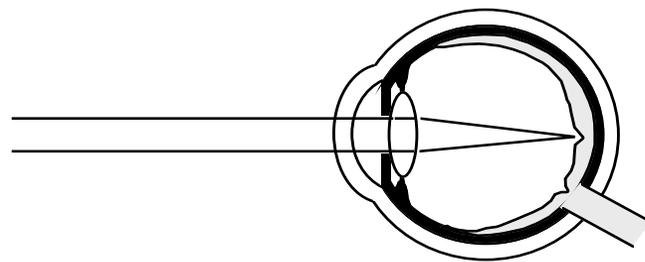
# Accommodation

Ajustement de la **longueur focale du cristallin**

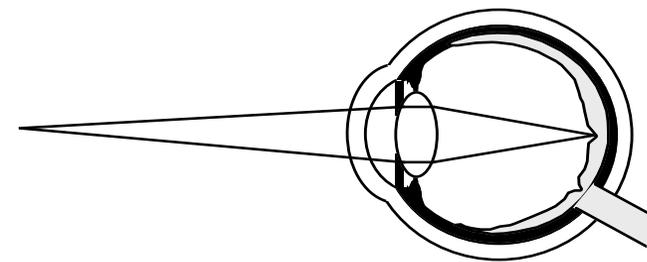
Capacité de l'œil à mettre au point automatiquement (i.e. à déplacer le plan de focalisation) sur des objets proches ou éloignés, permettant d'assurer la netteté des images



© CCRS / CCT



accommodation à l'infini



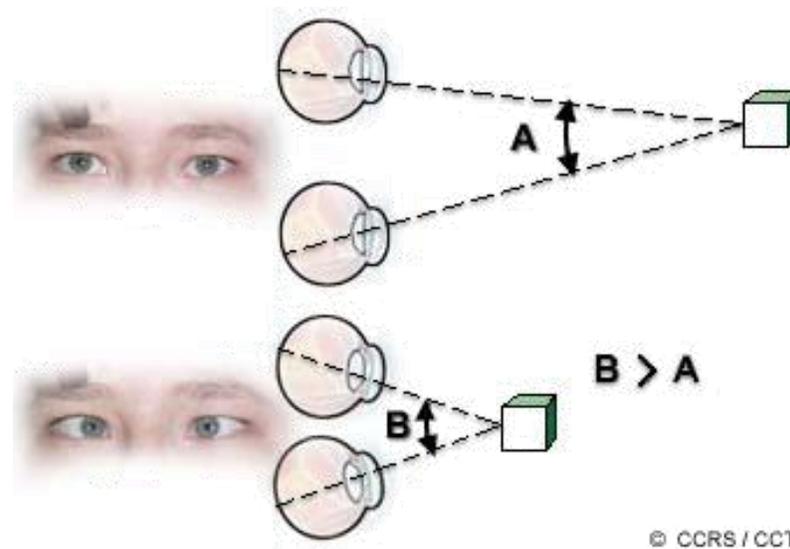
accommodation à courte distance

# Convergence

Angle parallaxique formé par l'axe optique de chaque œil convergeant sur un objet donné

Dépend de la distance entre l'objet et les yeux.

Inopérante au-delà de 10m : aux grandes distances, l'angle parallaxique diminue et la perception de profondeur devient de plus en plus difficile.



© CCRS / CCT

# Indices monoculaires

---

Perceptibles avec 1 seul œil

**Qualitatifs** : permettent de positionner les objets d'une même scène les uns par rapport aux autres

Indices **dynamiques**

Accessibles sur une séquence temporelle d'images

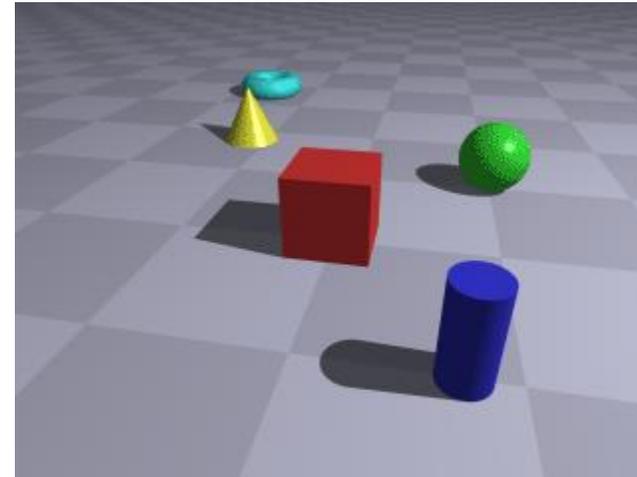
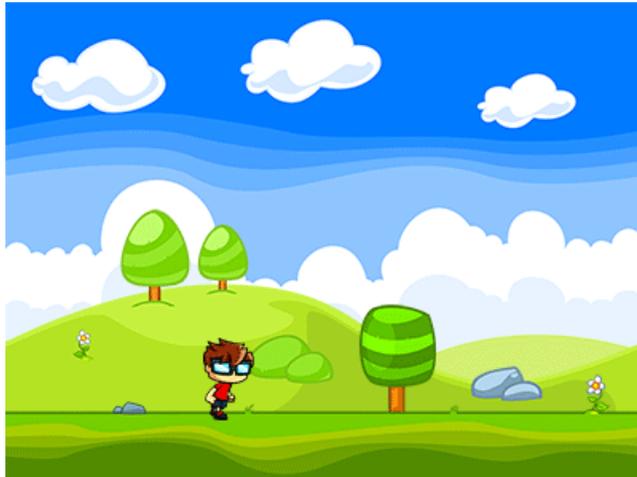
Indices **statiques**

Accessibles sur une image fixe

# Parallaxe de mouvement

Résultat du **changement de position** d'un objet dans l'espace, soit à cause du mouvement même de l'objet, soit à cause du déplacement de la tête de l'observateur

La perception de profondeur est liée à la vitesse à laquelle l'image d'un objet défile sur la rétine. Les objets éloignés paraissent se mouvoir lentement par rapport aux objets rapprochés, même si les deux se déplacent à la même vitesse

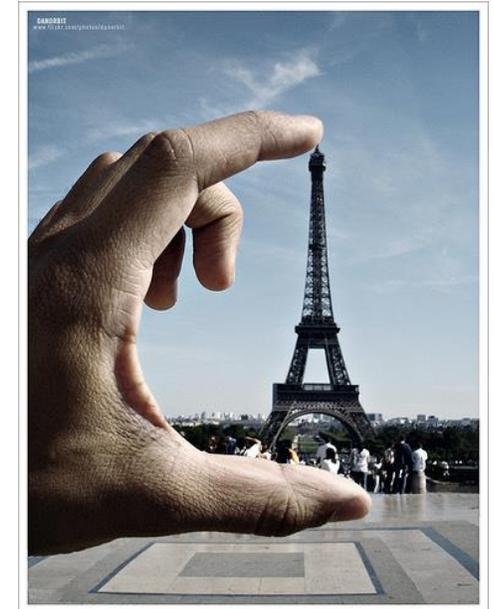
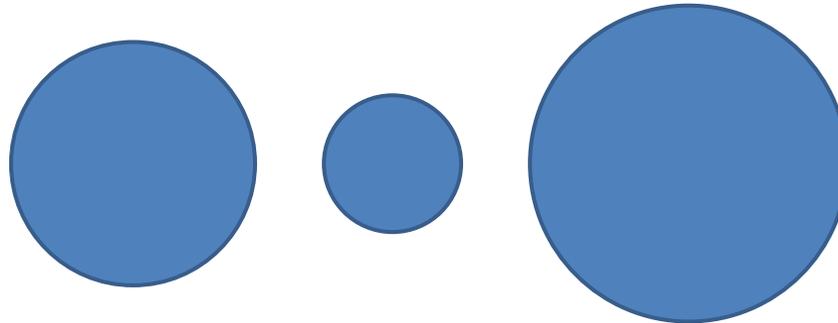


# Taille de l'image rétinienne

Plus l'image d'un objet est grande, plus l'objet semble près

Référence à des objets de dimensions connues pour évaluer la distance

Pour des objets de dimensions semblables : celui qui projette la plus petite image sur la rétine est interprété comme le plus lointain

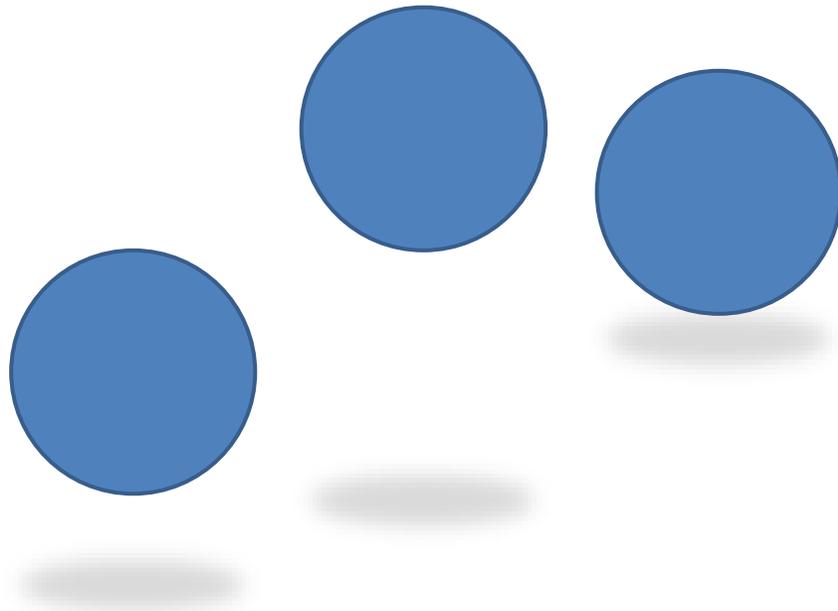


# Ombres et lumières

Ombre portée : ombre qu'un objet produit sur une surface

La localisation de l'ombre sur la surface indique la distance de l'objet

L'écart sur la surface de la scène entre un objet et son ombre indique sa distance à la surface

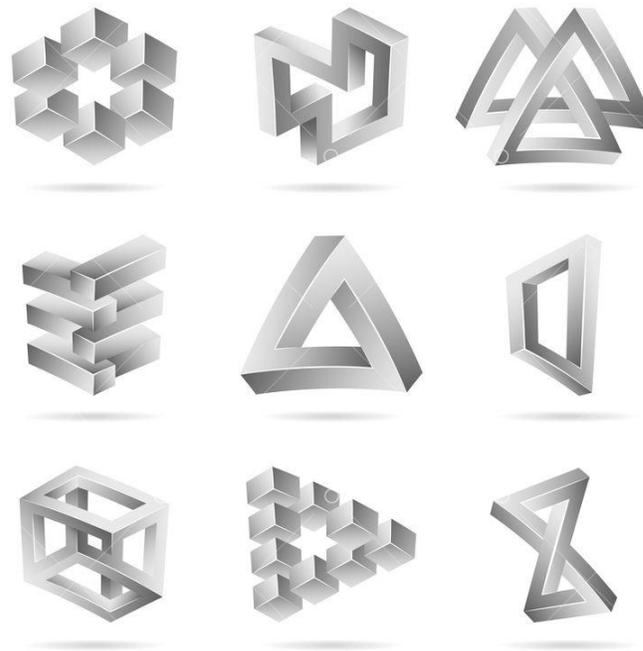
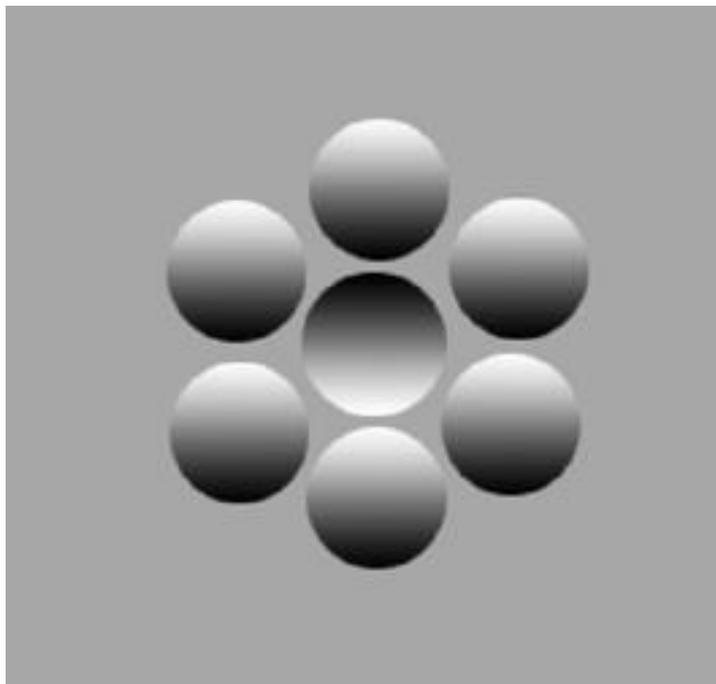


# Ombres et lumières

Ombrage : ombre qu'un objet produit sur lui-même

Meilleure perception de la forme

Impression de convexité ou de concavité due au fait que la majeure partie de l'éclairage provient du haut

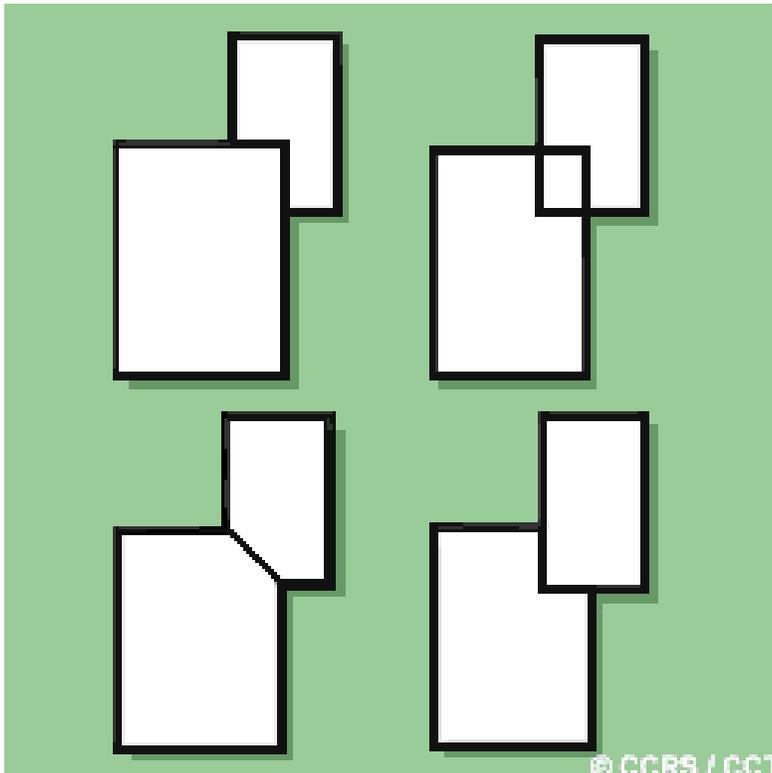


# Recouvrement

Survient lors d'une **occultation partielle ou totale** d'un objet par un autre

Les contours continus semblent plus près de l'observateur

On en déduit que l'objet caché est plus ou moins loin



# Perspective linéaire (ou conique)

Réduction progressive de la taille de l'image à mesure que la distance de l'objet augmente



# Perspective linéaire (ou conique)

Utilisée par la vision naturelle

Projection selon un faisceau de droites passant par un même point (l'observateur) sur la surface d'affichage

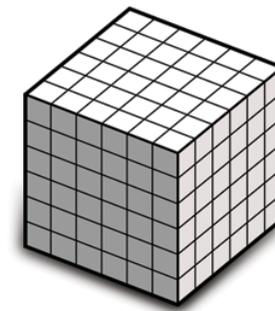
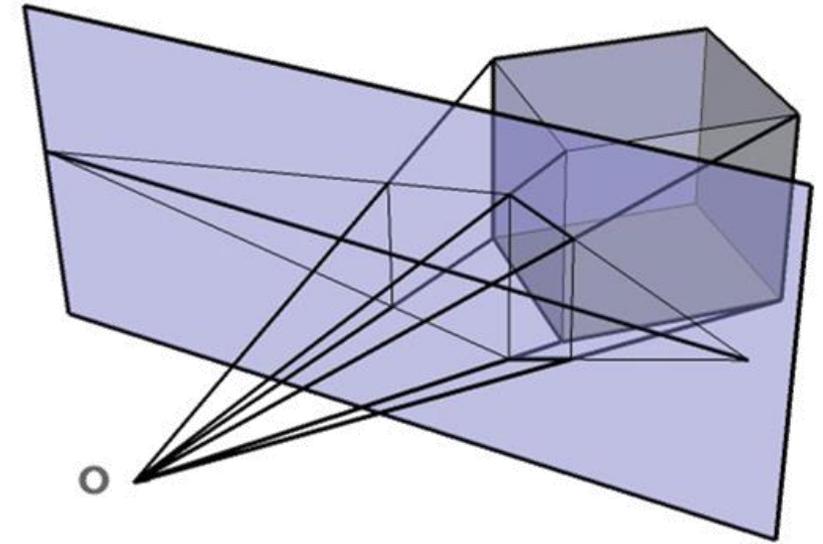
En pratique :

- points de fuite pour tracer les directions

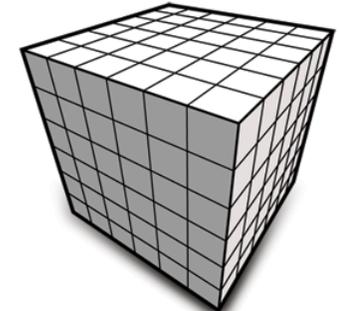
- la représentation des distances se raccourcit au fur et à mesure que l'objet s'éloigne de l'observateur

Perspective dominante dans le domaine artistique

Ce mode de projection est la règle de base pour percevoir le relief sur un écran monoscopique



isometric projection



perspective projection

# Perspective linéaire (ou conique)

Indices monoculaires  
statiques



# Perspective aérienne

Indices monoculaires  
statiques

Variation de visibilité selon la distance (diffusion atmosphérique)



# Gradient de texture

Type de perspective sur le degré de rugosité d'un objet uniforme à mesure qu'il s'éloigne

Tient compte des variations de densité, de taille et de forme, de la projection sur la rétine des motifs texturaux qui recouvrent les objets

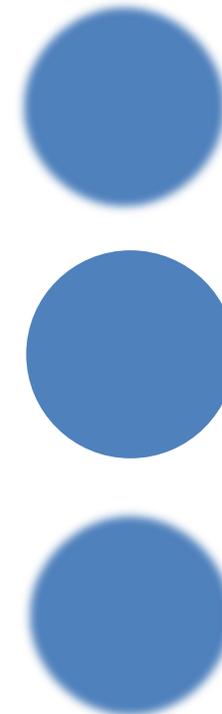
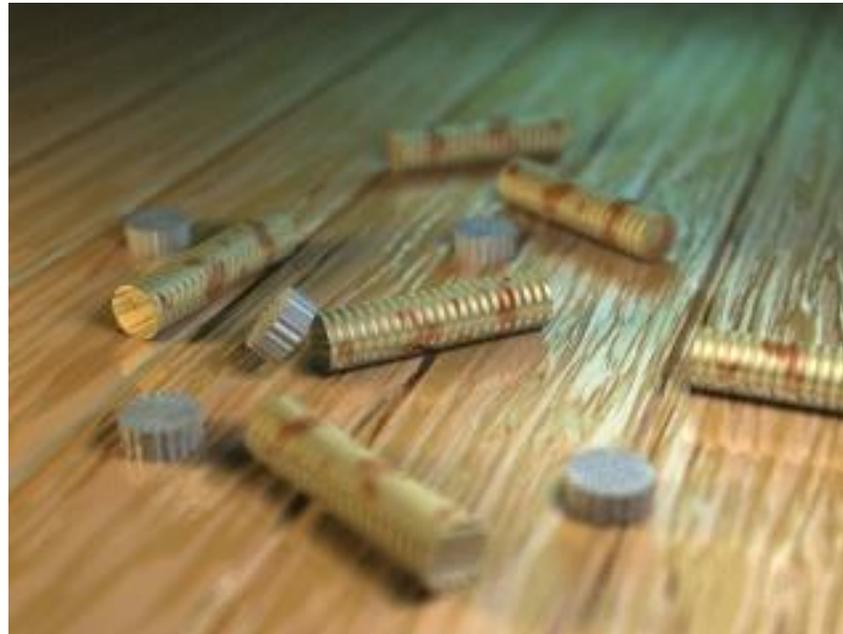
Permet d'obtenir facilement une estimation des distances relatives ou absolues

Fiable quelle que soit la distance



# Flou focal

Lié à la profondeur de champ : image nette sur le point de convergence

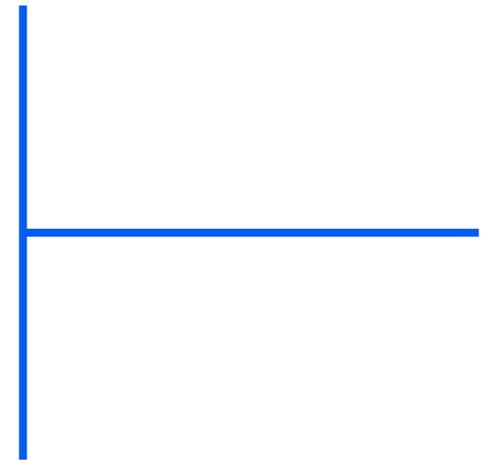


# Hauteur relative

---

En dessous de l'horizon : les objets les plus hauts dans le champ de vision apparaissent plus loin

Au dessus de l'horizon : les objets les plus hauts apparaissent plus près



# Indicateurs psychologiques

Indices monoculaires  
statiques

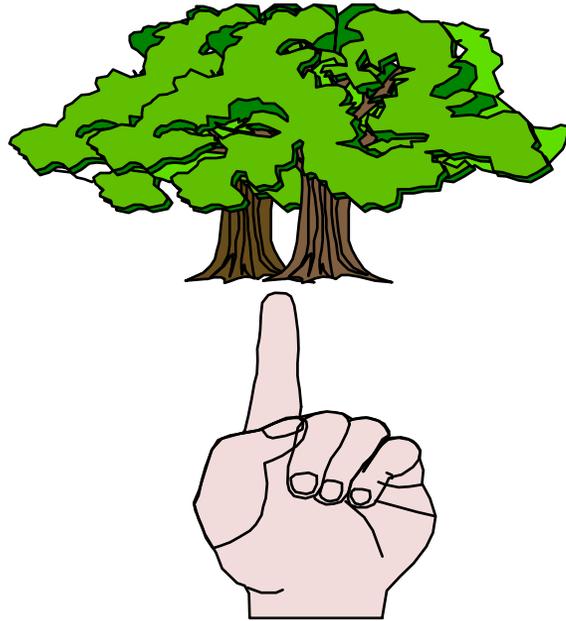
**Acquis** (non innés) : prennent de l'importance avec l'expérience

Lorsqu'ils sont **combinés**, ces indicateurs accroissent grandement la perception de la profondeur.

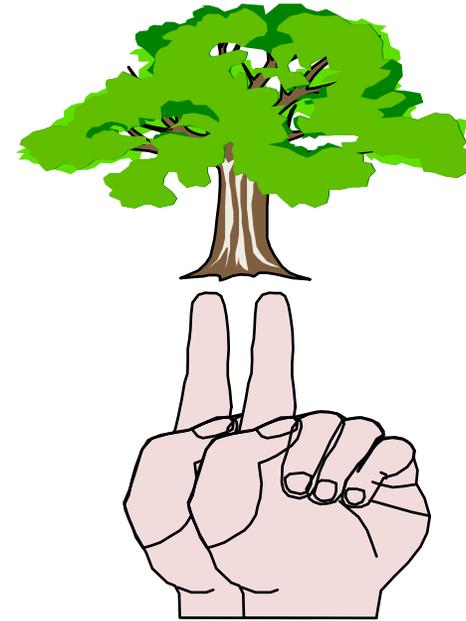


# Vision stéréoscopique

Indice  
binoculaire



Point de fixation sur le doigt



Point de fixation sur l'arbre

# Vision stéréoscopique

Disparité (ou parallaxe) binoculaire entre les images droite et gauche d'un même objet formées sur chaque rétine

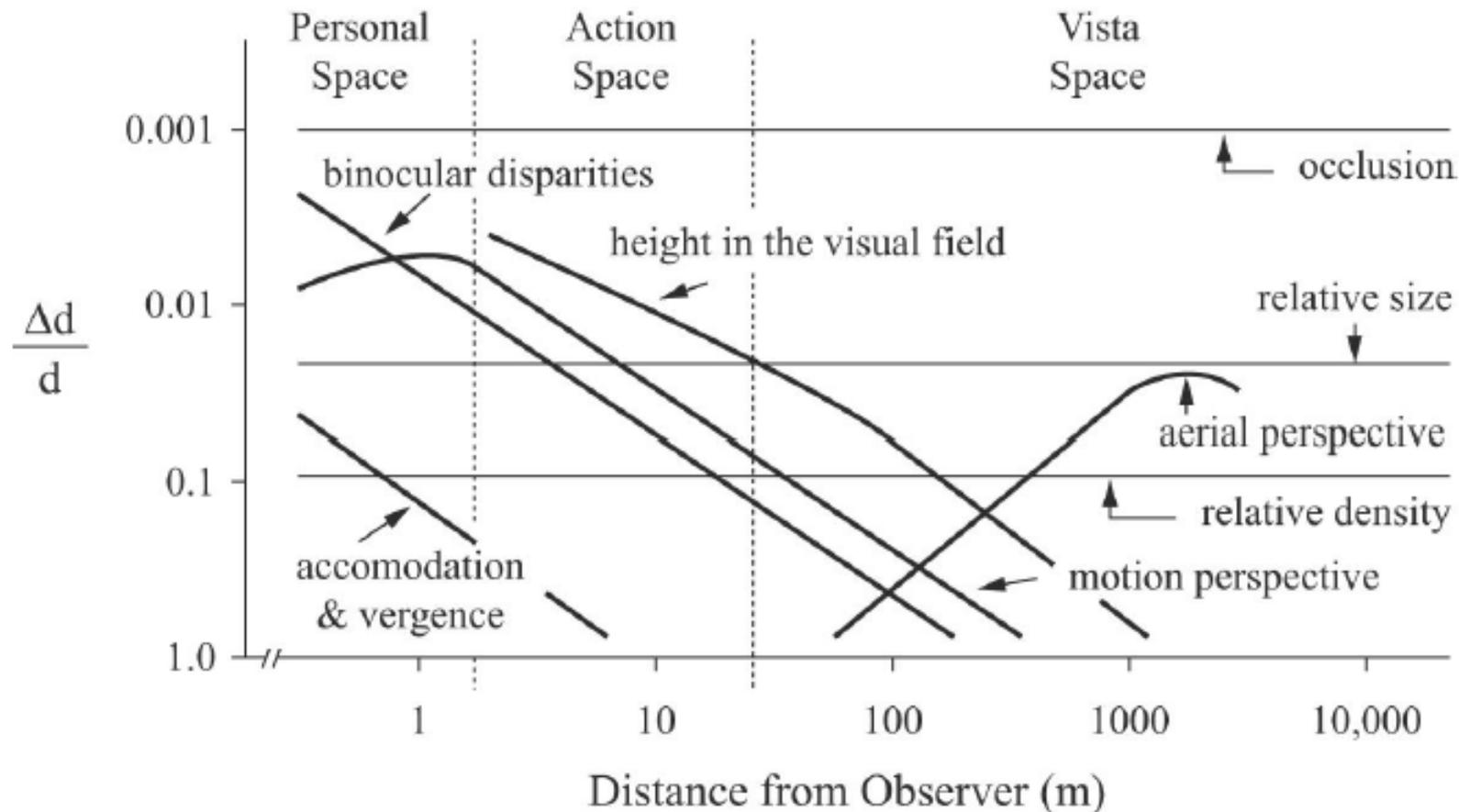
Indicateur le plus important pour la vision sur des distances moyennes

Quantitatifs : permettent une évaluation métrique de la distance entre les objets

Inconvénient en RV : contraintes techniques et fatigue oculaire



# Fiabilité selon la distance



**Figure 3.8** The relative importance of depth cues at different distances, adapted from Cutting et al. (1995).

Source: J. J. Laviola, E. Kruijff, R. P. McMahan, D. A. Bowman, and I. Poupyrev, *3D User Interfaces, Theory and Practice (2nd edition)*. Addison-Wesley, 2017.

A close-up photograph of a person's face, centered on their eyes. They are holding a white stereoscope in front of their eyes. The stereoscope has two rectangular openings. The left opening shows a red rose, and the right opening shows a blue rose. The person's hands are visible on the right side, holding the edges of the stereoscope. The entire image has a semi-transparent blue overlay.

**STÉRÉOSCOPIE**

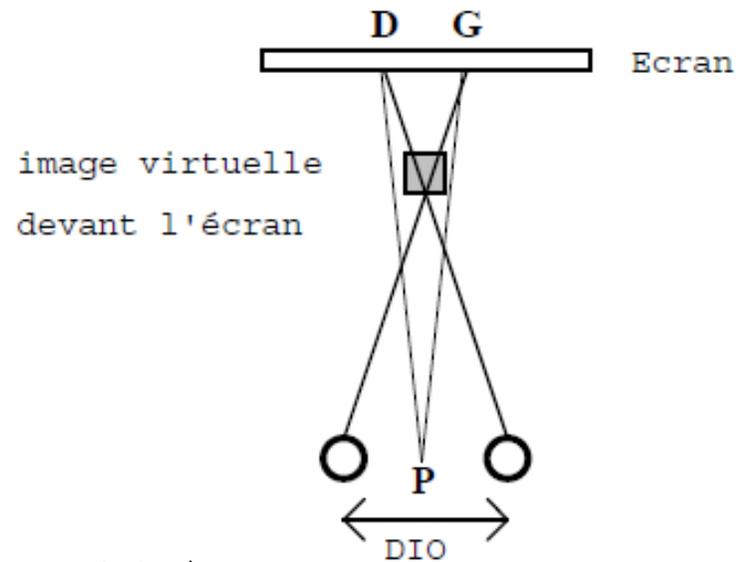
---

**ET AUTRES RENDUS VISUELS**

# Stéréoscopie

Créer sur un écran deux images correspondant à chaque œil. Chacun perçoit une image similaire à celle d'une vision spatiale réelle.

Met en défaut la relation accommodation-convergence : les axes optiques convergent vers l'objet virtuel tandis que les yeux s'accommodent sur l'écran



DIO = distance inter-oculaire ( $\approx 65\text{mm}$  pour l'homme adulte)

La distance entre deux points homologues est appelée [parallaxe](#). Elle est définie par l'angle DPG et dépend de la distance objet-écran

# Stéréoscopie

---



# Parallaxe stéréoscopique

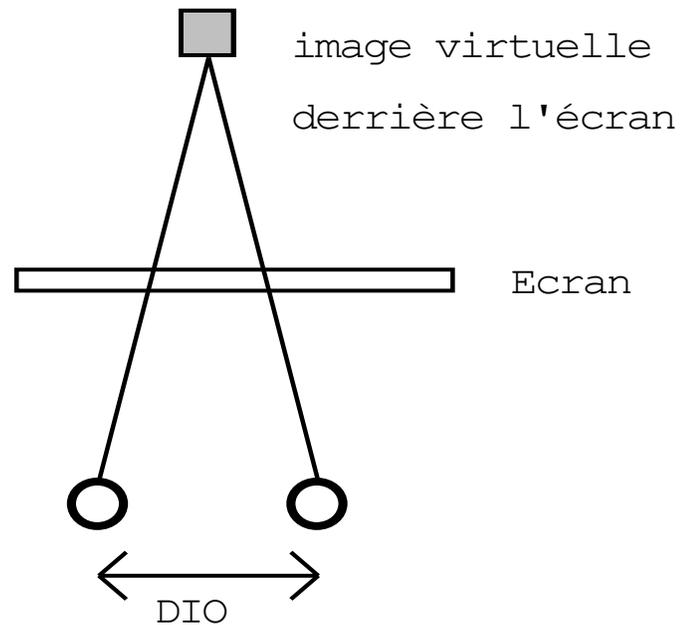
---

Dépend de la distance entre l'objet virtuel et l'écran

Positive

Objet derrière l'écran

Points homologues D et G affichés à D et à G



# Parallaxe stéréoscopique

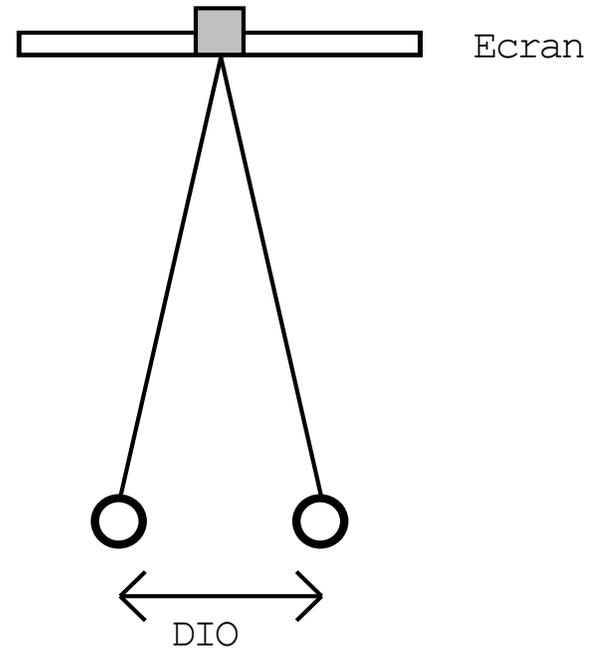
---

Nulle

Objet au niveau de l'écran

Points homologues affichés au même endroit

image virtuelle  
au niveau de l'écran



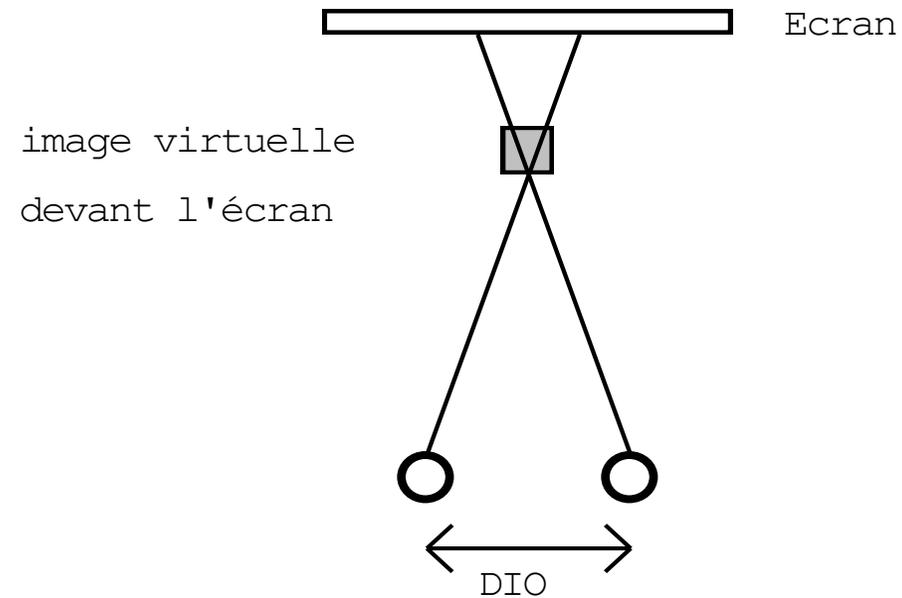
# Parallaxe stéréoscopique

---

## Négative

Objet devant l'écran

Points homologues D et G affichés à G et à D





# Contraintes stéréoscopiques

---

Perturber le moins possible la relation entre convergence et accommodation

=> créer des images en relief avec un faible parallaxe tout en gardant un effet de profondeur

=> positionner l'objet principal observé proche du plan de l'écran

# Techniques de séparation

---

Au niveau de l'écran

Au niveau de l'observateur

    Séparation passive

        Différenciation colorimétrique

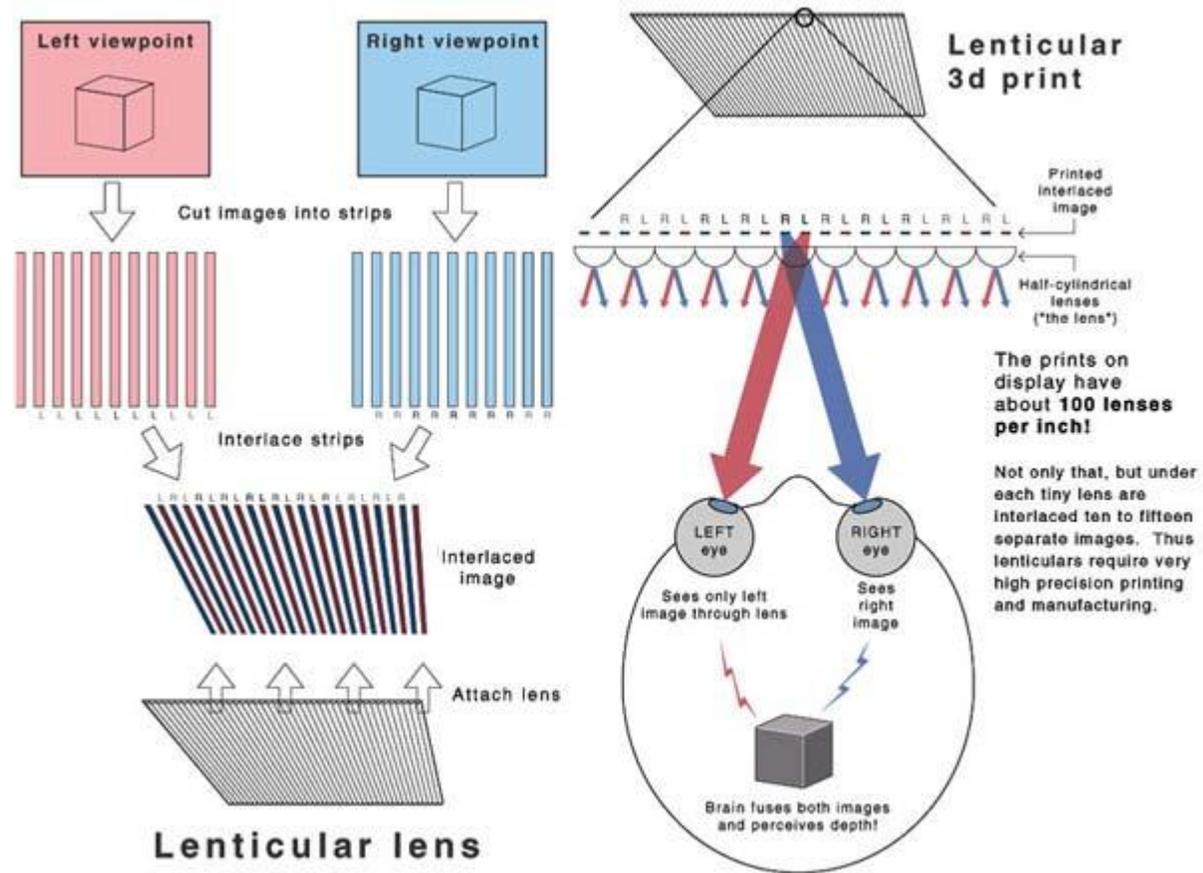
        Polarisation

    Séparation active

Casques

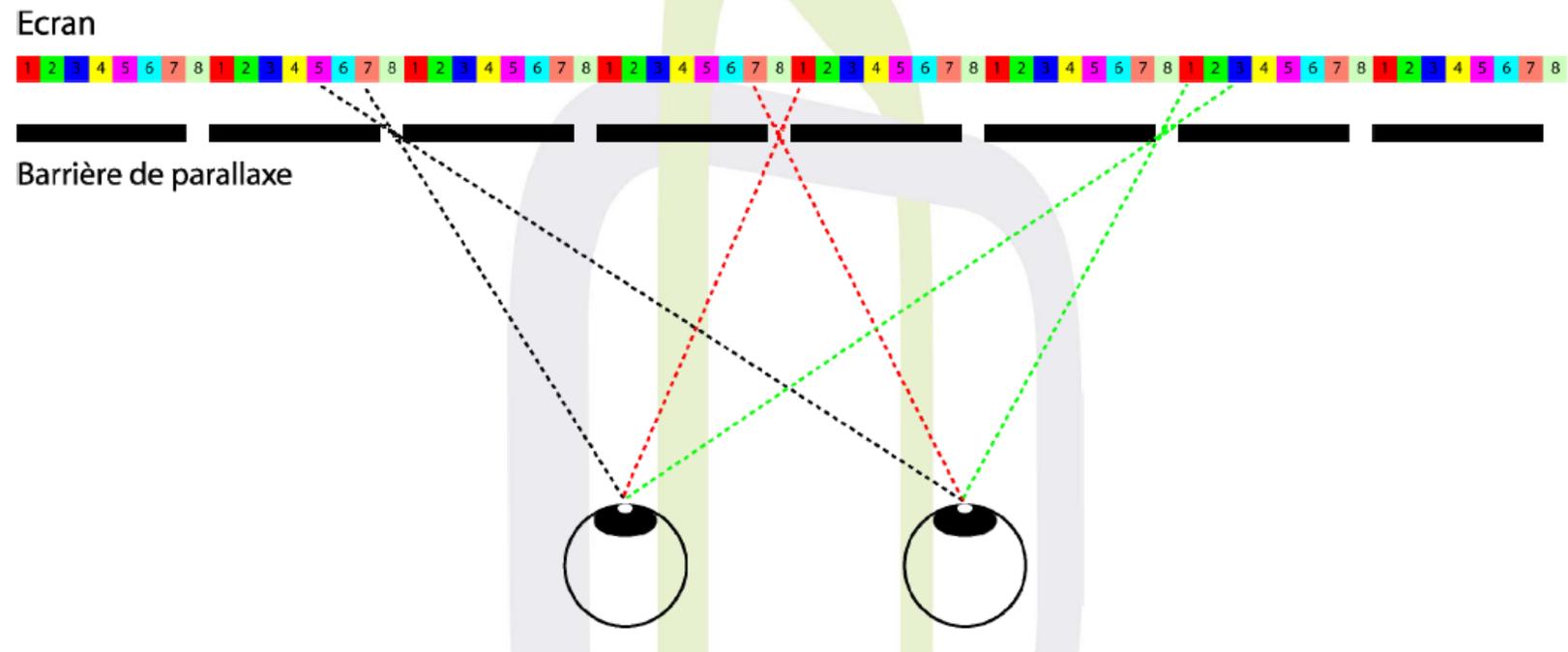
# Séparation au niveau de l'écran

Ecran auto-stéréoscopique à réseau lenticulaire



# Séparation au niveau de l'écran

Ecran auto-stéréoscopique à barrière de parallaxe



Source : Alioscopy

# Séparation au niveau de l'écran

## Ecran auto-stéréoscopique à illumination

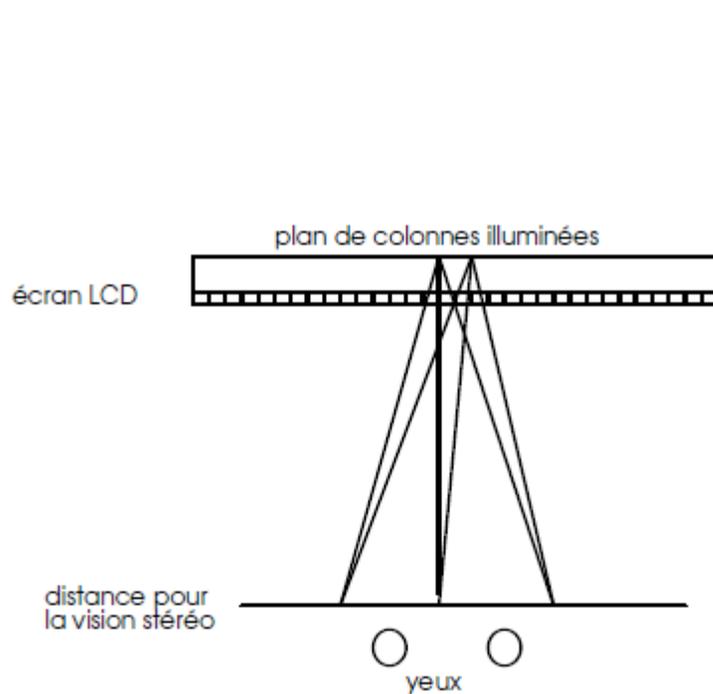


Figure 1: 3-D display mode

The parallax barrier divides the light so that different patterns reach the viewer's left and right eyes, creating the perception of a three-dimensional image.

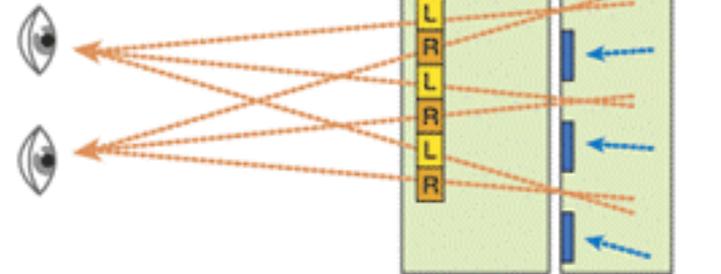
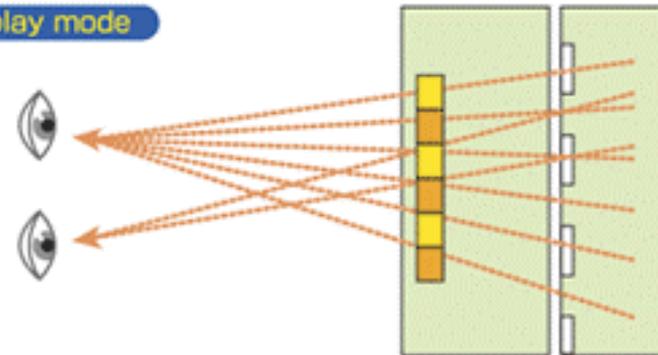


Figure 2: 2-D display mode

The switching liquid crystal controls the parallax barrier, allowing light to pass through freely. The viewer's left and right eyes see the same pattern, resulting in a two-dimensional image.



# Séparation par différenciation colorimétrique

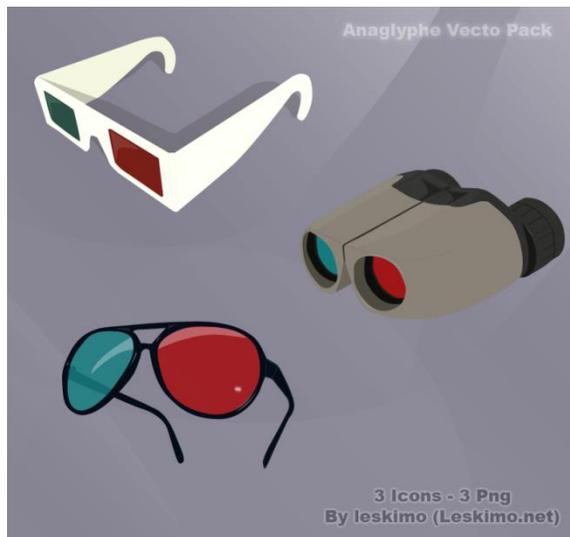
Procédé "anaglyphe"

Affichage : images droite et gauche simultanées mais de couleurs différentes (généralement rouge et cyan)

Séparation : lunettes équipées de 2 filtres colorés

Faible coût

Interdit certaines couleurs dans l'image



# Séparation par polarisation

Affichage : images droite et gauche diffusées par une lumière polarisée (horizontale/verticale ou circulaire)

Simultanément (2 projecteurs)

Multiplexage temporel (1 projecteur, 1 image sur 2)

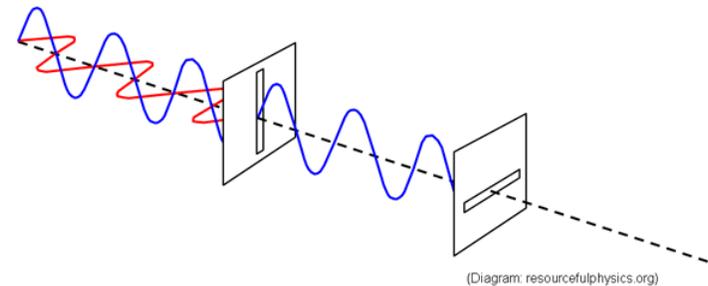
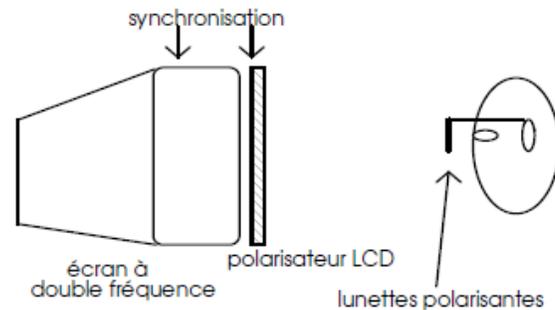
Multiplexage spatial (1 projecteur, 1 ligne sur 2 pour chaque image)

Séparation : lunettes équipées des filtres droit et gauche correspondants

Risque de chevauchement des images (fantômes)

Ne peut pas pencher la tête en polarisation h/v

Peut regarder hors de l'écran



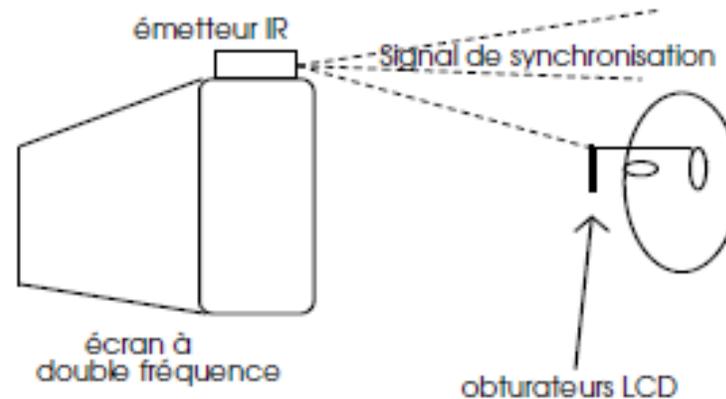
# Stéréoscopie active

Affichage : images droite et gauche alternativement (fréquence 120 ou 100 Hz)

Séparation : lunettes composées de 2 écrans à cristaux liquides qui obturent alternativement (60 ou 50 fois par seconde) chaque œil

Synchronisation : généralement par liaison infrarouge

Risque de chevauchement des images (fantômes)



# Casques

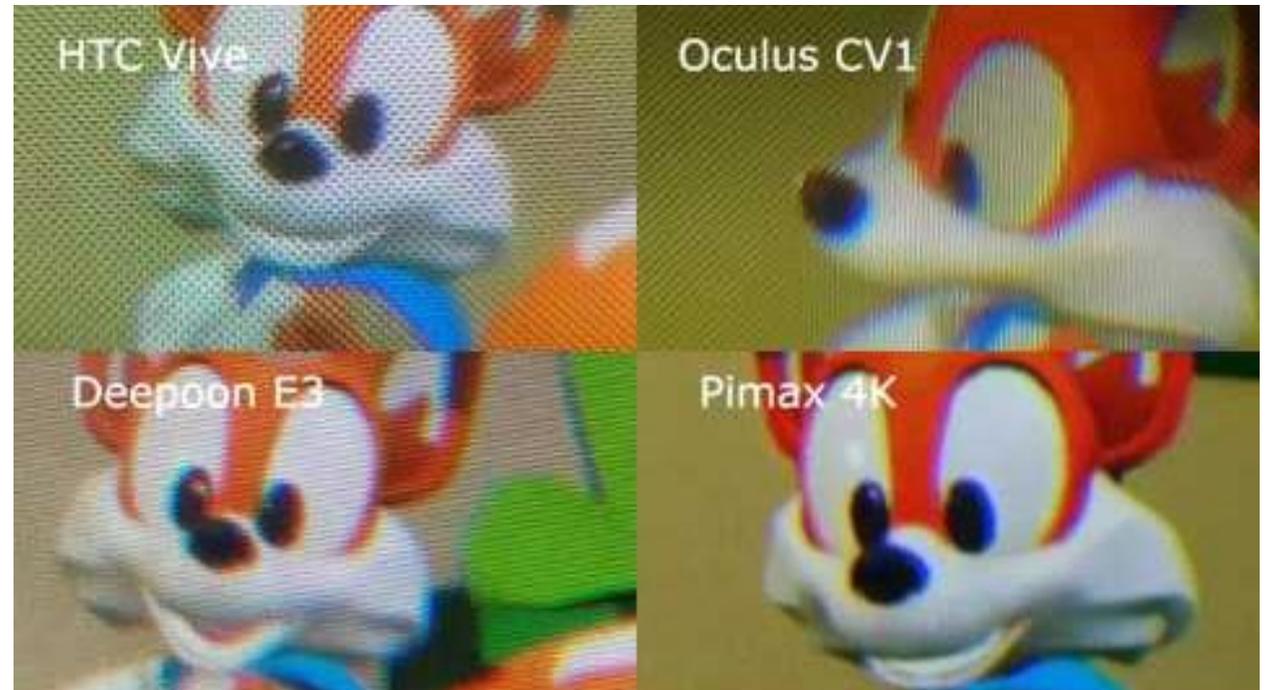
---

Affichage et séparation : 1 écran ou ½ écran par œil, séparation physique

Screen-door effect

Potentielle différences d'images (pixels)

DOI réglable



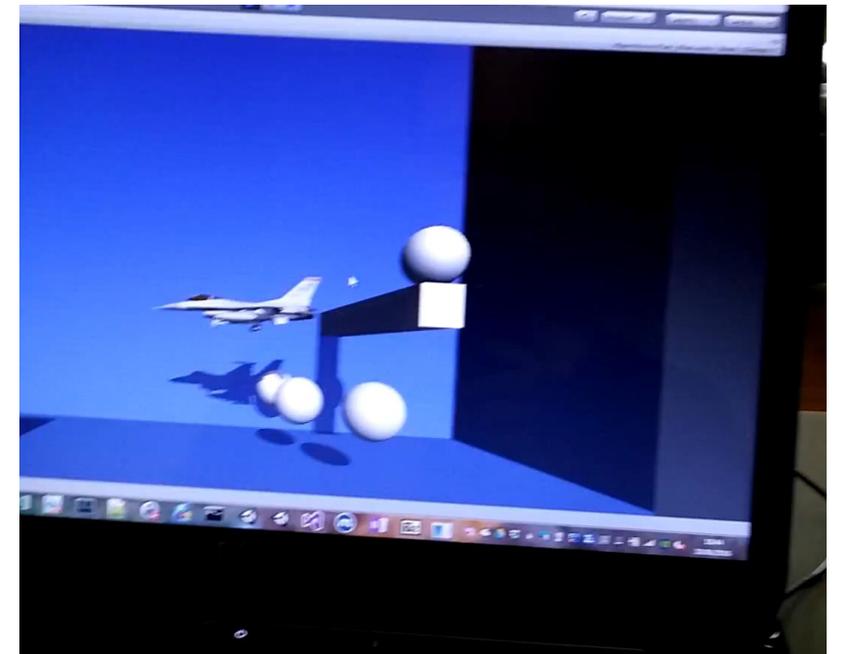
# Perspective et mouvement

Tenir compte du point de vue

*Head-tracking*

Utiliser la perspective linéaire (off-axis)

Cf. Parallaxe de mouvement



A close-up photograph of a person wearing a VR headset. The image is overlaid with a semi-transparent purple filter. The person's eyes are closed, and their mouth is slightly open. The VR headset is white and black, with a large lens area. A white cable is visible on the left side of the headset. The background is a soft, out-of-focus light color.

# INTERFACES VISUELLES

---

# Caractéristiques utiles

---

Cf. caractéristique vision :

Champ de vision (horizontal et vertical)

Champ de vision stéréoscopique

Résolution (et ratio /taille), luminosité

Fréquence de rafraichissement (60/120Hz)

Nb Utilisateurs / Encombrement

=> Degré d'immersion

Coût

# Écrans classiques

---

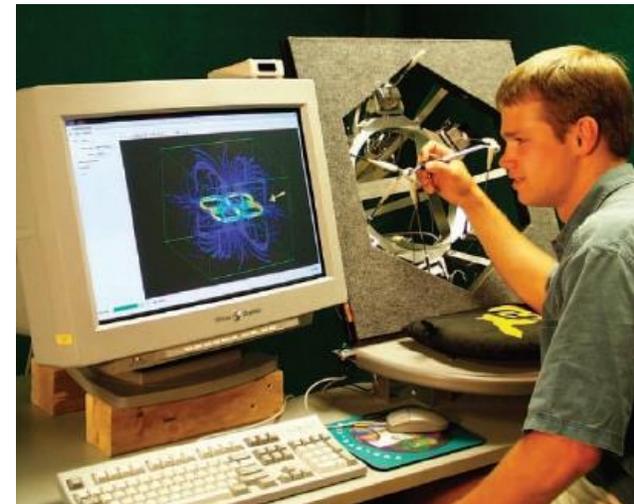
Coût faible

Résolution de correcte à 4k

Champ de vision faible

Stéréoscopie possible

=> Immersion faible



# "Fenêtres interactives"

Ecran + outils d'interaction

Commande manuelle

Head tracking



[Window VR]



[Leonar3DO VR Kit]



[Z-Space]



# Bureau immersif

« Immersion desk » ou « workbench »

Champ de vision moyen

Multi-utilisateurs possible

Stéréocopie active possible

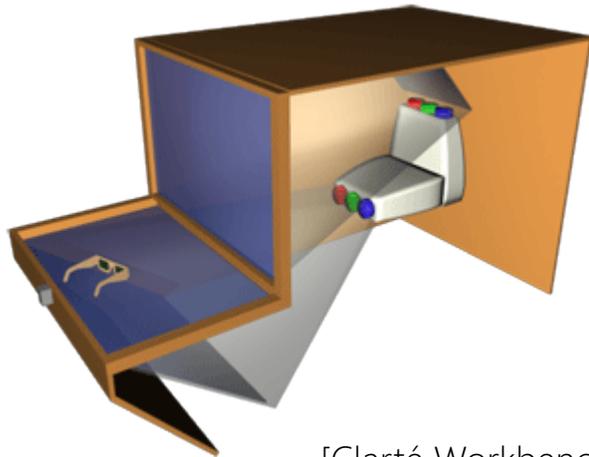
Bonne immersion

Variété de réalisation (interface haptique, miroirs, tactile...)

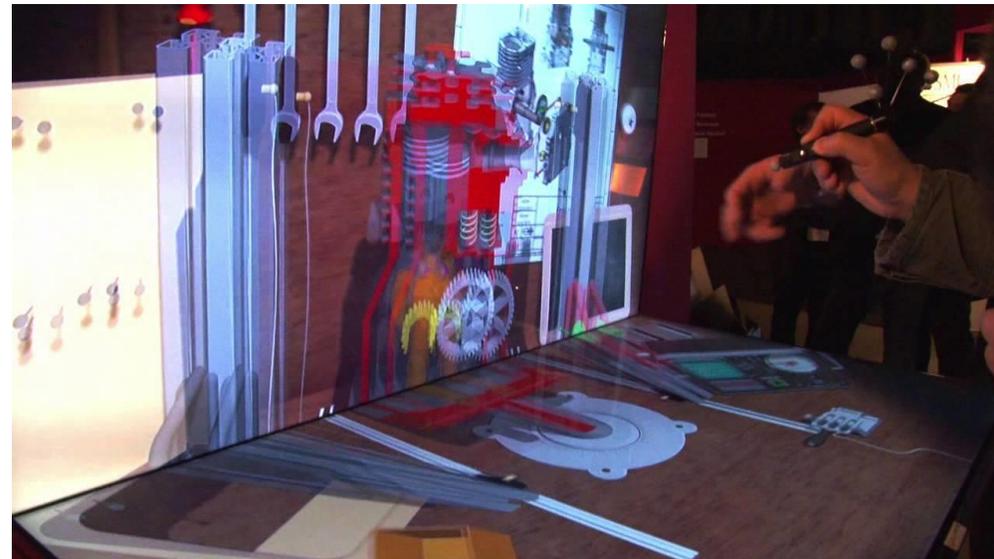


[Stanford Responsive Workbench 1998]

# Bureau immersif



[Clarté Workbench]



[Clarté Flatbench]

# Bureau immersif



[SenseGraphics 3D-LIW]



[Toucheo, INRIA]



[Reachin]

# Salle immersive

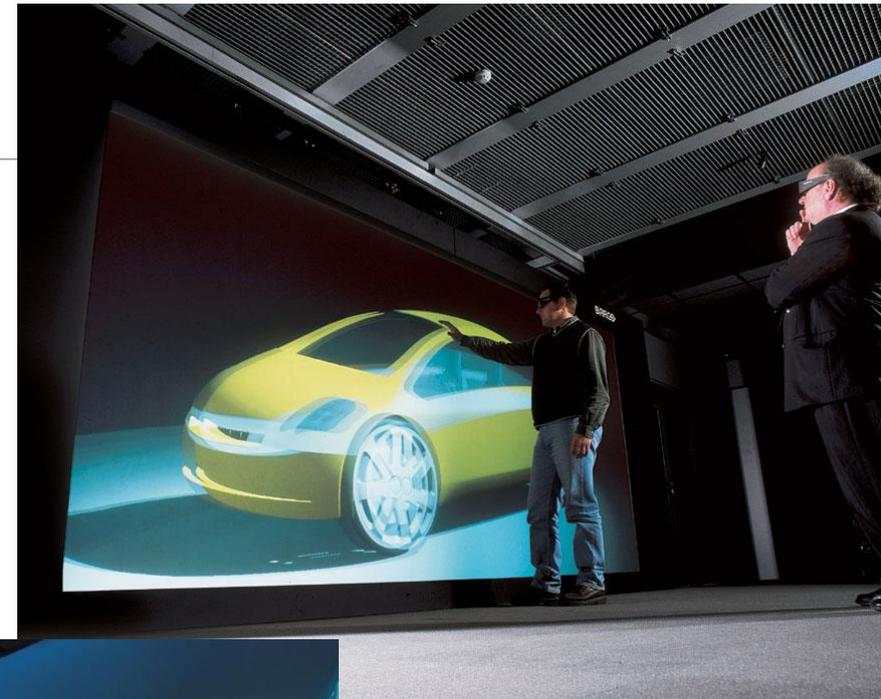
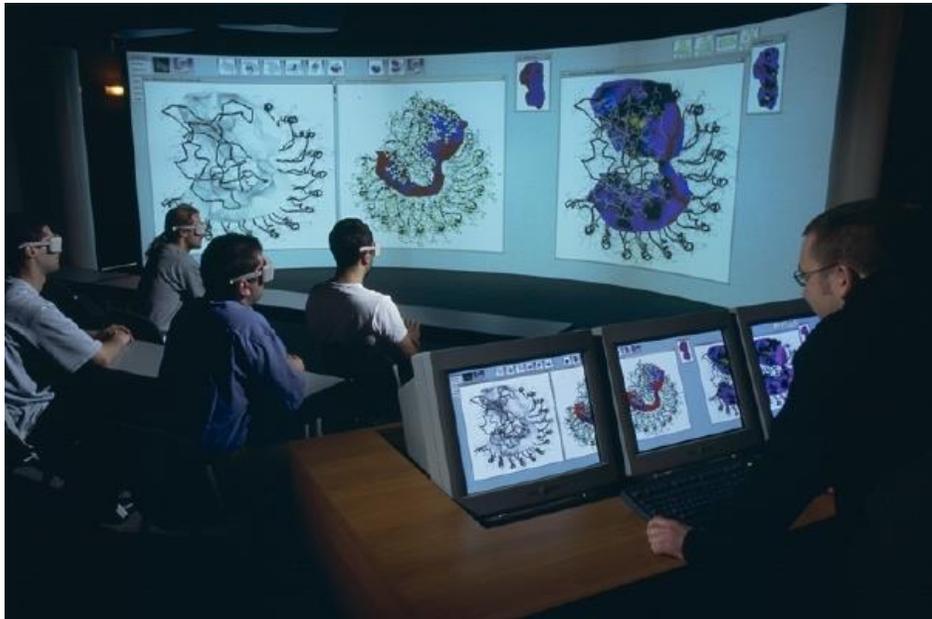
Grand écran plat ou semi-cylindrique

Champ de vision élevé

Résolution élevée

Multi-utilisateurs (sièges possibles)

Stéréoscopie possible



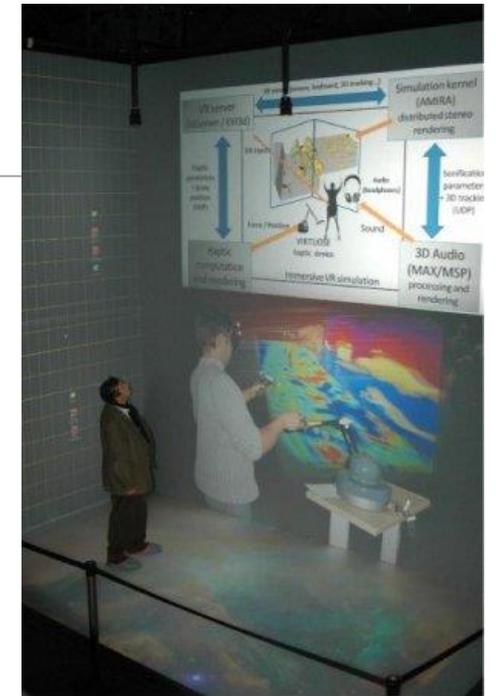
# Visio-cube

- CAVE "Cave Automatic Virtual Environment"
- RAVE "Reconfigurable Advanced Visualization Environment"
- Champ de vision élevé (au mieux 360°x360°)
- Résolution élevée
- Multi-utilisateurs possible (2 ou 3)
- Stéréoscopie active
- Bonne immersion
- Coût élevé selon le nb de faces

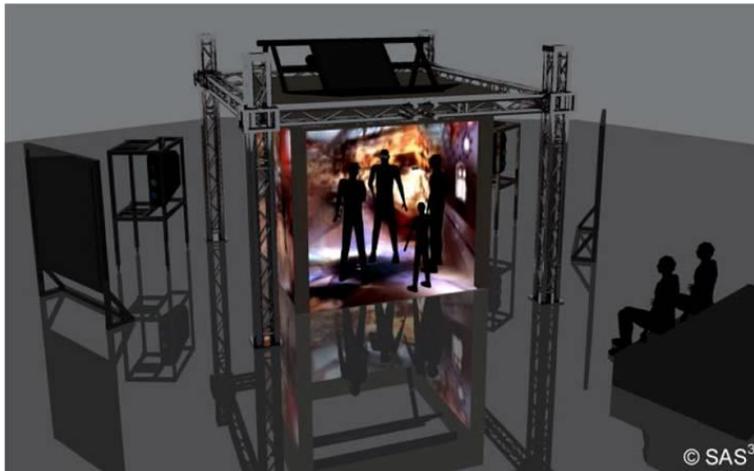
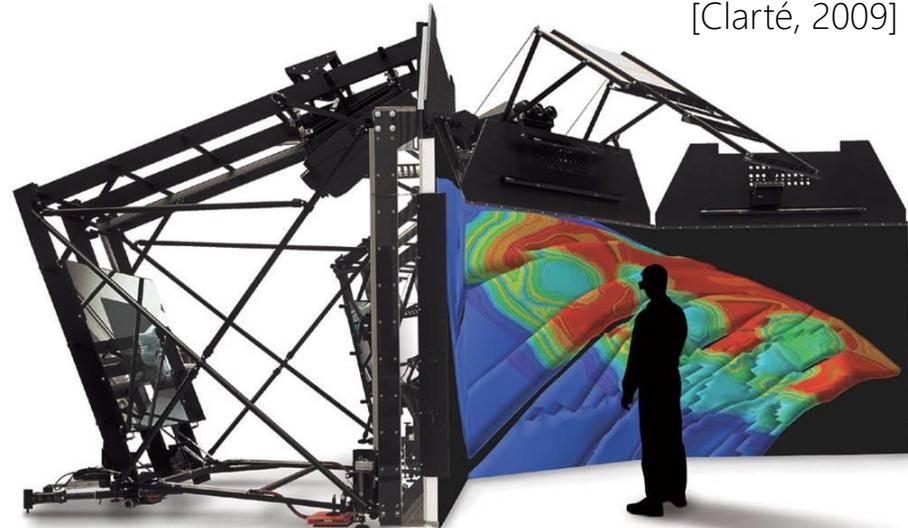


Centre Lavallois de Ressources Technologiques

[Clarté, 2009]



[LIMSI-CNRS]



© SAS<sup>3</sup>

# Visio-casque

HMD "Head-Mounted Display"  
Immersion par occultation  
Stéréo active



[Sensics xSight]



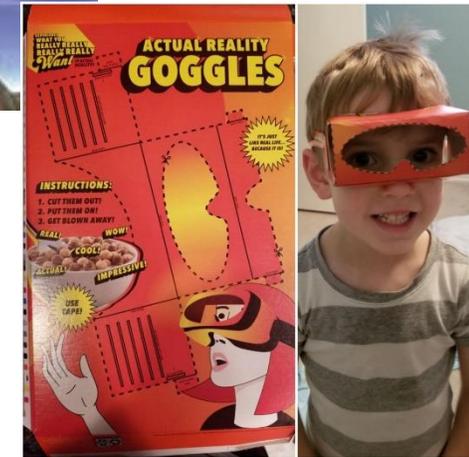
[HTC Vive Focus]



[HTC Vive]



[Oculus Rift]



# Visio-casque

[https://www.reddit.com/r/SteamVR/comments/hzkl36/vr\\_system\\_guide\\_summer\\_2020\\_is\\_finally\\_here/](https://www.reddit.com/r/SteamVR/comments/hzkl36/vr_system_guide_summer_2020_is_finally_here/)

Although many people own the Oculus Rift CV1 and the HTC Vive, these HMDs have been discontinued by their manufacturer. As this guide is intended for new buyers I have chosen to purposely disclude these HMDs from the guide. Sorry about that \(\\_/\\_/\

## VR SYSTEM GUIDE SUMMER 2020

Hello again! With the launch of the HP Reverb G2 this chart has been updated to reflect the current mainstream gaming market.  
All prices taken from main distributor or manufacturer website.

u/evanlyboy

System	Samsung Odyssey+	HP Reverb Pro	HP Reverb G2	Oculus Rift S	Oculus Quest	HTC Cosmos	HTC Cosmos Elite	Pimax 5K Plus	Pimax Vision 8K X	Valve Index	PlayStation VR
Price <small>(only if listed except Pimax)</small>	USD \$499 CAD \$349	USD \$649 CAD \$844 EU €598.80	USD \$599	USD \$399 CAD \$549 AUD \$649 EU €449	USD \$399 / \$499 CAD \$549 / \$699 AUD \$649 / \$799 EU €449 / €549	USD \$699 CAD \$939 AUD \$1299 EU €799	USD \$899 CAD \$1399 AUD \$1699 EU €1029	USD \$699	USD \$899	USD \$999 CAD \$1339 EU €1079	USD \$299 CAD \$379 AUD \$419 EU €269
Tracking	Inside-Out (Two Camera)	Inside-Out (Two Camera)	Inside-Out (Four Camera)	Inside-Out (Five Camera)	Inside-Out (Four Camera)	Inside-Out (Six Camera)	Base Station 1.0 / Inside-Out* (Four Camera)	Base Station 1.0/2.0	Base Station 1.0/2.0	Base Station 1.0/2.0	PlayStation Camera
Year	2018	2019	2020	2019	2019	2019	2020	2018	2020	2019	2016
Panel											
Visuals	90Hz ~110° HFOV Adjustable IPD 1440 x 1600	90Hz ~114° HFOV Software IPD 2160 x 2160	90Hz ~114° HFOV Adjustable IPD 2160 x 2160	80Hz ~100° HFOV Software IPD 1280 x 1440	72Hz ~100° HFOV Adjustable IPD 1440 x 1600	90Hz ~110° HFOV Adjustable IPD 1440 x 1700	90Hz ~110° HFOV Adjustable IPD 2880 x 1700	90Hz ~149.6° HFOV Adjustable IPD 2560 x 1440	75/90Hz ~149.6° HFOV Adjustable IPD 3840 x 2160	90/120/144Hz ~115° HFOV Adjustable IPD 1440 x 1600	90/120Hz ~100° HFOV Software IPD 960 x 1080
Audio	Built-in Earphones + Mic 3.5mm Dual Jack	Built-in Earphones + Mic 3.5mm Dual Jack	Built-in Earphones + Mic 3.5mm Dual Jack	Built-in Speakers + Mic 3.5mm Dual Jack	Built-in Speakers + Mic 3.5mm Dual Jack	Built-in Earphones + Mic 3.5mm Dual Jack	Built-in Earphones + Mic 3.5mm Dual Jack	Built-in Mic 3.5mm Dual Jack	Built-in Speakers + Mic 3.5mm Dual Jack	Built-in Earphones + Mic 3.5mm Dual Jack	Built-in Mic 3.5mm Dual Jack
Connectors	1x USB 3.0 HDMI 2.0	1x USB 3.0 DisplayPort 1.2	1x USB-C 3.0 DisplayPort 1.4	1x USB 3.0 DisplayPort 1.2	1x USB-C 3.0 (Charging + Oculus Link)	1x USB 3.0 DisplayPort 1.2 Power Adapter	1x USB 3.0 DisplayPort 1.2 Power Adapter	1x USB 3.0 DisplayPort 1.4 Power Adapter	2x USB 3.0 DisplayPort 1.4	1x USB 3.0 DisplayPort 1.4 Power Adapter	Processor Unit 2x HDMI 1.4 1x Micro USB 1x Power Adapter 1x AUX
Controllers	 Samsung WMR Controllers 2x AA Batteries	 WMR Controllers 2x AA Batteries	 HP WMR Controllers 2x AA Batteries	 Touch Controllers 1x AA Battery	 Touch Controllers 1x AA Battery	 Cosmos Controllers Vive, Index Supported * 2x AA Batteries	 Vive Controllers Index Supported Rechargeable	 Choice of Vive or Index Rechargeable	 Choice of Vive or Index Rechargeable	 Index Controllers Vive Supported Rechargeable	 PlayStation Move Rechargeable
Store	Steam Viveport Windows Store	Steam Viveport Windows Store	Steam Viveport	Oculus Store Steam Viveport	Quest Store Steam	Steam Viveport	Steam Viveport	Oculus Store Steam Viveport	Oculus Store Steam Viveport	Steam Viveport	PlayStation Store
Additional Notes	<ul style="list-style-type: none"> <li>Windows Mixed Reality</li> <li>Regular version no longer available</li> <li>Anti-SDE filter technology</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Windows Mixed Reality</li> <li>Regular version no longer available</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Windows Mixed Reality</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Permanently replacing the Rift CV1</li> <li>Launch twin to the Quest</li> <li>May require PCI-E USB Adapter in order to fully power HMD depending on the PC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Standalone VR, no computer required!</li> <li>Oculus Link allows Quest to connect to PC using USB-C</li> <li>Comes in 64GB and 128GB models, with a \$100 price gap between the two</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wireless adapter available</li> <li>* External tracking faceplate mod sold separately</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wireless adapter available</li> <li>* Inside-Out Faceplate mod sold separately</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Headset only</li> <li>Oculus Store used with PiTool</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Headset only</li> <li>Largest screen resolution on the market</li> <li>Can upscale to 110Hz</li> <li>Oculus Store used with PiTool</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Unique controllers allow for finger tracking</li> <li>Uses base station tracking 2.0</li> <li>Highest refresh rate on the market</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Exclusive to the PlayStation 4</li> <li>Retailer only, prices may vary</li> </ul>

# Visio-casque

Affichage : résolution, champ de vision, taux de rafraichissement, type d'écran (LED, OLED), DOI réglable...

Tracking de tête

orientation (3DOF), orientation + position (6DOF)

Outside-in vs inside-out

Interaction

Avec ou sans manettes

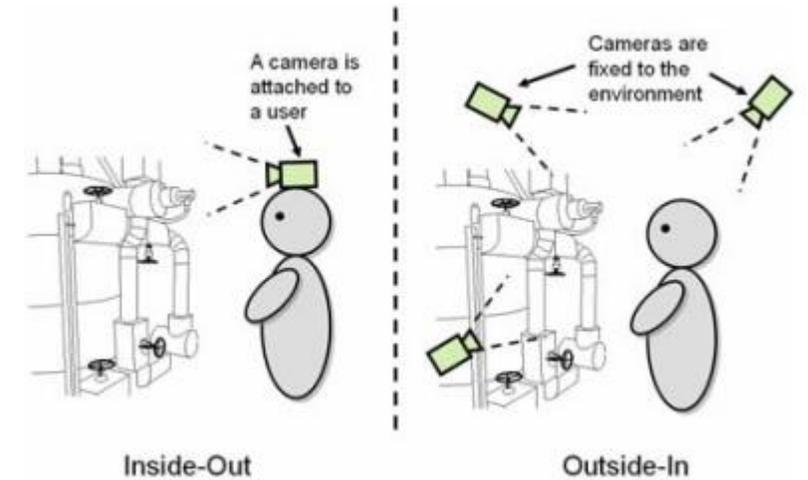
Qui peuvent être 3 ou 6DOF

"Unité centrale"

A base de téléphone mobile, de PC, de console ou de composants mobiles

Avec ou sans fil

Autres critères : audio, autonomie, poids, confort, eye tracking, coût, vie privée...



[Wikipedia, Ishii, 2010]

# Visio-casque "see-through"

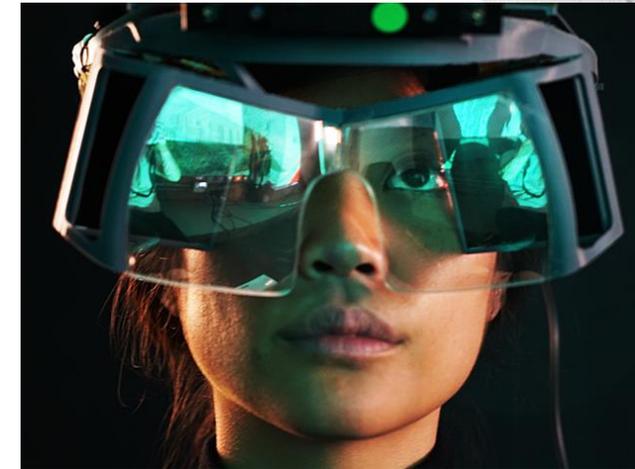
Variante des HMD classiques

Permet de superposer des images virtuelles et réelles

Écrans semi-transparentes qui n'occulent pas le monde réel ("optical see-through")

Caméras externes qui renvoient l'image du monde réel ("video see-through")

Réalité Augmentée



[Leap motion Northstar project]



[Microsoft HoloLens]



[Epson Moverio]



A blue-tinted photograph of a young boy shouting into a professional microphone with a pop filter. The boy is shown in profile, facing left, with his mouth wide open. The microphone is mounted on a stand and has a large pop filter in front of it. The background is a solid blue color.

# CANAL AUDITIF

---

# Audition

---

2<sup>ème</sup> canal le plus utilisé par l'être humain pour s'informer

Omnidirectionnelle

Tous les sons de l'environnement sont captés, pas besoin d'être tourné vers la source pour l'entendre

Aucun son n'est filtré

Performante pour

Phénomènes d'alerte

Phénomènes qui évoluent dans le temps

Percevoir un changement dans une donnée

Informations cachées

La localisation spatiale

# Appareil auditif

## Oreille externe

Pavillon et conduit auditif

Se conduit comme un résonateur, entraîne une amplification des vibrations comprises entre 1500 et 7000 Hz

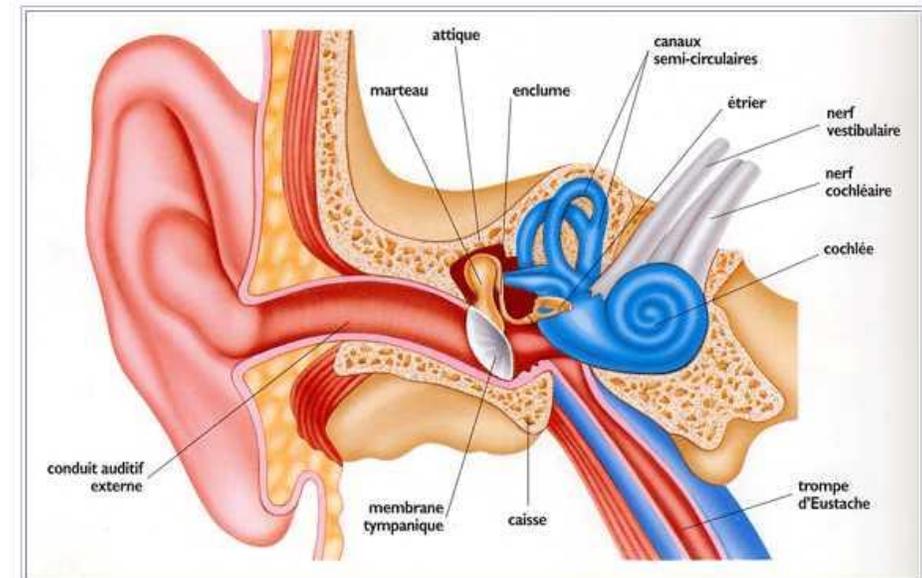
## Oreille moyenne

Tympan + 3 osselets : marteau, enclume et étrier

Transforme les vibrations aériennes en variations de pression dans les liquides de l'oreille interne

## Oreille interne

Cochlée + système vestibulaire



# Localisation spatiale

Localisation circulaire : **azimut**

La plus précise, la plus importante et la mieux connue

Acuité  $1^\circ$  ( $3^\circ$  pour des sources en mouvement)

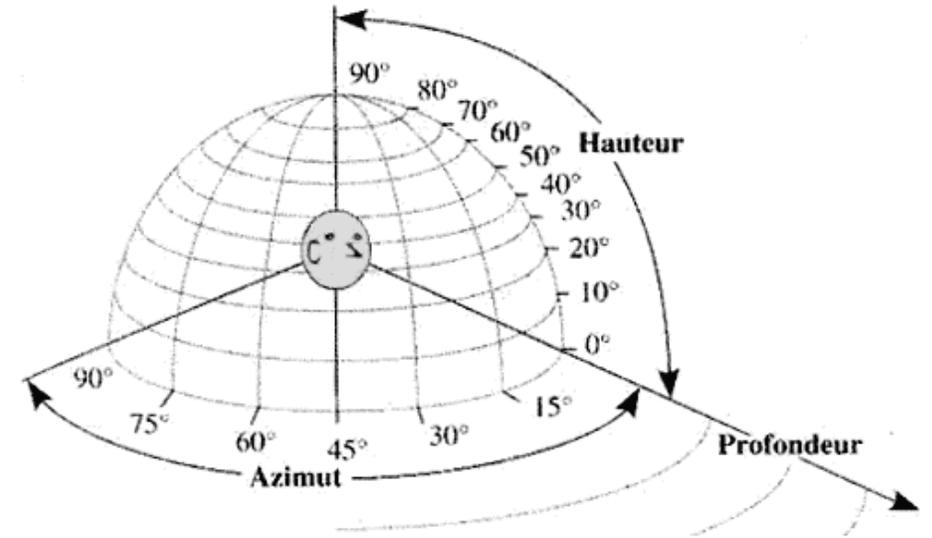
Localisation d'élévation : **hauteur**

Moins précise : acuité  $10^\circ$  à  $20^\circ$

Localisation de distance : **profondeur**

Indépendante de la physiologie de l'appareil auditif

Dépend de l'expérience (non innée)

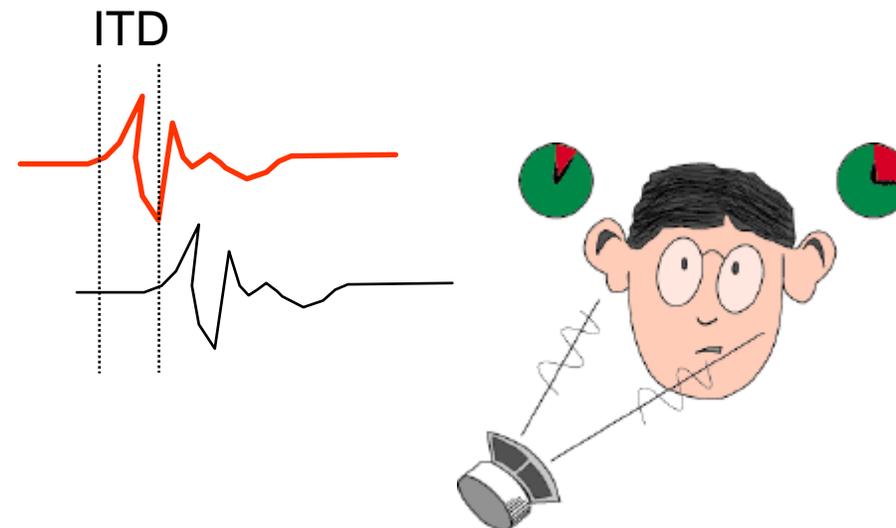
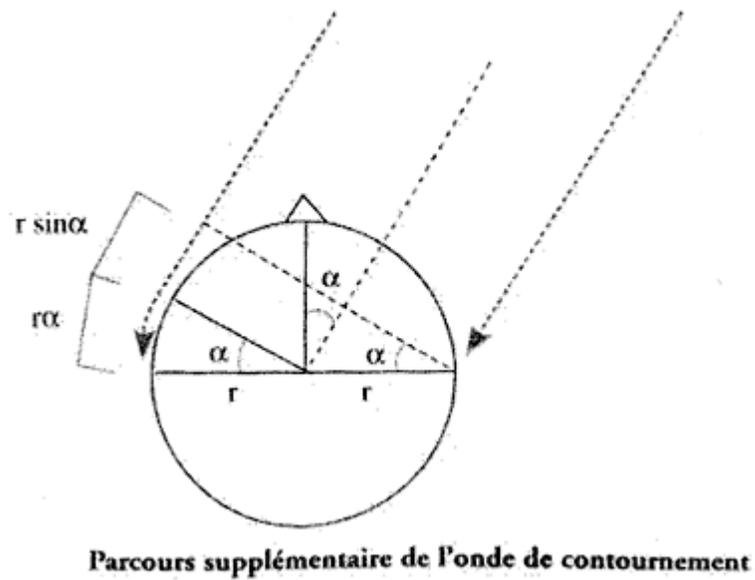


# Indices d'azimut

## Interaural Time Difference (ITD)

Différence  $\Delta t$  du temps d'arrivée du signal à chaque oreille

Toutes les fréquences audibles (20 - 20 000 Hz)

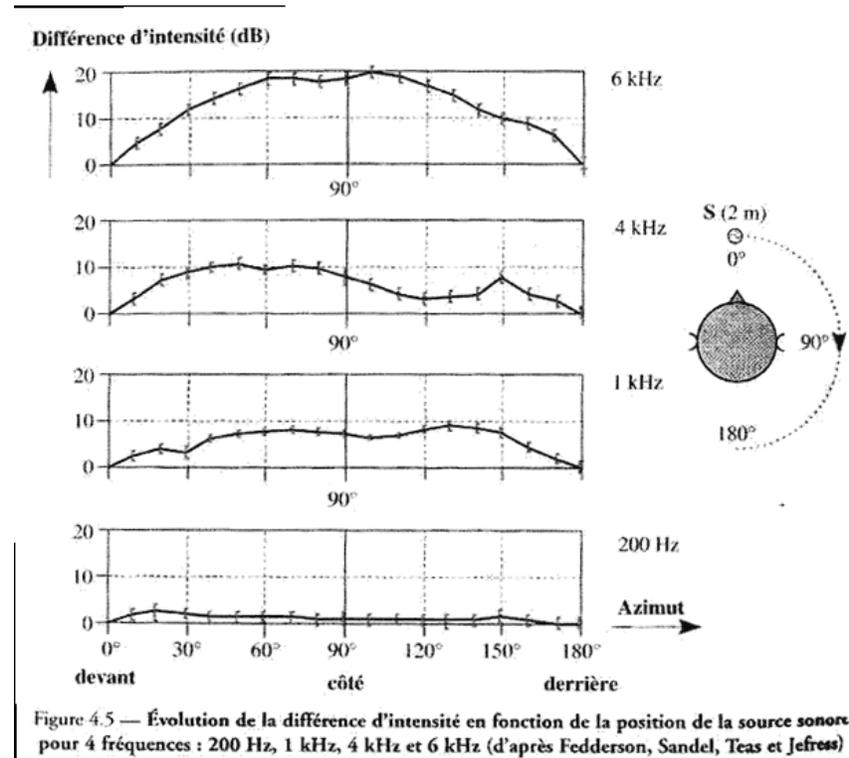


# Indices d'azimut

Interaural Level Difference (ILD) ou Interaural Intensity Difference (IID)

Différence  $\Delta_i$  d'intensité du signal perçu à chaque oreille, liée à l'ombre sonore créée par la tête ("head-shadow effect")

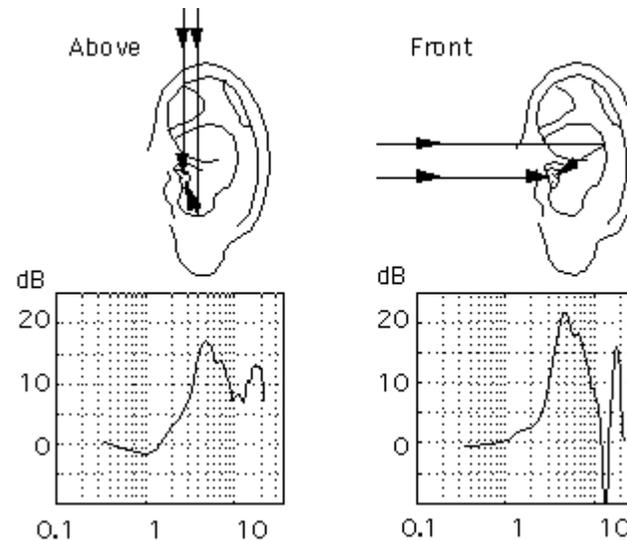
Hautes fréquences ( $> 4000$  Hz) : si  $\lambda >$  largeur de la tête, alors pas de différence perçue



# Indices de hauteur

Liés au pavillon et sa géométrie

Amplification de certaines fréquences au détriment d'autres, en fonction de l'angle d'incidence du signal et des réflexions du signal dans les circonvolutions



# Indices de distance

---

## Volume

L'énergie du son provenant directement de la source diminue proportionnellement à la racine carrée de la distance parcourue

Un son diffusé à un faible volume ne sera pas forcément perçu comme un son lointain.

Ex : conversation humaine

## Parallaxe de mouvement

Si l'auditeur translate sa tête, le changement d'azimut dépend de la distance de la source : si elle est proche, le changement sera important, si elle est éloignée, il sera quasi nul

## ILD

Lorsque la source sonore est très proche de la tête ( $< 1\text{m}$ ), ILD élevée

Ex. *extrême* : bourdonnement d'insecte -> menaçant ou désagréable

## Rapport entre le son direct et le son réverbéré

Le son est réfléchi de nombreuses fois par les surfaces environnantes

Plus la source est proche, plus le rapport sera élevé

A pair of over-ear headphones with a dark headband and circular ear cups. The image is overlaid with a semi-transparent blue filter. The text "INTERFACES AUDITIVES" is written in white, bold, uppercase letters across the middle of the image.

**INTERFACES AUDITIVES**

---

**RENDU AUDIO 3D**

# Casques vs. Enceintes

---

## Casques

Mono-utilisateur (mais sons différents)

Occultation des sons réels

Confort faible

## Enceintes

De 2 à N

Multi-utilisateurs (mais son commun !)

Pas d'occultation

Encombrement



# Systemes audio 3d simples

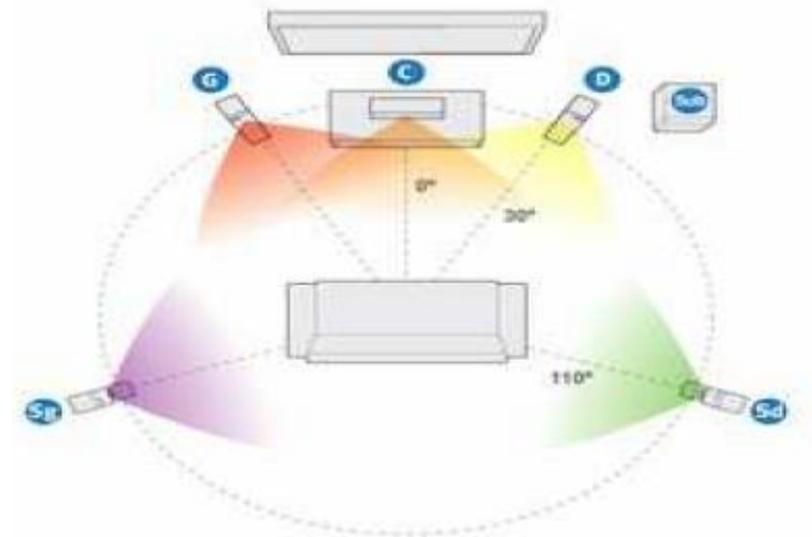
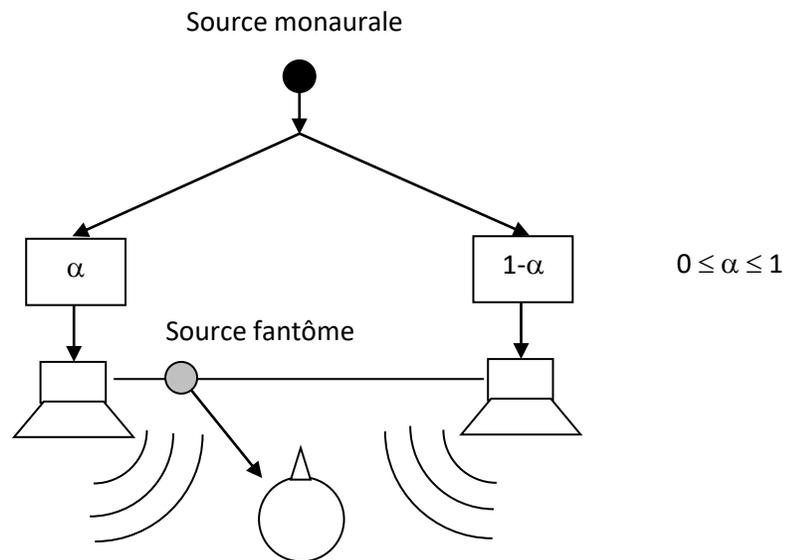
## Stéréo

Carte son + 2 enceintes

Principe de la "source fantôme" que l'on déplace en faisant varier l'intensité ou le délai entre les signaux droite et gauche

## Multivoies : champ sonore

Distribution des signaux sur différents haut-parleurs répartis spatialement



# Approche binaurale

Diffusion par casque : recréation des pressions acoustiques adéquates sur chaque tympan

Enregistrement binaural

Enregistrement sur un mannequin et diffusion sur l'auditeur

Si le mannequin et l'humain ont les mêmes caractéristiques physique (tailles et formes de la tête et des pavillons) les ITD et ILD seront les mêmes, et le son 3D sera relativement réaliste

Inconvénients :

Casque obligatoire

Non temps réel (pré-enregistrement)

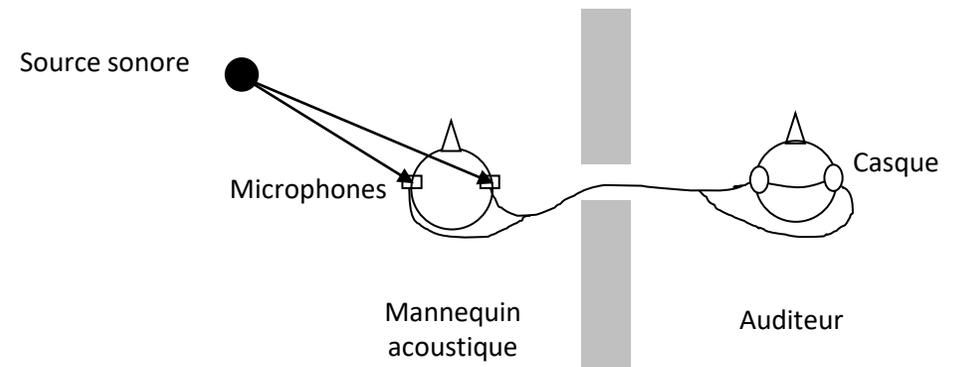
Si l'auditeur bouge, le son doit bouger également

Sources frontales semblent

trop proches

Effets de hauteur non fiables

(disparité des pavillons)



# Approche binaurale

## Synthèse binaurale :

Connaître et reconstituer les changements de spectre subis par l'onde sonore en se propageant depuis sa source vers le tympan. Ces changements sont dus à la diffraction des ondes sonores par le torse, la tête et l'oreille externe. Ils dépendent donc du physique de chacun et de la position relative de la source par rapport à l'auditeur.

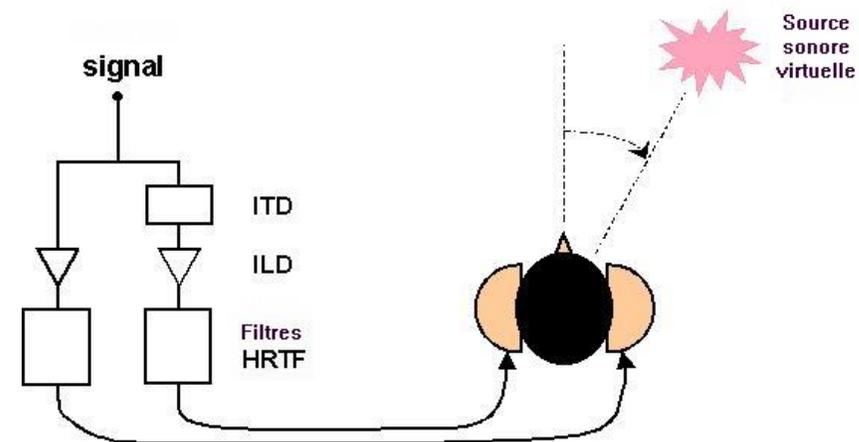
Head-Related Transfert Function (HRTF)

## Inconvénients

Sources éloignées

Hauteur difficile à simuler

HRTF individuelle vs. standard



# Approche ambisonique

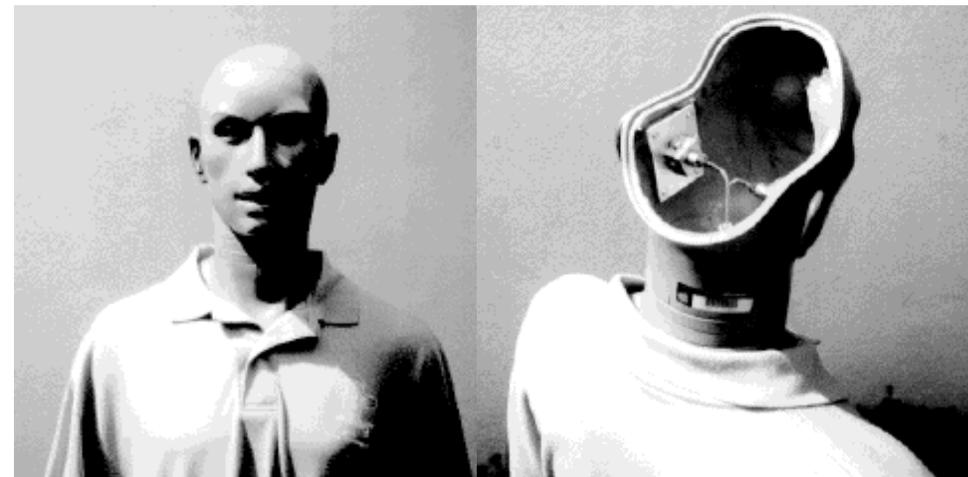
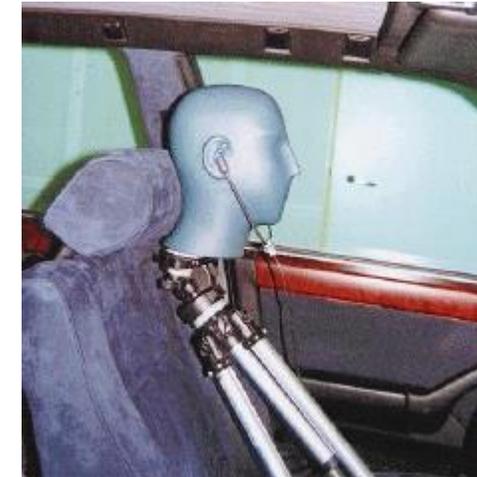
## Expérimental

Enregistrement ou synthèse spécifique  
(microphone tétraédrique à capsules)

Restitution 2D ou 3D



# Dispositifs d'évaluation et d'étude



A close-up photograph of a hand gripping a thick, light-colored rope. The hand is positioned on the left side of the frame, with fingers wrapped around the rope. The background is a solid, muted blue color. The lighting is soft, highlighting the texture of the skin and the rope.

# CANAL HAPTIQUE

---

# Haptique

---

Grec *haptein* = "toucher"

Combinaison de 2 sens

Le tactile

- Perception des forces de contact et de la température

- Perception des propriétés surfaciques des objets (rugosité, arêtes, glissement...)

La kinesthésie (ou retour d'effort)

- Perception des mouvements propres du corps

- Perception des efforts musculaires

- Perception des caractéristiques des objets (dureté, poids, inertie...)

# Fonctions du canal haptique

---

## Fonction **ergotique**

action matérielle, transformation de l'environnement

## Fonction **épistémique**

connaître, percevoir l'environnement

contact, position et déplacement des objets, mais également leurs propriétés :  
forme, masse, texture...

la plupart du temps simultanée à la première

## Fonction **sémiotique**

émission d'information vers l'environnement (par le geste)

# Récepteurs cutanés

---

## Nocicepteurs

Sensations douloureuses = Dispositifs de sécurité

## Thermo-récepteurs

Récepteurs du froid / récepteurs du chaud

Spatialement séparés dans la surface et la profondeur de la peau

## Mécano-récepteurs

Contacts entre la peau et un objet

Densité et seuil de discrimination spatiale variables

## Mécanorécepteurs proprioceptifs

Mesure des mouvements et des tensions dans les muscles, les tendons et les articulations

Niveaux profonds

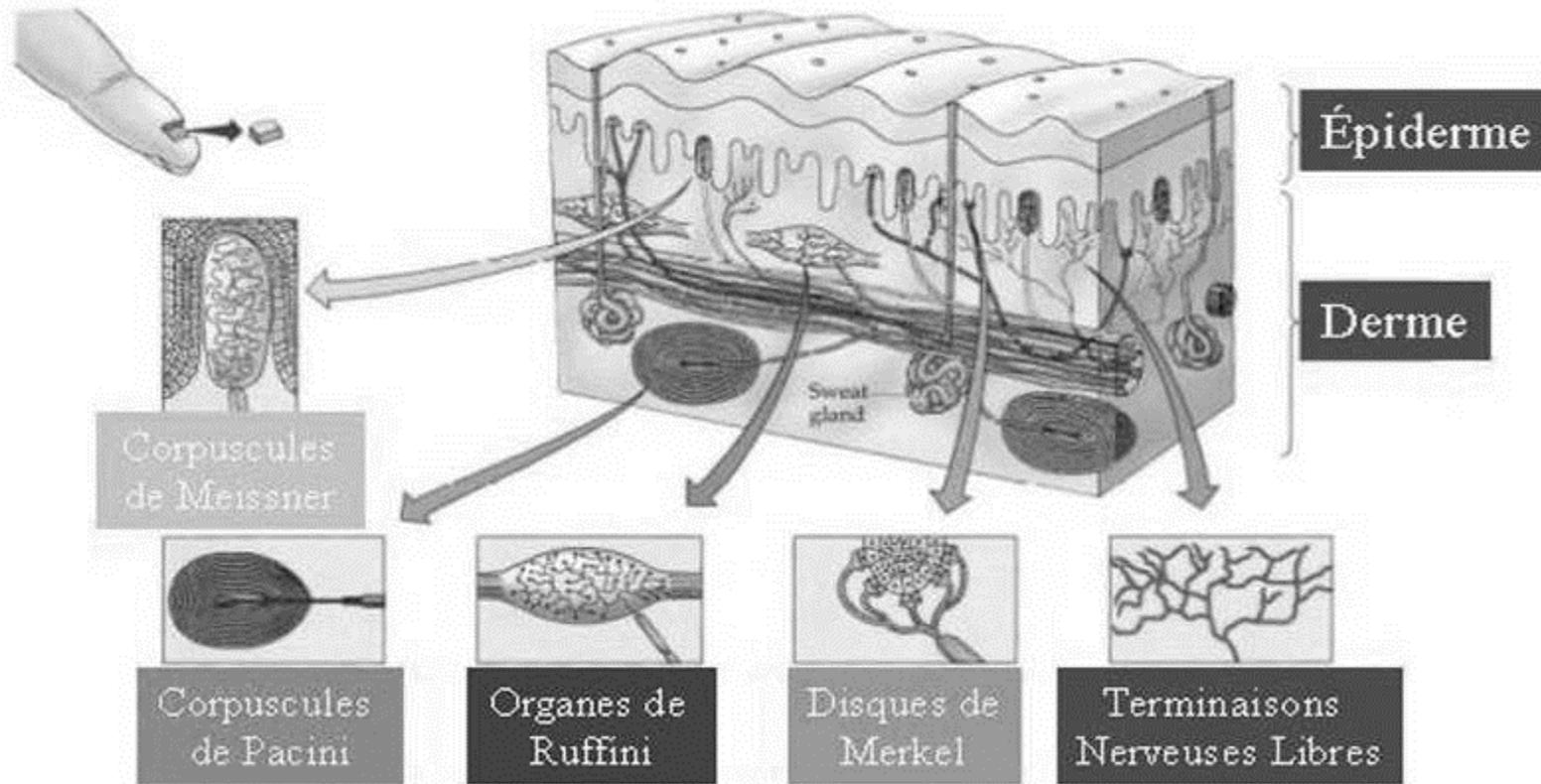
Kinesthésie

## Mécanorécepteurs extéroceptifs

Tactile

# Mécanorécepteurs extéroceptifs

Discontinuité de surface,  
géométrie de surface,  
courbure,  
capteurs de vitesse

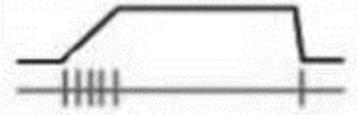
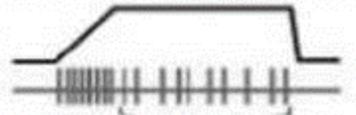
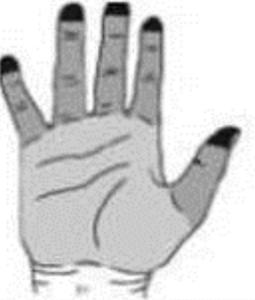
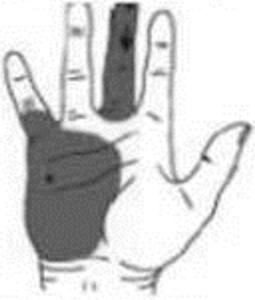
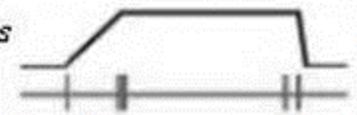


Accélération,  
vibrations

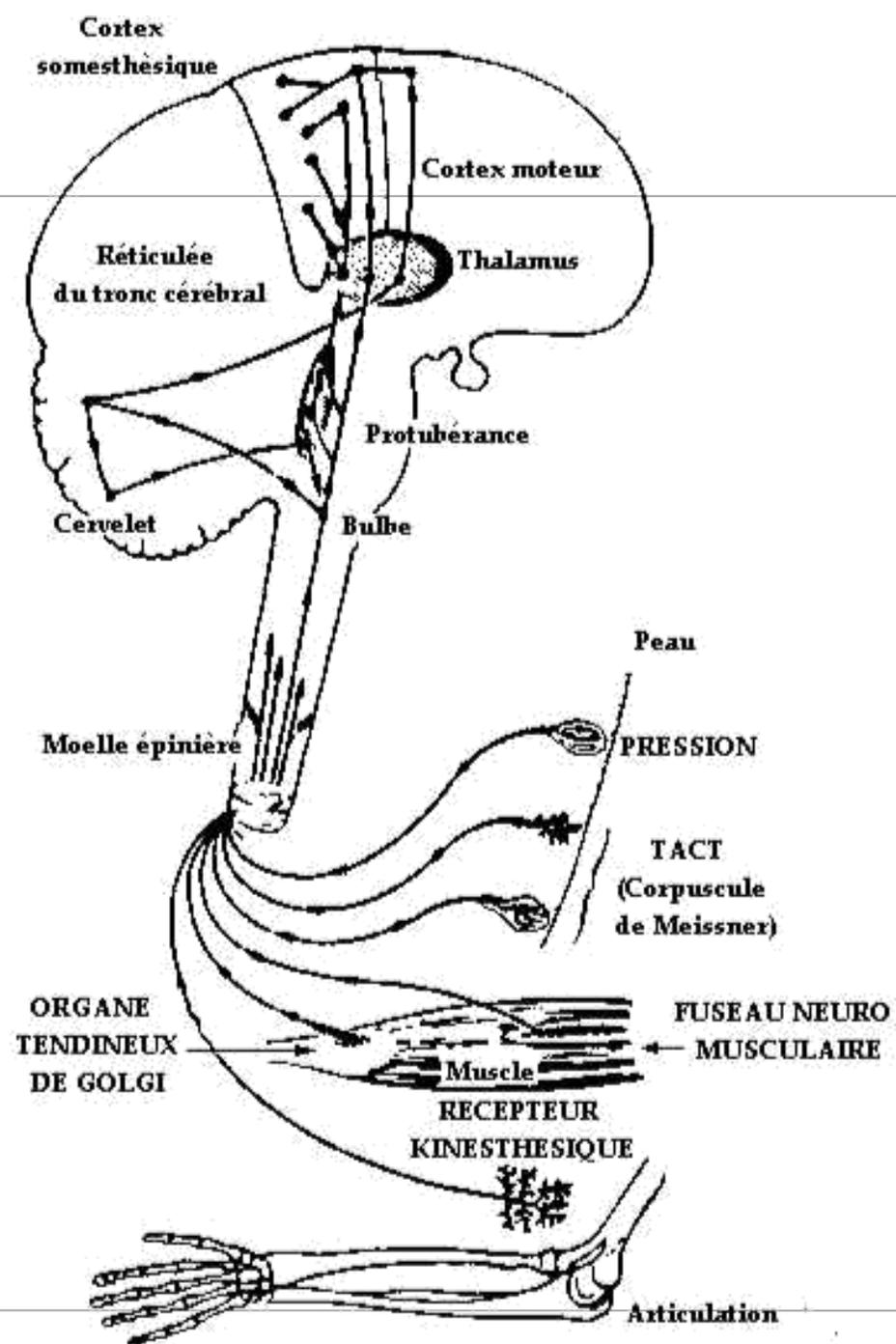
Intensité et  
direction des forces  
statiques,  
étirement latéral de  
la peau

Capteurs de  
pression, texture,  
vibrations

# Mécanorécepteurs extéroceptifs

		Adaptation			
		Rapide réponses dynamiques	Lente réponses statiques		
Champs Réceptifs	<i>Petits, frontières nettes</i> 	 Friction et variation de forces <b>FA I</b> (43 %) Meissner	 Arêtes et courbures <b>SA I</b> (25 %) Merkel	<i>Variable</i> 	Densité de Récepteurs
	<i>Grands, frontières obscures</i> 	 Transitions mécaniques et vibrations <b>FA II</b> (13 %) Pacini & Golgi-Mazzoni	 Cisaillement latéral et forces <b>SA II</b> (19 %) Ruffini	<i>Uniforme</i> 	

# Kinesthésie



A top-down view of a disassembled game controller, likely a PlayStation 4 DualShock 4, laid out on a blue grid surface. The components are arranged in a circular pattern around the center. At the top is the front faceplate with the touchpad and buttons. Below it is the main printed circuit board (PCB) with various electronic components. At the bottom is the back shell. To the left and right are the two analog sticks. In the bottom right corner, there is a small red button labeled 'B' and a white USB connector. The text 'INTERFACES MOTRICES' is written in white, bold, uppercase letters across the middle, with a thin white horizontal line underneath it. Below the line, the text 'INTERFACES DE COMMANDE' is also written in white, bold, uppercase letters.

# INTERFACES MOTRICES

---

# INTERFACES DE COMMANDE

# Interfaces de commande classiques

---

Issues du monde PC

manette, joystick, space mouse, space ball, volant, tablette graphique, PDA, tablette tactile...

Problème de l'immersion sensori-motrice



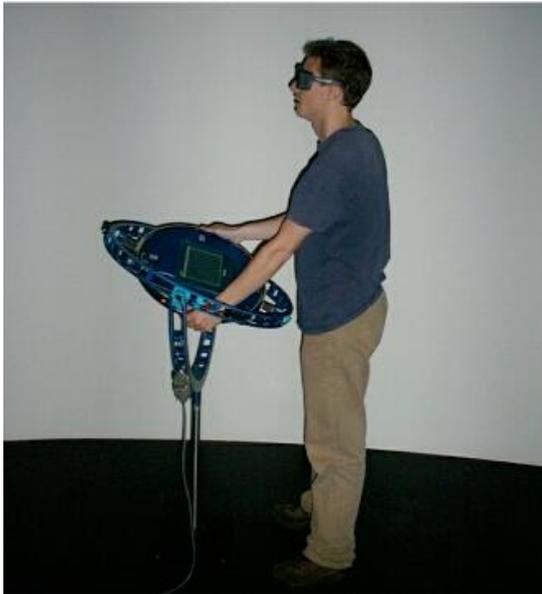
# Interfaces de commande RV

Transposition des interfaces classiques

Interfaces spécifiques

Interfaces kinesthésiques (cf. suite)

Systèmes de capture (cf. suite)



[intersense]



[HTC Vive Controller]



[Oculus Touch]



[Oculus Go]

# Gants de données

## Fibre optique

Mesure de l'intensité lumineuse transmise

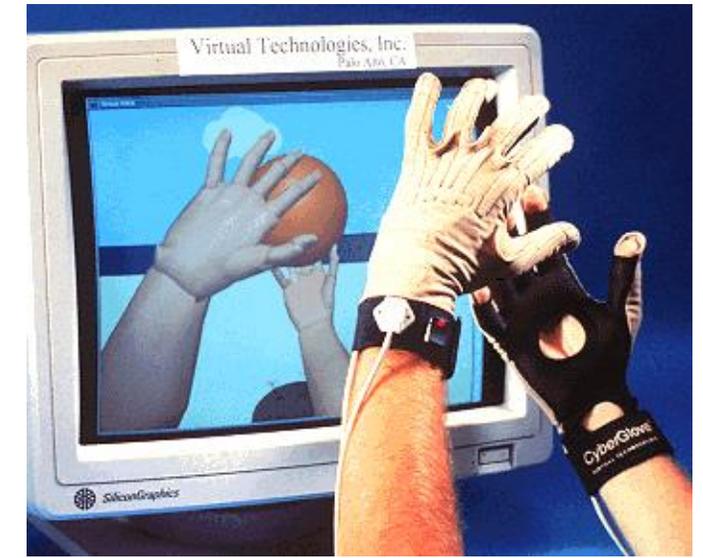
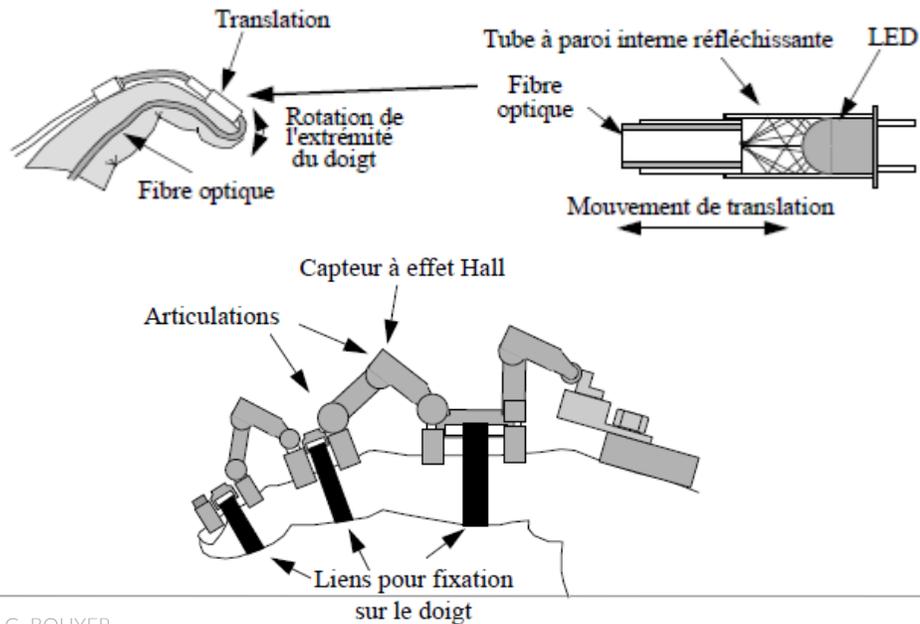
Mesure de translations relatives

## Autre support

Mesure de résistance

Mesure d'allongement du support

Effet Hall



[CyberGlove 1 et 3]

[5DT]



[Manus]



# Commande vocale

---

Préserve l'immersion (pas d'interface) et l'interaction naturelle

Microphone + logiciel de reconnaissance vocale

Problèmes

- Reconnaissance pour commandes complexes

- Conflits avec bruit ambiant, travail collaboratif...

- Apprentissage, calibration

# Interfaces cérébrales

Capture des activités nerveuses et cérébrales

Externe (EEG)

Interne



[Emotiv]



[OpenVibe 2, INRIA]

# INTERFACES HAPTIQUES

---



# Caractéristiques

---

Espace de travail

Cinématique, volume, forme

Degrés de liberté

Actifs et passifs

Bande passante

Mécanique, actionnement et contrôle

Transparence

Inertie, viscosité, frottements

Force maximale

Instantanée et continue

Elasticité mécanique

Résolution nominale

Méthodes de rendu supportées : force, position...

# Technologies de retour d'effort

---

## Electromagnétique

- Force sans mouvement

- Instable

## Hydraulique

- Très puissant

- Dangereux, cher et salissant

## Pneumatique

- Forces plus faibles mais moins dangereux

## Frottements

- S'oppose au mouvement sans en créer (passif)

## Moteurs

- À une tension donnée correspond un couple moteur

- Problème des efforts continus

# Catégorisations

## Réaction interne

Structure portée par l'utilisateur

## Réaction externe

Structure implantée dans l'environnement

## Structures mécaniques

### Séries

Limitées en effort

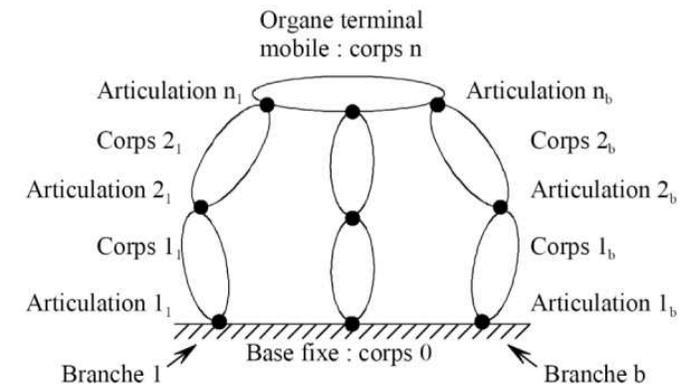
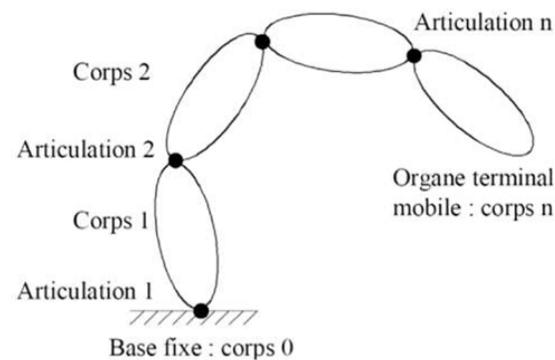
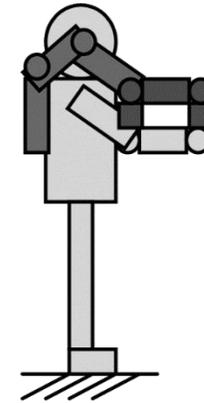
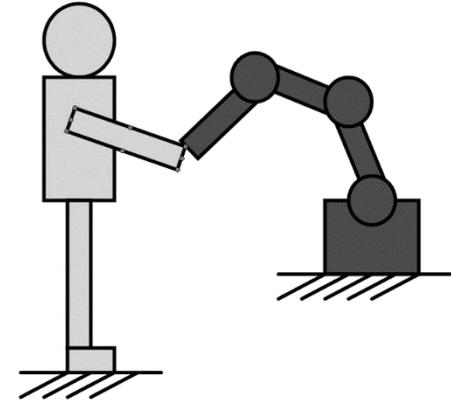
Grand espace de travail

### Parallèles

Grands efforts

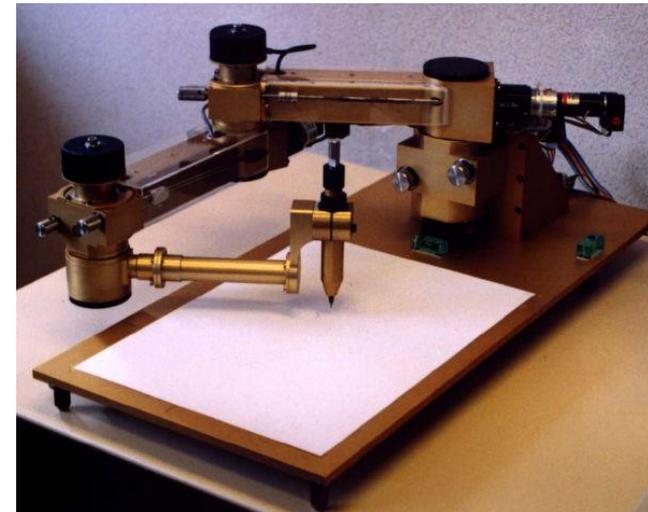
Faibles débattements

### Mixtes



# Périphériques de bureau

Joysticks  
Souris  
Volants



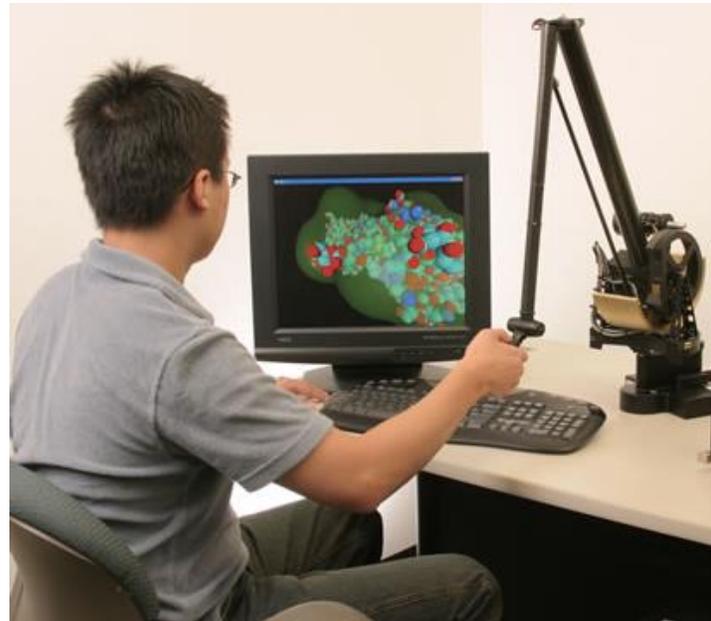
# Structures séries ("bras haptiques")



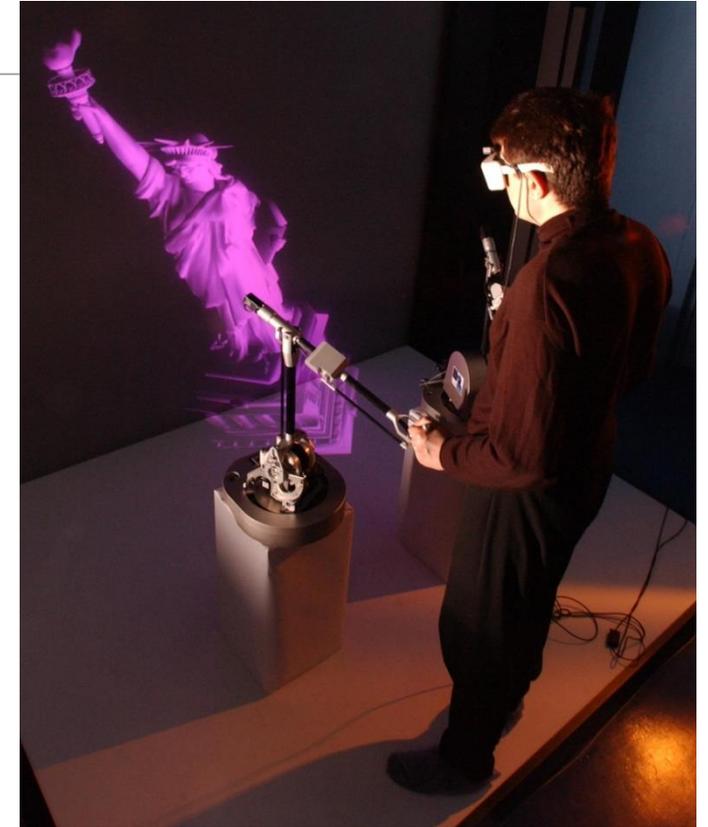
[Geomagic Touch et Touch X]



[Senseable Premium 6D]



[Virtuose 3D et 6D, Haption]



# Gants haptiques

- Grande liberté de mouvement
- Manipulation pseudo-naturelle
- Objets rigides / mous
- Pas d'opposition au déplacement de la main



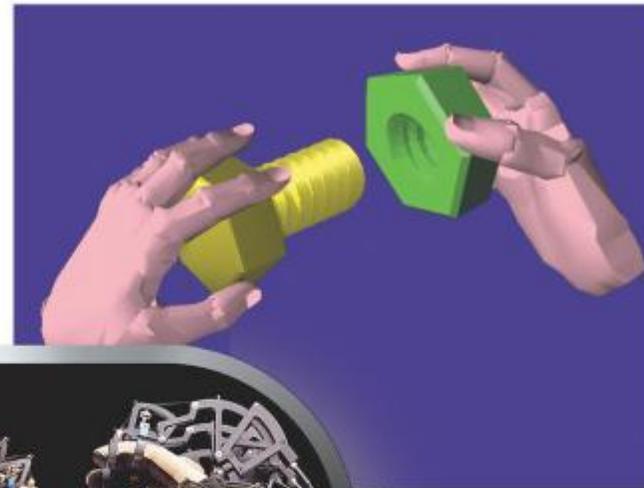
SenseGlove Nova



Contact CI



[HaptX]



[CyberGrasp , Cyberglove Systems]

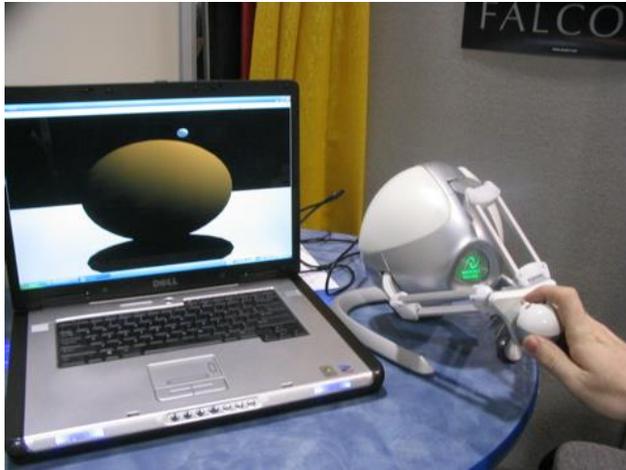
# Exosquelettes et bras maitres

---

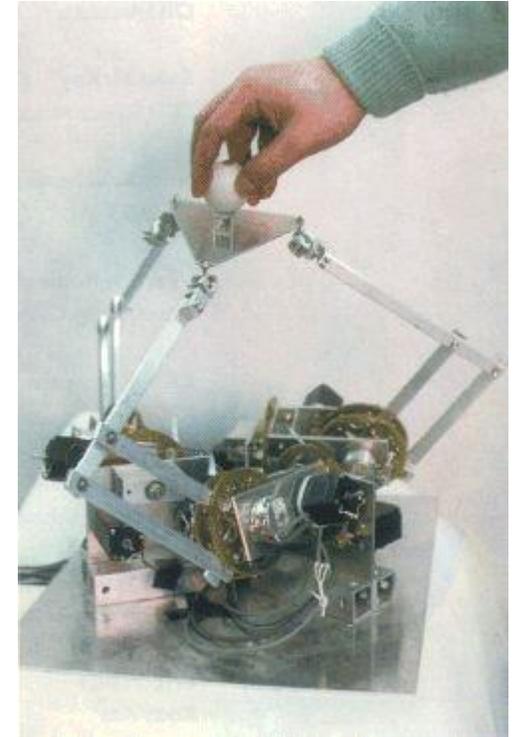
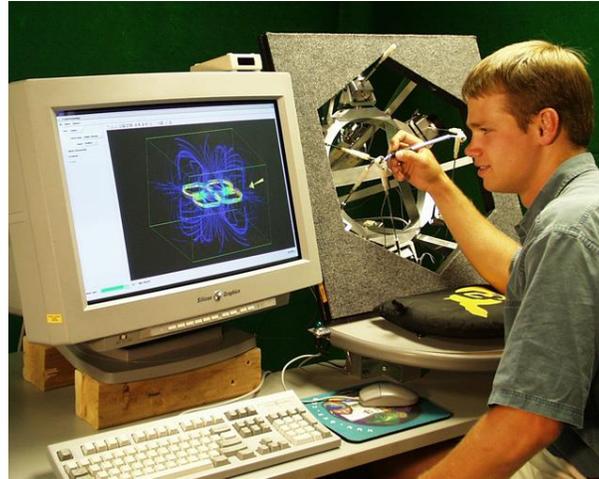


[Mat 6D, Haption]

# Structures parallèles



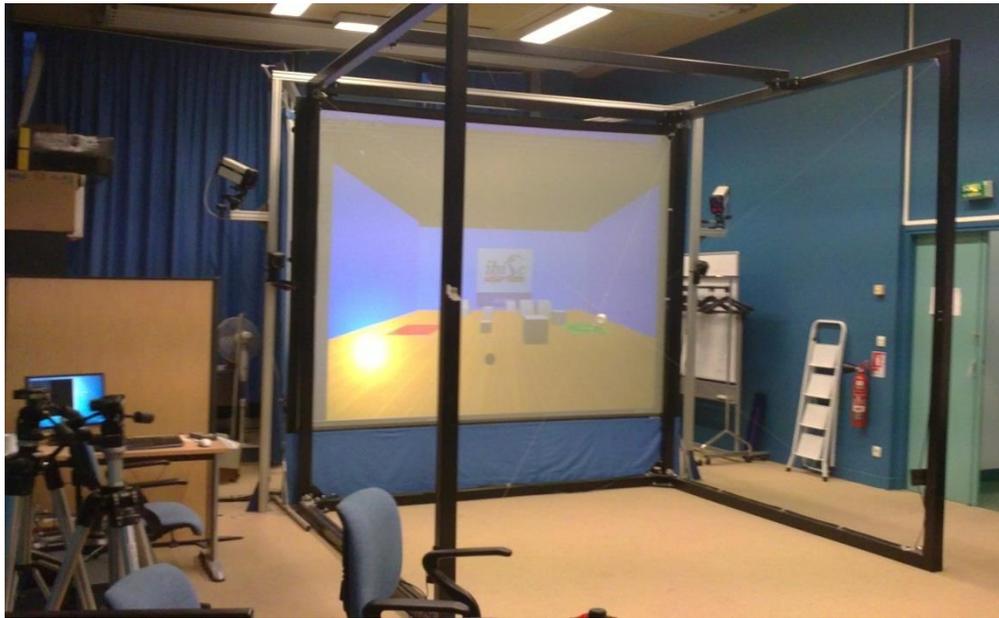
[Novint Falcon]



[Virtuose 6D Desktop, Haption]



# Dispositifs à câbles (Spidar)

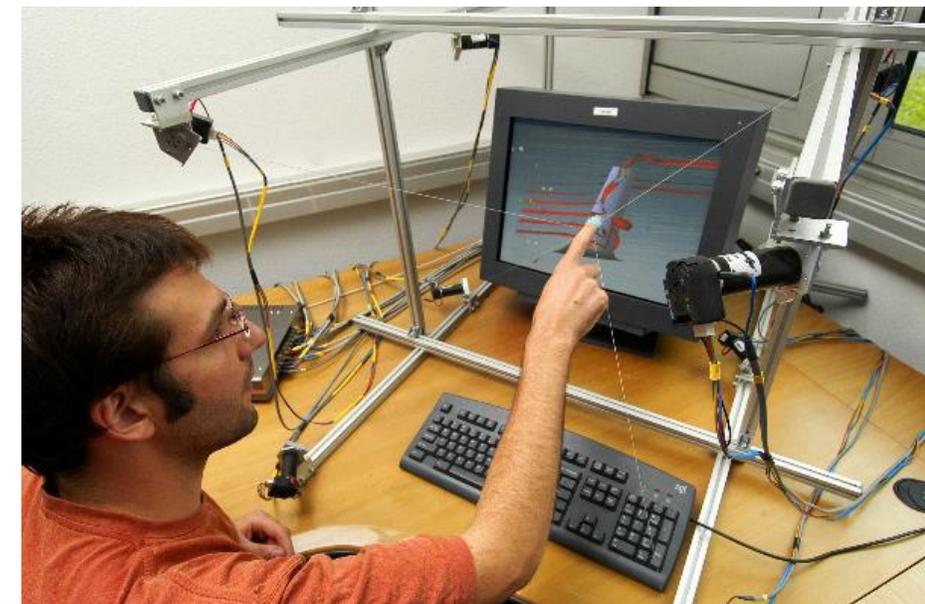


[Spidar IBISC]

[Inca 6D, Haption]



[Tokyo Institute of Technology]

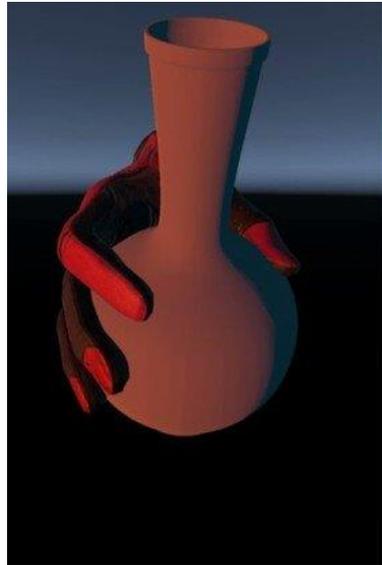


[Inria]

# Structures spécifiques

Recherche

Caractéristiques mécaniques et métrologiques adaptées à des contraintes ou métiers spécifiques



[Microsoft Research X-Rings]



# Stimulations tactiles

Matrice d'aiguilles (cf. lecture du braille)

Piézo-électrique : Onde stationnaire indente une surface lors du déplacement du doigt ( $\mu\text{m}$ )

Alliages à mémoire de forme

1 forme préalablement mémorisée dépendante d'une température

Vibro-tactile

Vibrateurs électro-mécaniques

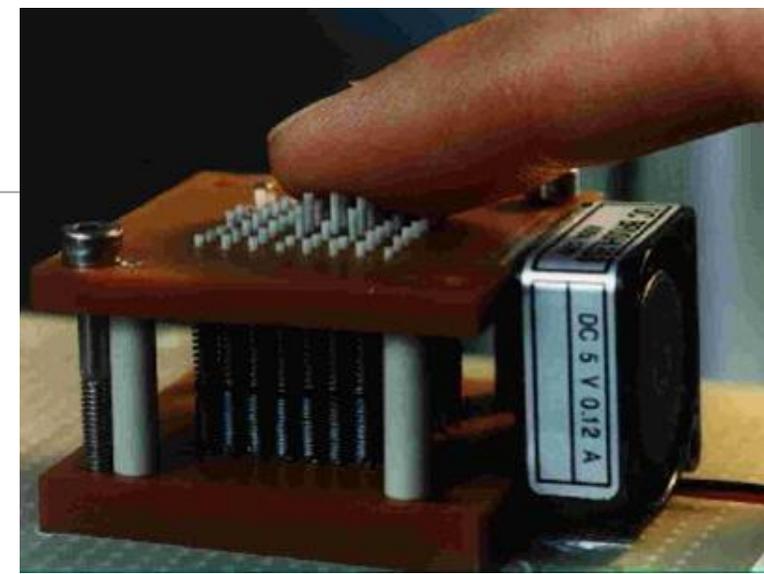
Électro-tactile

Impulsions électriques sur/sous la peau

Pneumatique

Impulsions d'air au bout des doigts

Thermique



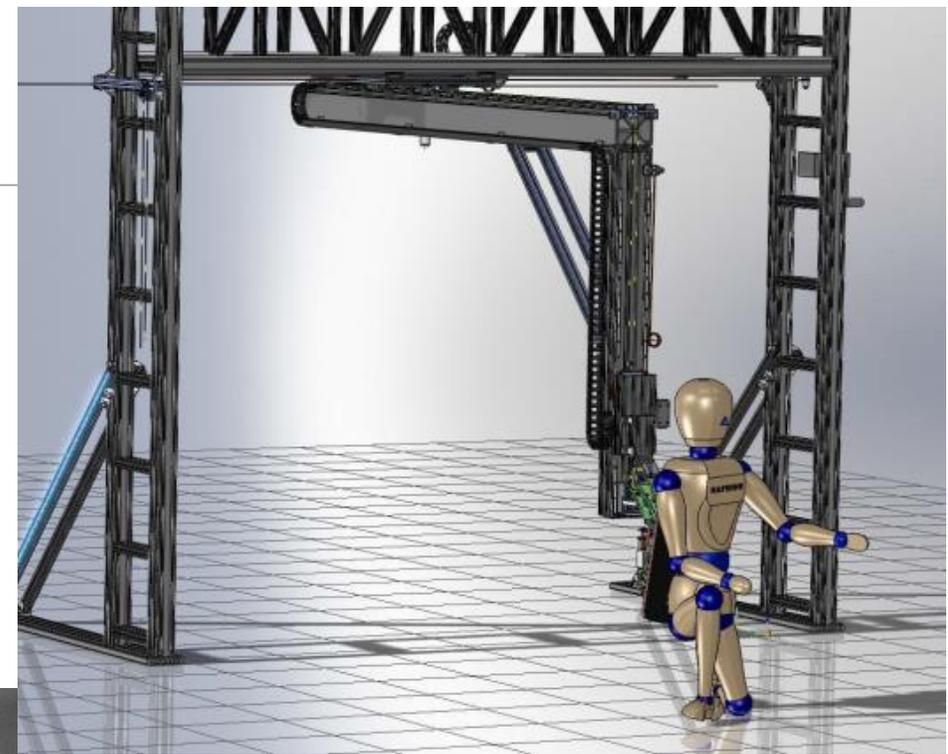
# Combinaisons d'interfaces



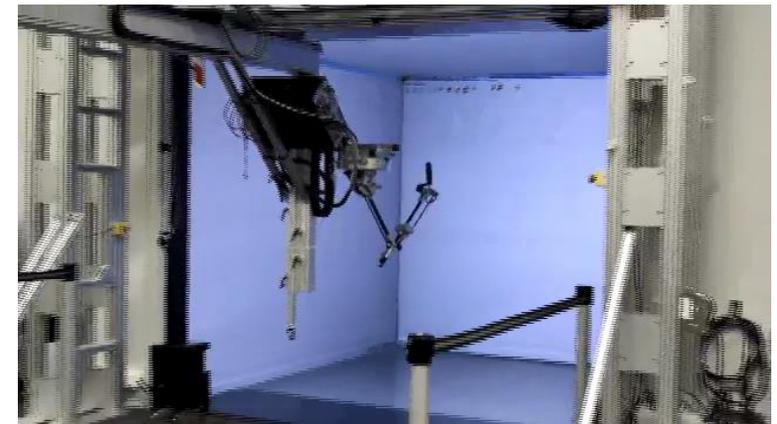
[Haptic Workstation,  
Cyberglove Systems]



[CyberForce , Cyberglove Systems]



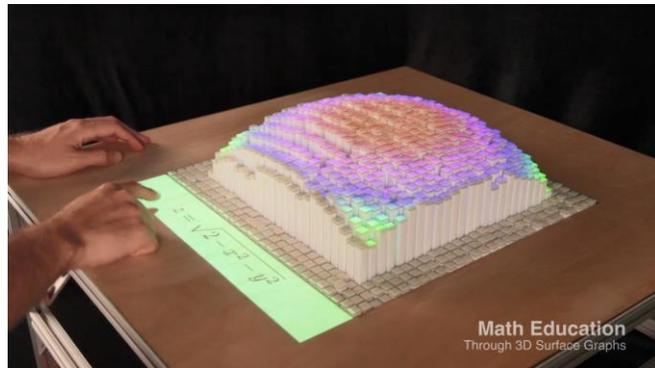
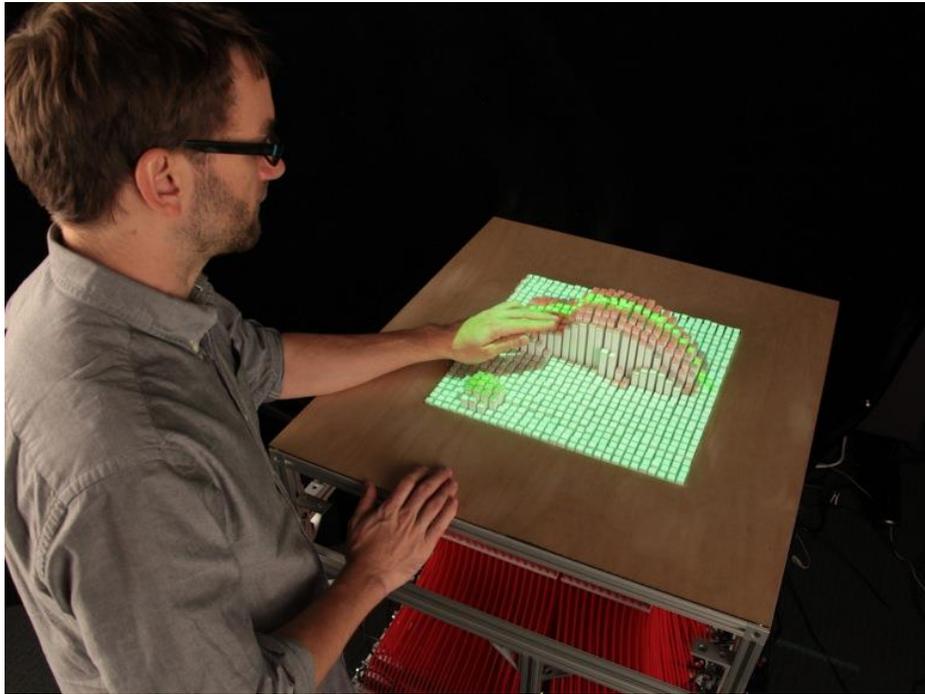
[Scale 1, Haption]



# INTERFACES TANGIBLES

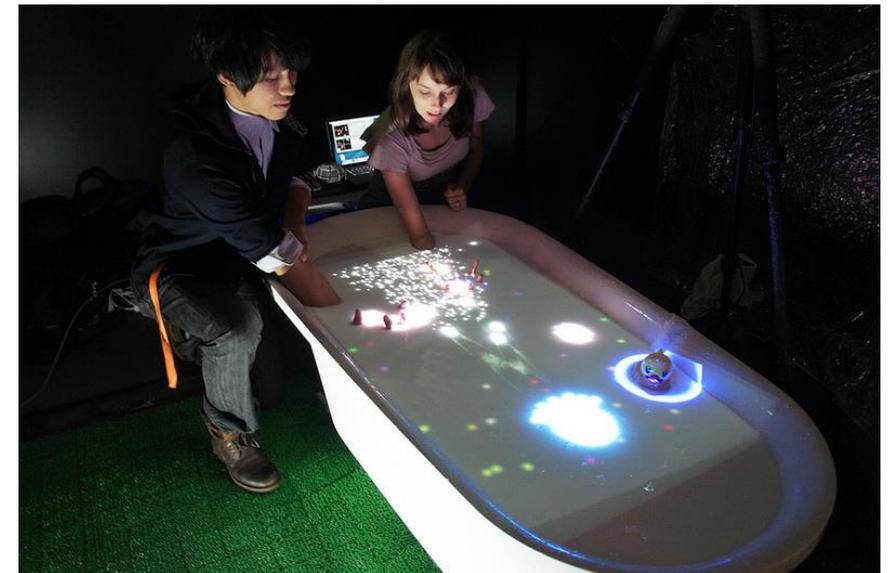
---

# Interfaces tangibles

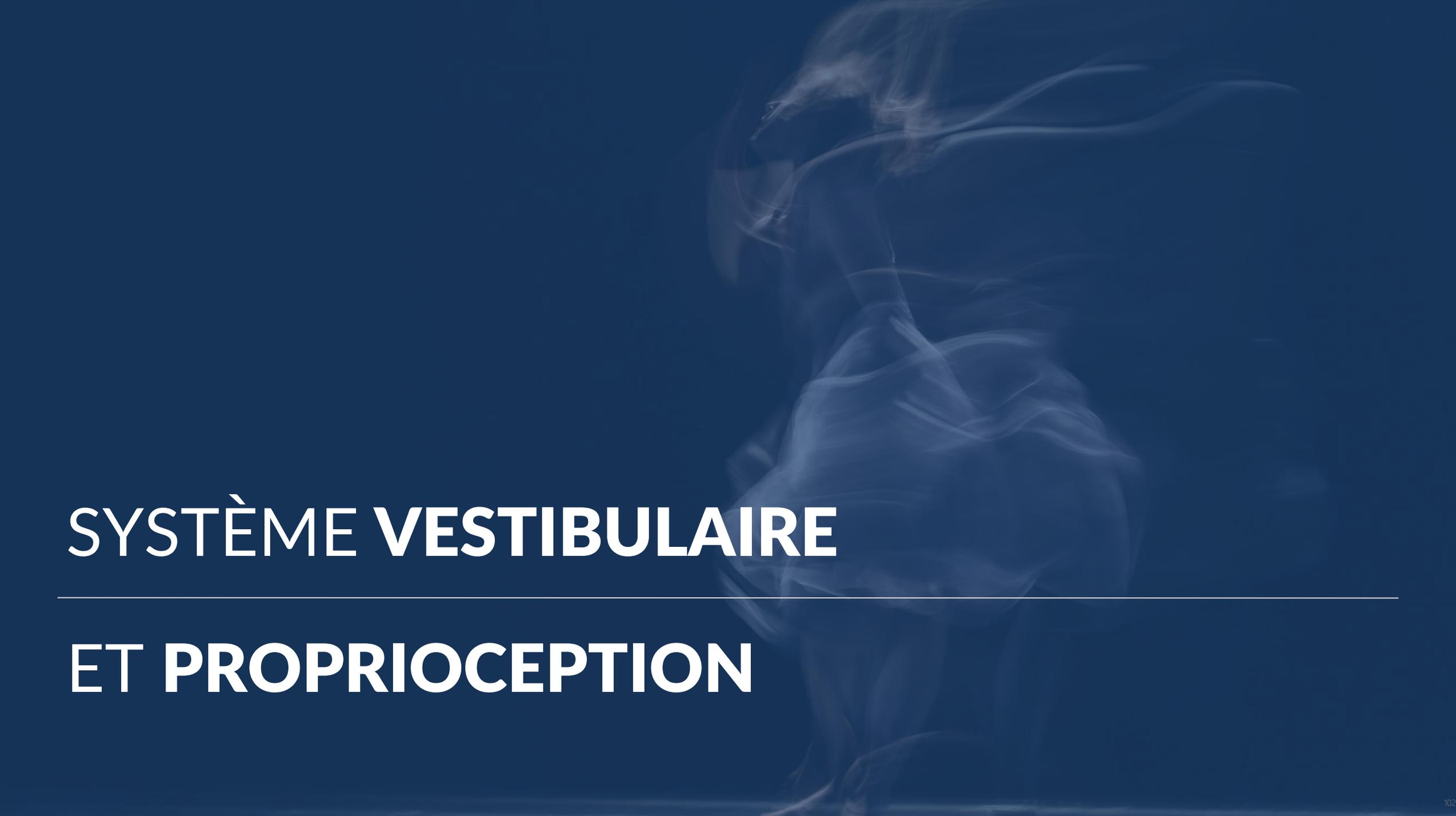


[MIT Media Lab, Tangible Media Group, 2013]

[Reactable]



[AquaTop display, Koike Lab., Tokyo, 2013]



**SYSTÈME VESTIBULAIRE**

---

**ET PROPRIOCEPTION**

# Proprioception

---

Perception, consciente ou non, de la position relative des parties du corps les unes par rapport aux autres

- Position des différentes parties du corps, leur direction, leur taux de mobilité

- Déplacements relatifs

- Forces de contractions musculaires nécessaires à la résistance aux mouvements ou aux poids des objets

Organes impliqués

- Capteurs situés dans les muscles, les tendons, les ligaments articulaires mais aussi la peau

- Voies et centres nerveux

Proche de la kinesthésie

# Systeme vestibulaire

---

## Perception

- Du mouvement

- De l'orientation par rapport à la verticale : à la base du sens de l'équilibre

## Stimulé par

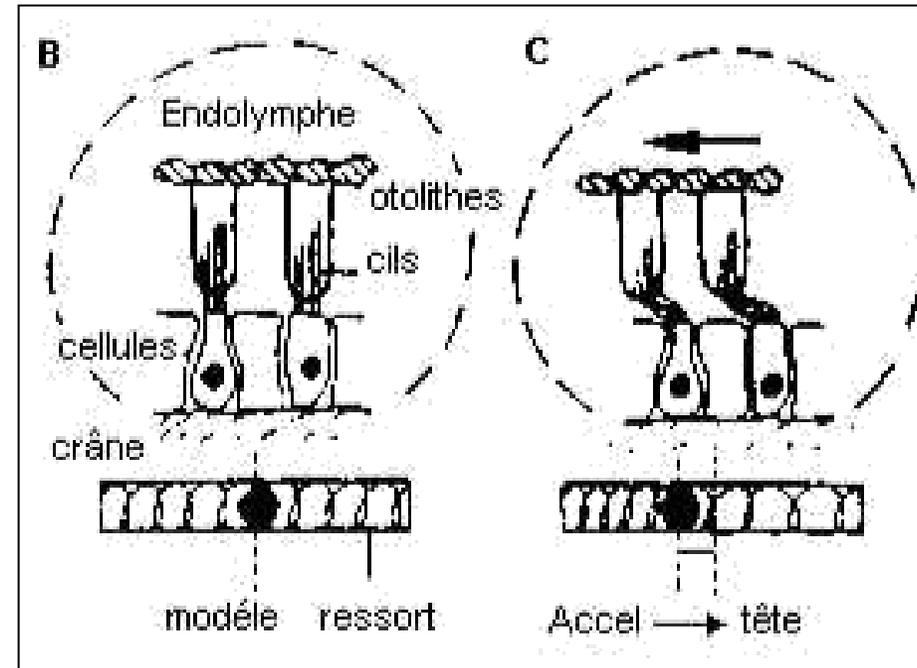
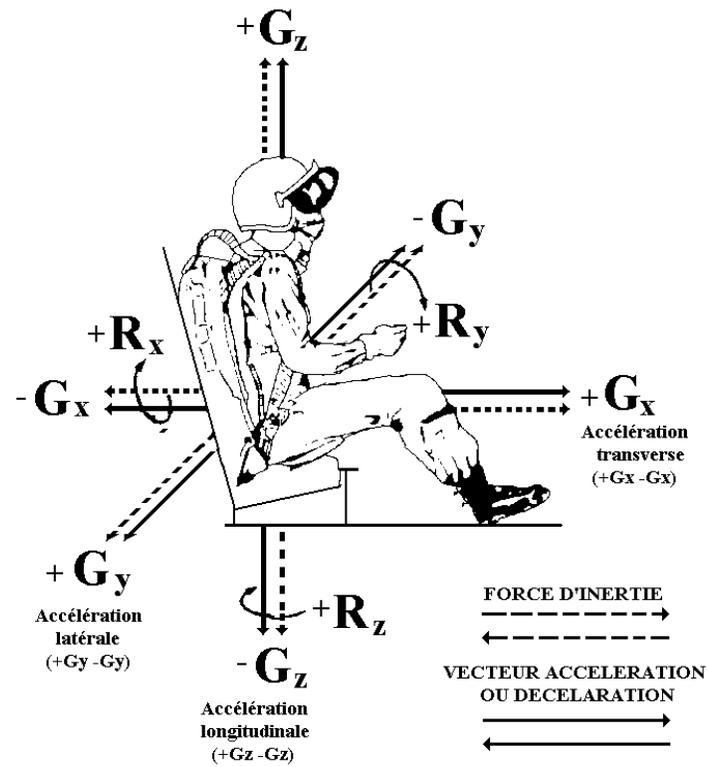
- Gravité

- Accélérations

## Organe impliqué

- Vestibule de l'oreille interne

# Systeme vestibulaire



# Perturbations

---

3 systèmes imbriqués

Vestibulaire

Visuel

Proprioceptif

Cause de malaise/d'illusion si l'une des perceptions l'emporte sur les autres

Train : la vision du départ du train adjacent provoque une sensation de déplacement de son propre train

Mal des transports : perception vestibulaire de déplacement sans retour visuel

Mal des simulateurs : perception visuelle de déplacement sans perception vestibulaire

RV : "cyber sickness" , « cyber-cinétose »

# INTERFACES VESTIBULAIRES

---



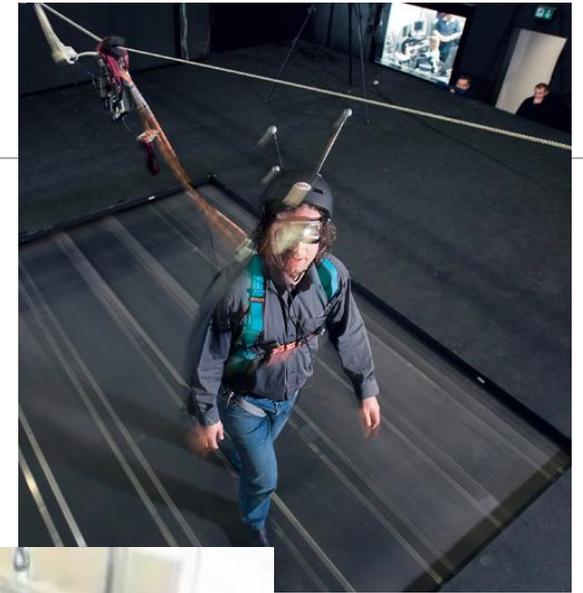
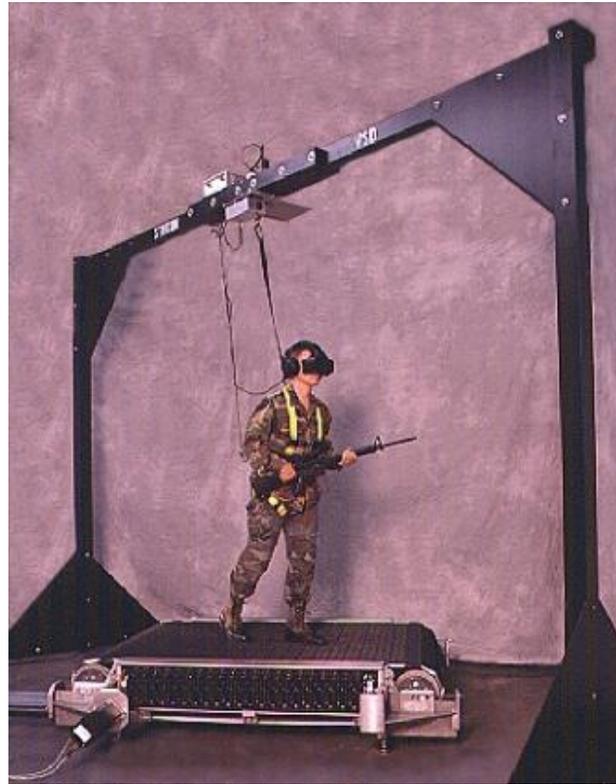
# Déplacement 1D/2D

Marche sur place (capture pieds/genoux), pédalier  
Sphère

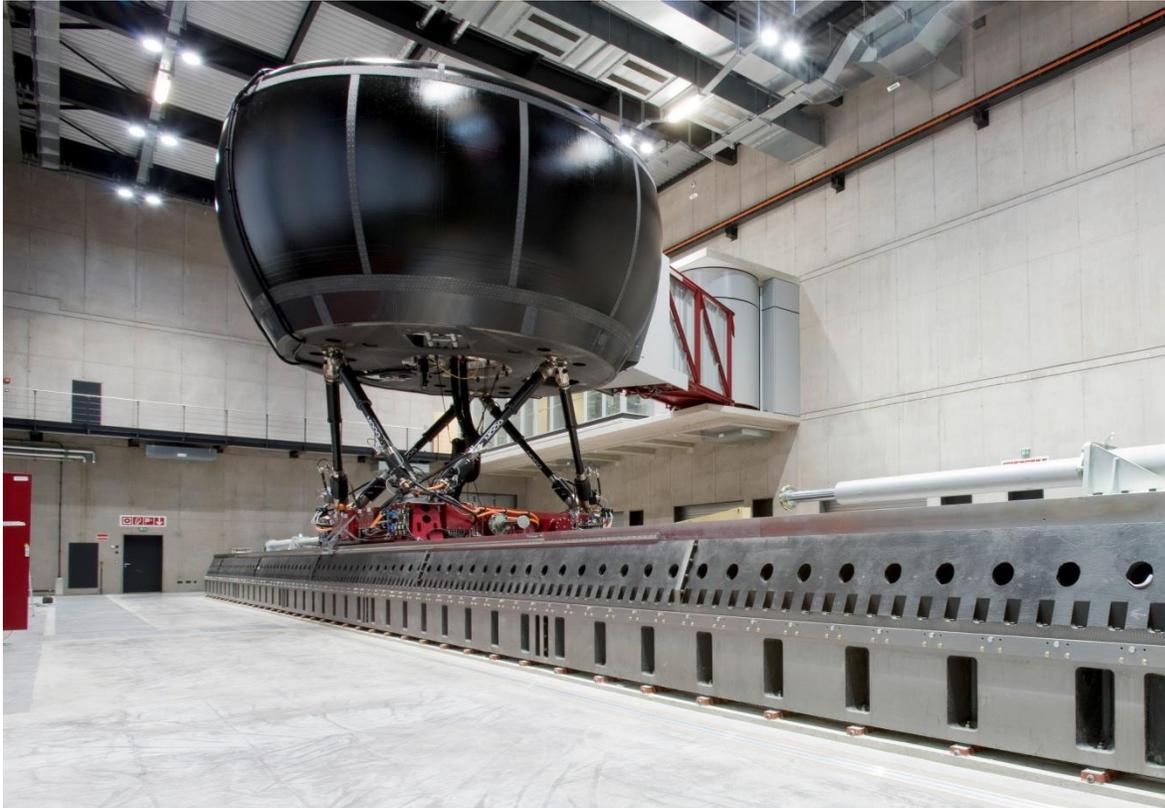


# Déplacement 1D/2D

Tapis roulant 1D, 2D, circulaire  
Plateforme instrumentée



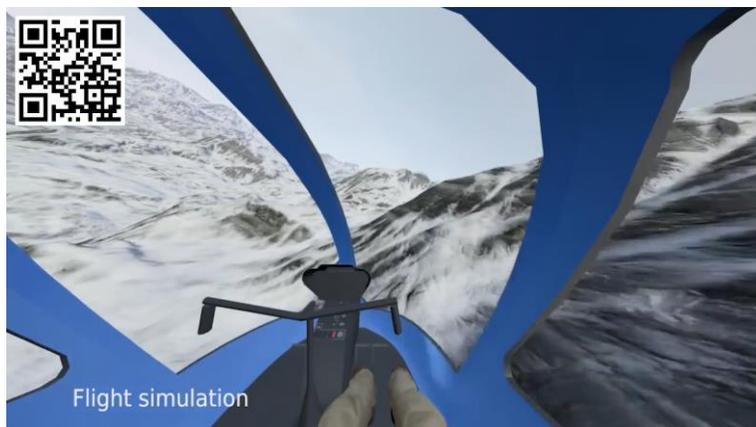
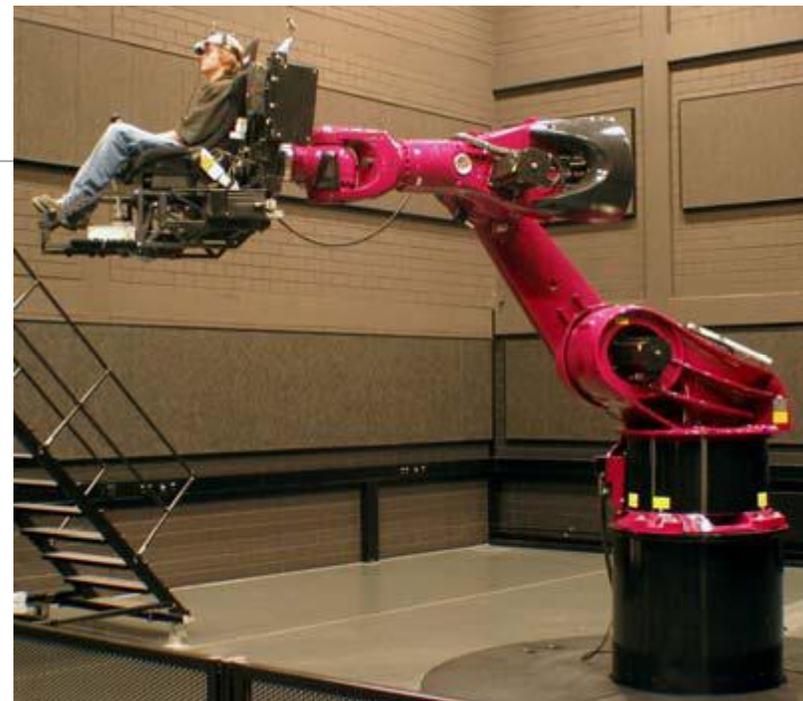
# Plateformes



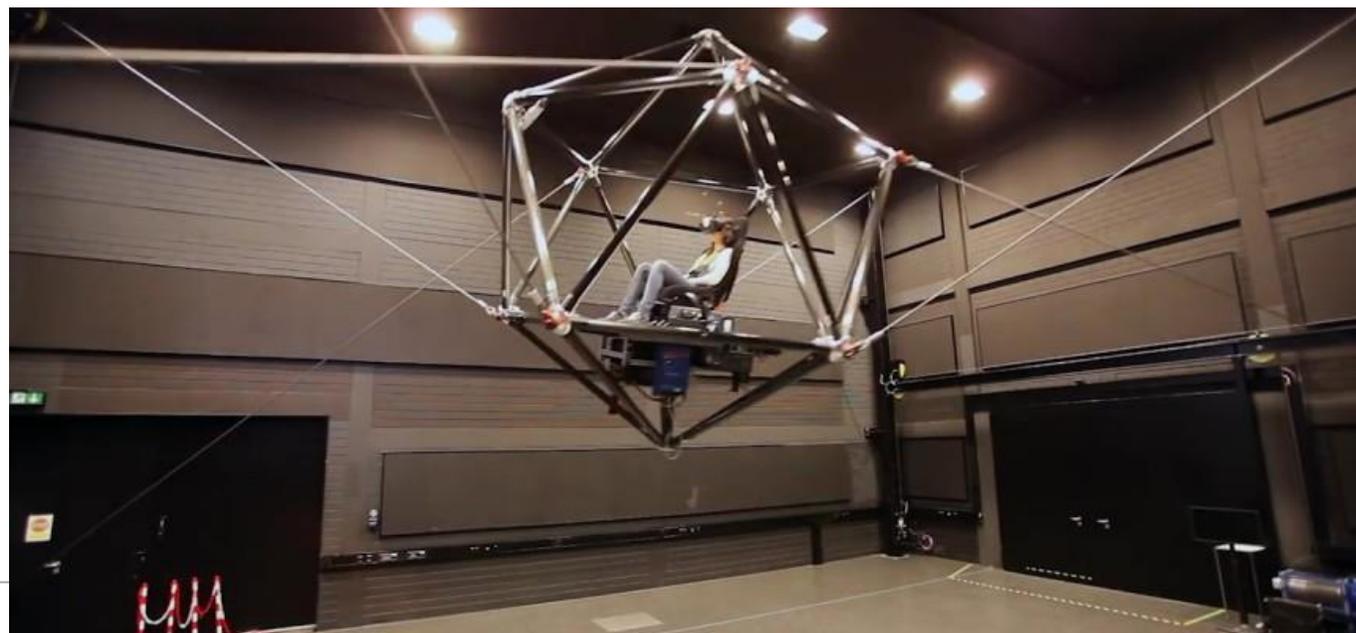
[Mercedes]



# Robots



[Cable Robot, Max Planck Institute]



# CAPTEURS DE LOCALISATION

---

*TRACKERS*



# Objectifs d'un capteur de localisation

---

Donner

La position 3d

Et/ou l'orientation 3d

De

La tête (pour visiocasque, lunettes stéréoscopiques, navigation...)

Le regard

Les mains (interactions, gant de données...)

Autres organes (avatars...)

Autres objets réels (interfaces de commande, objets à recalibrer en RA...)

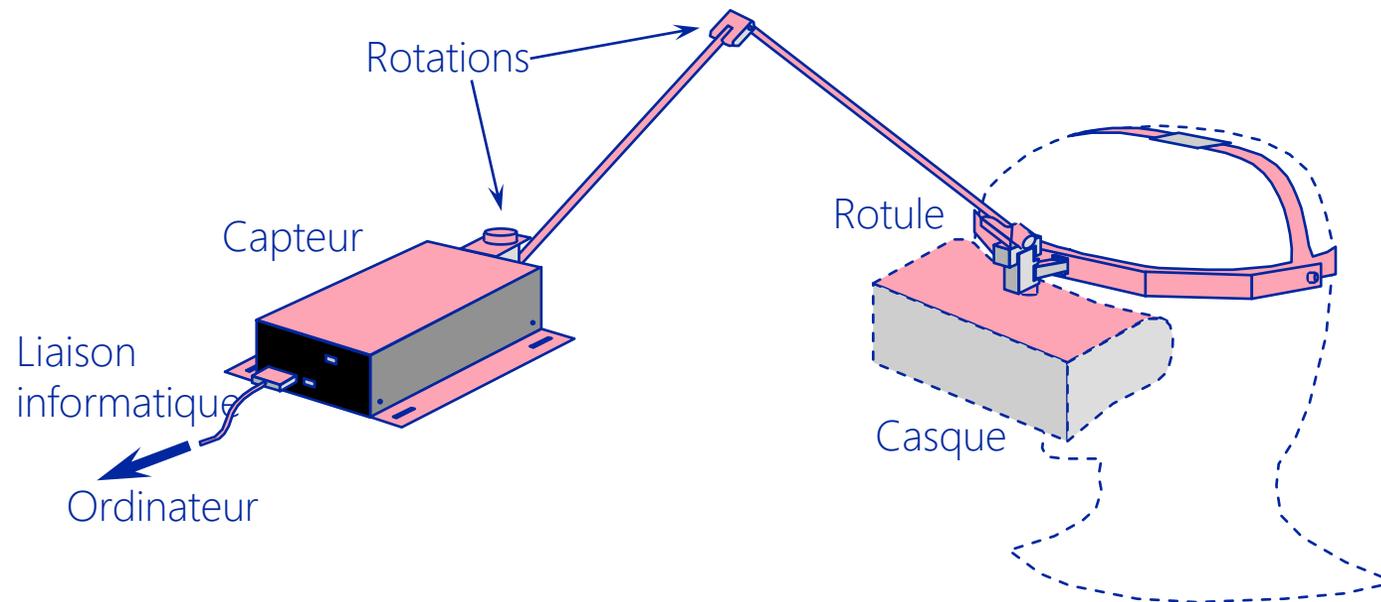
# Capteurs mécaniques

Mesure des variations d'un système mécanique lié à la cible

Mesures des angles par potentiomètres ou codeurs optiques

Précis, non coûteux mais encombrant

Cf. interfaces haptiques

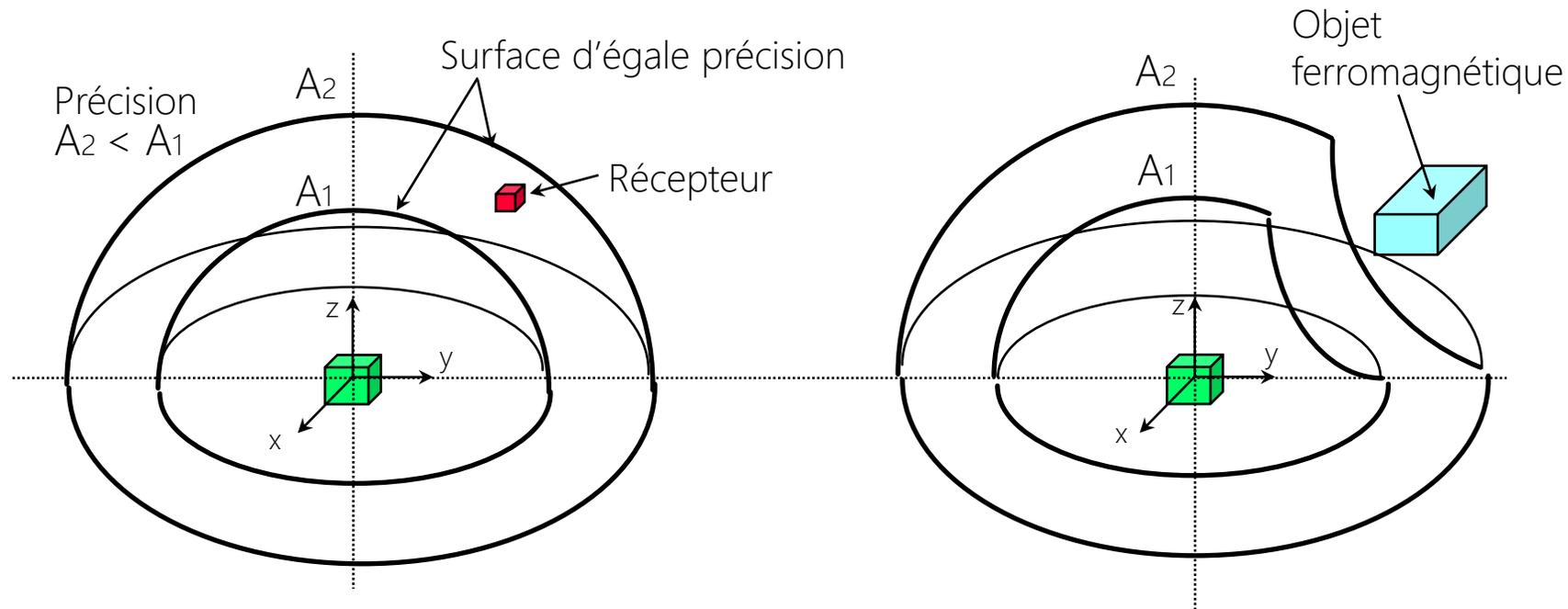


# Capteurs magnétiques

2 ensembles d'antennes magnétiques orthogonales entre elles : 1 émetteur, 1 récepteur

Le signal (champ magnétique) reçu par le récepteur permet de déduire la position et l'orientation de celui-ci par rapport au récepteur

Sensible aux matériaux métalliques de l'environnement

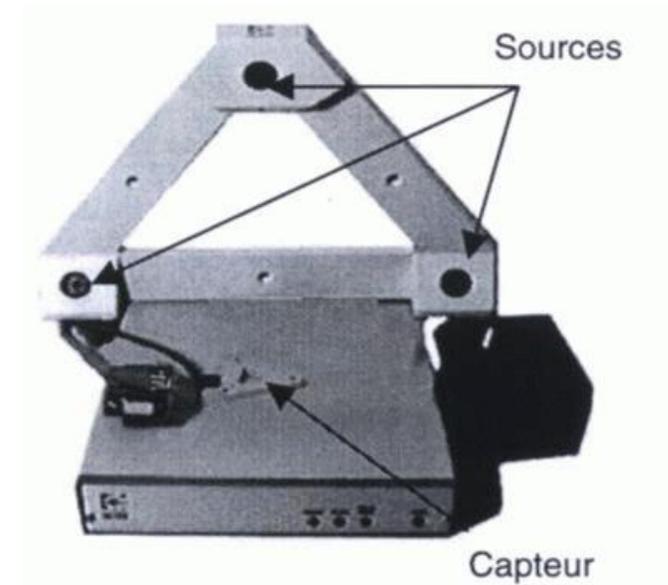
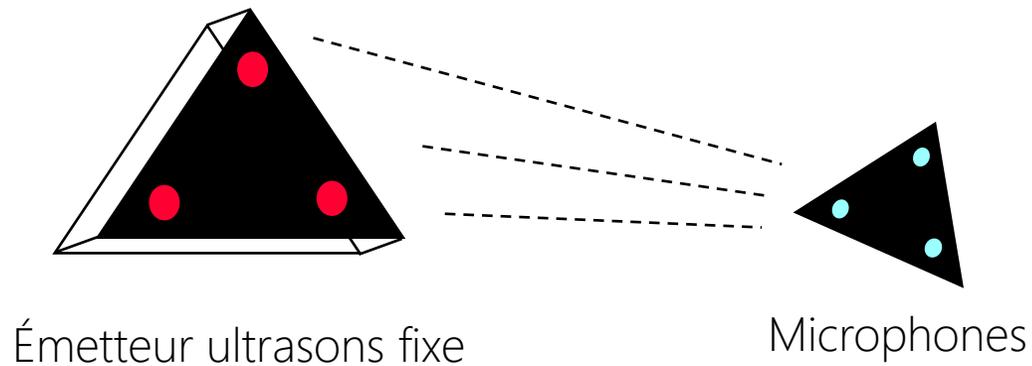


# Capteurs acoustiques

Émetteur et récepteur d'ultrasons

Faible coût

Sensible aux bruits de fond, nécessite une vision mutuelle directe



# Capteurs optiques

## Marqueurs

Passifs : retro-réfléchissant

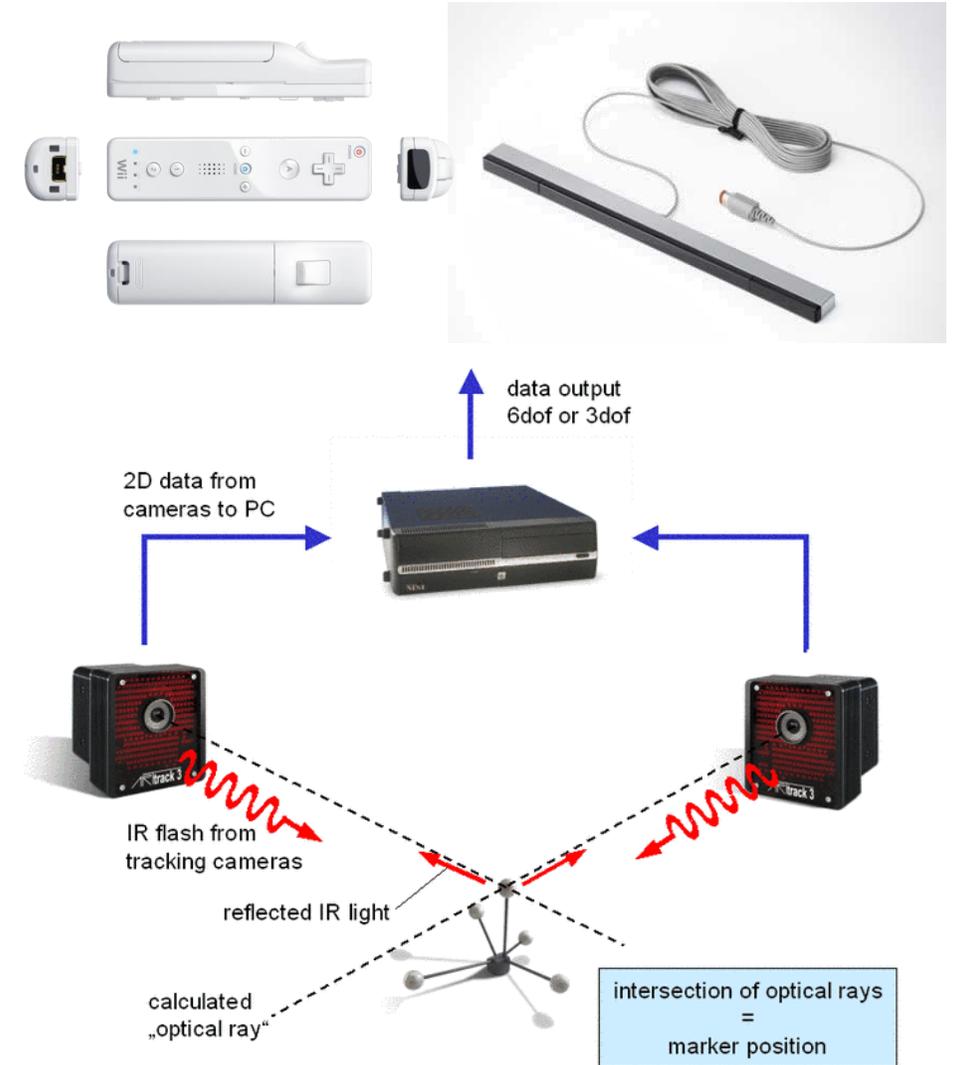
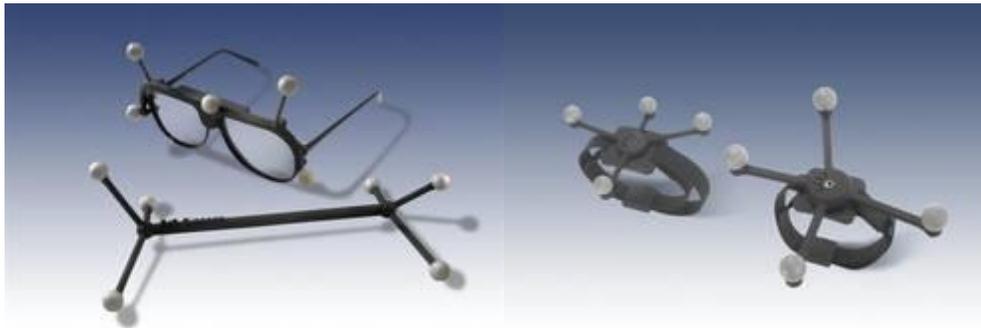
Actifs : diodes

## Capteurs

Caméras infrarouges

Sans fil, grand nombre de cibles possibles

Prix élevé, masquages



# Capture basée vision

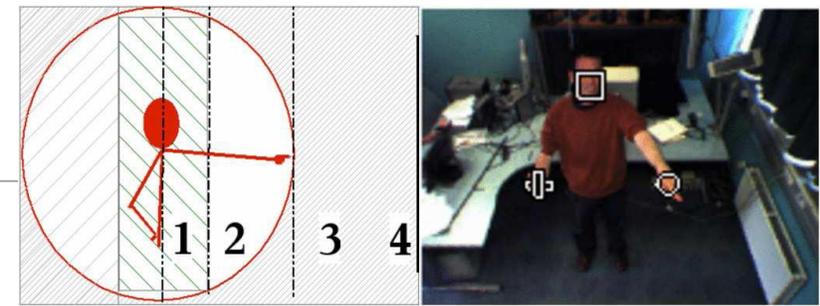
Caméra(s) vidéo (2d/3d)

Algorithmes de traitement d'image et vision artificielle

Avec ou sans marqueurs

Réalité Augmentée (ARCore, ARKit)

HMD inside-out



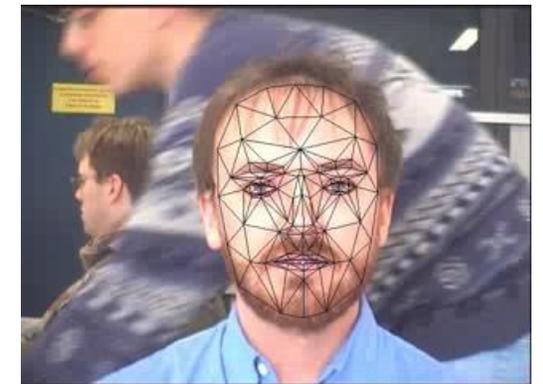
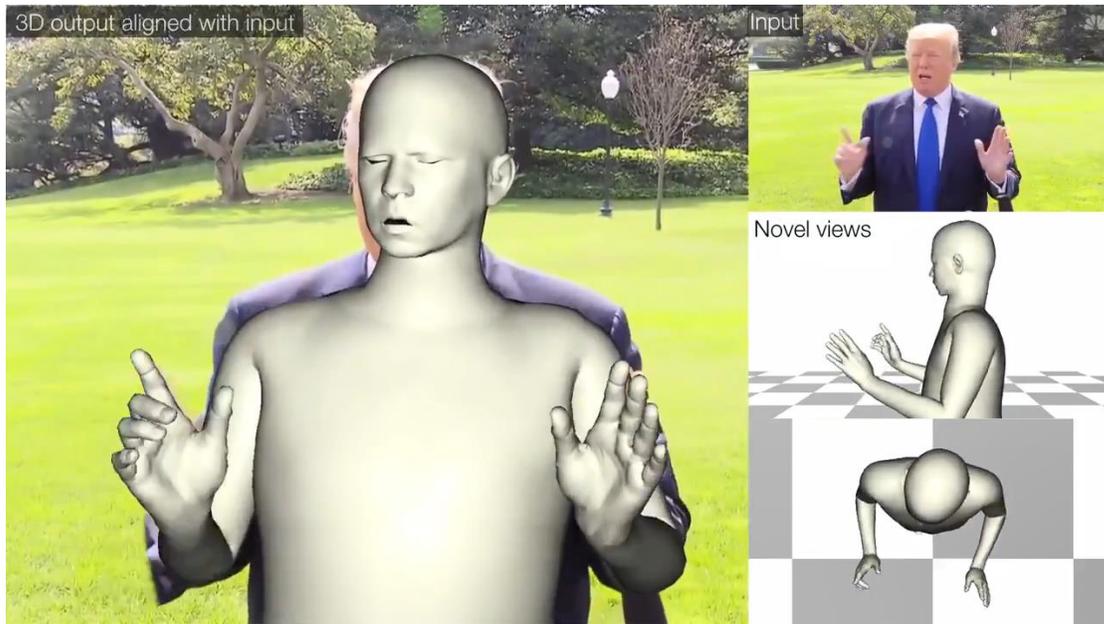
(a) Découpage de l'espace

(b) Image RVB



(c) Image teinte-chair

(d) Image disparité



# Capture 3D

Kinect

Leap motion

Intel realsense



[Oliver Kreylos]



# Capteurs corporels spécifiques

Combinaisons de données

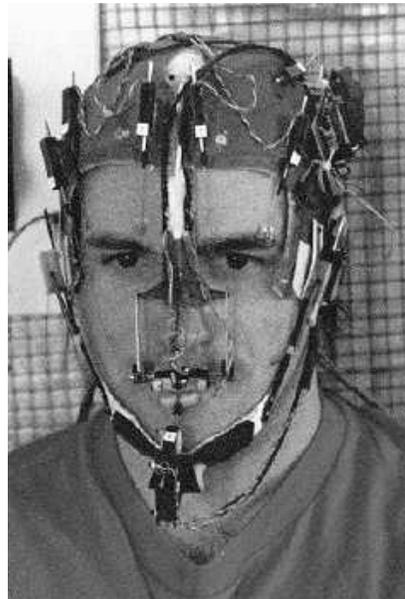
Interfaces de locomotion

Oculomètres

Détection du visage ou des lèvres



[Immersion 2007]



The image features a dark blue background with a silhouette of a person on the right side, wearing a VR headset and holding a controller. In the background, a clownfish is visible, swimming in an aquarium setting. The overall scene is dimly lit, emphasizing the silhouette and the VR experience.

# EFFETS SANITAIRES LIÉS À L'EXPOSITION

---

# Rapport d'expertise ANSES

---



## **Expositions aux technologies de réalité virtuelle et/ou augmentée**

Avis de l'Anses  
Rapport d'expertise collective

Juin 2021

Source :  
<https://www.anses.fr/fr/node/149884>

# Exposition de la population à la RV&A

---

## Caractéristiques des utilisateurs

### Adultes

Hommes = 57%

Age moyen = 40 ans

CSP+ = 43%

Bonne maîtrise des outils technologiques

### Enfants

Garçons = 55%

Age moyen = 12,7 ans

## Classes d'âges les plus représentées

9-11 ans et 12-14 ans

## Exposition

Durée moyenne d'une séance = 1h06 à 1h54 selon le type d'application

Durée médiane = 1h (adultes et enfants)

### Cadre personnel

RV > RA

Jeux vidéos

Smartphone ou console

### Cadre professionnel

RV ≈ RA

Formation, santé, gestion stocks

PC, HMD, écrans

# Effets sanitaires néfastes liés à une exposition à la RV&A

---

300 publications entre 01/2010 et 01/2020

## Cyber-cinétose

« C'est un effet avéré de l'exposition à la RV. Les symptômes semblent réversibles, néanmoins le groupe de travail s'interroge sur leur durée de persistance. »

## Coordination sensori-motrice

« L'effet de l'exposition à la RV et les effets sur l'habileté manuelle et sur la capacité à orienter son corps est avéré. Ces effets peuvent perdurer plusieurs heures après l'exposition, et on suppose que le retour à des performances avant exposition dépend du type d'incongruence vécue. »

# Effets sanitaires néfastes liés à une exposition à la RV&A

---

Effets liés aux agents physiques émis par les dispositifs (champs électromagn., lumière bleue...)

« Les niveaux de champs mesurés sur les casques de RV sont faibles et bien inférieurs aux valeurs limites d'exposition réglementaires. »

« L'effet de la modulation temporelle de la lumière sur le déclenchement de crises d'épilepsie est avéré. » « L'effet de la modulation temporelle de la lumière sur la fatigue visuelle, le déclenchement de maux de tête, de migraines est possible. »

Autres études mais manque de données :

Ergonomie, TMS, hygiène...

Effets neurologique (épilepsie)

Effets sur le développement

Effets psychologiques et psychosociaux

Effets liés à la représentation de soi

# Aspects éthiques

---

Les environnements virtuels ou augmentés ne doivent pas échapper aux questionnements éthiques sous prétexte qu'ils n'appartiennent pas à l'environnement physique.

Les acteurs impliqués doivent prendre en compte les effets (avérés et/ou potentiels) de l'exposition à un environnement virtuel ou augmenté pouvant survenir dans les suites de l'exposition.

# Recommandations

---

Informez les populations sur les effets sanitaires, notamment

Temps de repos après l'exposition, notamment avant l'usage d'un véhicule ou l'utilisation d'outils ou de machines

Arrêter immédiatement son exposition en cas d'apparition de symptômes, sauf en cas d'utilisation dans un cadre thérapeutique ou professionnel accompagné

Encadrement des usages visant à protéger les populations en limitant la survenue des effets

Encadrer l'utilisation des technologies (hors usage privé) : recours à des lieux adaptés (salle de repos), surveillance par des personnes averties...

Plus spécifiquement dans le cadre professionnel: imposer des alternatives à la RV, n'étant pas adaptée à tous ; formation des utilisateurs

Etudes supplémentaires nécessaires

Risques psychologiques et psychosociaux, effets neurologiques, effets de l'incarnation dans un avatar, cinétose...

# BILAN

---



# Bilan

---

Dans l'absolu, nombreux dispositifs et possibilités illimitées

En pratique, dans la plupart des cas :

- Budgets limités

- S'appuyer sur des connaissances, techniques et interfaces bien connues

- Respecter les besoins, les usages et l'ergonomie des utilisateurs finaux

- Toujours du visuel (casque grand public, écran +/- grand, cave)

- Audio simple ou absent

- Vibrations, haptique par bras ou absent

- Interaction par dispositif 6 dof avec boutons ou reconnaissance de gestes

- Tracking optique ou basé vision

# Voir ou revoir les vidéos

---

<https://youtube.com/playlist?list=PLVsoGAjYGRjle1pVEHs0TSrtj5BKzOewp>