

Dominique Yolin
dominique@arcrean.com



Techniques d'interaction

- Cours de découverte -

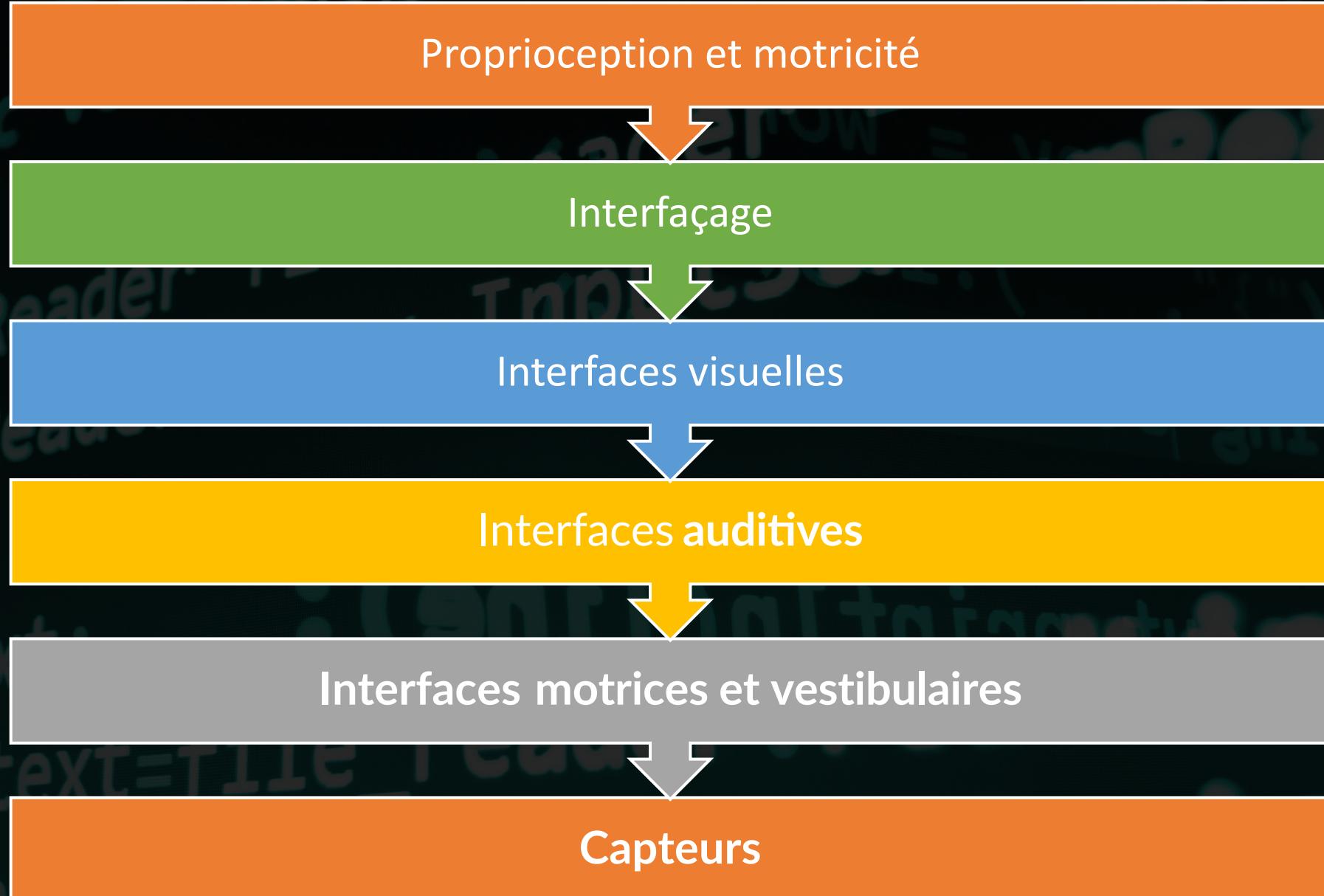


**Immersive, expansive
game world with
hundreds of hours
of content**



**The same ten songs
on repeat forever
and a terrible case
of the tetris effect**

Plan



ME AFTER USING VR



| Proprioception et motricité

Le mouvement : si simple et si complexe...

- Bouger semble si simple : il suffit (après apprentissage) d'avoir l'intention de faire un mouvement et celui-ci se produit.
- Cependant, ce mouvement cache des processus complexes,
 - à la fois volontaires (volonté de bouger)
 - Et réflexes (auto-régulation)
 - qui conduisent aux gestes souhaités.
- On parle de contrôle « Sensori-Moteur » :
 - Capacité du corps à exécuter et réguler le mouvement par ses propres moyens et via ses différents capteurs.
 - Cela renvoie à différents systèmes qu'il convient de définir

Le système somesthésique

➤ Système permettant d'avoir des sensations liées à différents récepteurs

➤ Type de sensation

- Température -> Thermoception
- Pression -> Mechanoreception
- Douleur -> Nociception
- Position -> Proprioception

➤ Self-awareness vs self-consciousness

- Self-awareness : désigne le fait de se reconnaître et de distinguer ce qui est à soi de ce qui est aux autres.
- Self-consciousness : désigne le fait qu'un être soit capable d'introspection sur toutes les actions réalisées par lui-même, mais également de la perception des autres, de l'image qu'elle renvoie.

Définitions

➤ Somesthésie

- « *le domaine de la sensibilité qui concerne la perception consciente de toutes les modifications intéressant le revêtement cutanéo-muqueux, les viscères, le système musculaire et ostéo-articulaire.* »
- C'est l'ensemble des capacités du corps à recevoir les informations sensorielles, afin notamment de maintenir une homéostasie. Elle englobe donc ici toutes les notions que nous aborderons par la suite.

➤ Kinesthésie

- Elle a pour définition : « Perception consciente de la position et des mouvements des différentes parties du corps. ».
- Cette notion renvoie donc à la capacité du corps à « sentir le mouvement » (= connaître la dynamique de tous nos segments corporels)

➤ Statesthésie

- Cette notion fait référence à la sensibilité posturale (=e sens de la position corporelle)
- Capacité du corps à gérer sa position, lorsqu'il est immobile (que ce soit debout, assis ou allongé...)

➤ Equilibre

- « *Attitude ou position stable (généralement verticale pour le corps humain) d'un corps ou d'un objet dont le poids est partagé également des deux côtés d'un point d'appui, de sorte que ce corps ou cet objet ne bascule ni d'un côté ni de l'autre.* ».
- Capacité d'une personne à ne pas tomber (ie à lutter contre des forces qui peuvent le faire tomber)

➤ Proprioception

- « *l'information afférente, incluant le sens de la position articulaire, la kinesthésie, et la sensation de résistance* » Todd & al. (2012).

Définition proprioception

» « *La proprioception représente la production d'informations ou signaux transmis au Système Nerveux Central (SNC) issues des différents propriocepteurs situés – dans les muscles, les tendons, les ligaments, les articulations et également les fascias ainsi que la peau – permettant la représentation des mouvements des membres entre eux, non médiée par le sens de la vision ».*

O.Allain (2017)

- » 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
- » Proche de la Kinesthésie

La proprioception

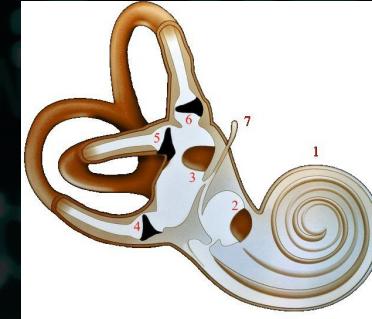
➤ Les sens proprioceptifs renseignent sur

- la position et les mouvements du corps et de ses membres par rapport à l'environnement
- Les forces exercées sur les muscles et les tendons

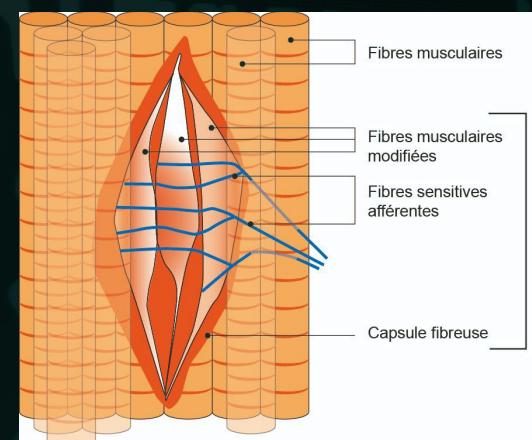
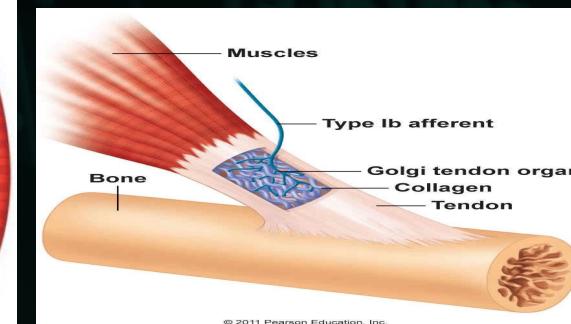
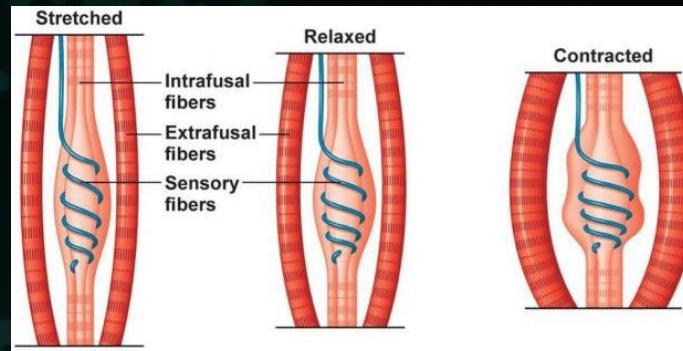
➤ Grâce à des récepteurs proprioceptifs

- Les systèmes vestibulaires (oreille interne)
 - forment une centrale inertie
- Des mécanorécepteurs au niveau des muscles et articulations
 - Capteurs situés dans les muscles, les tendons, les ligaments articulaires mais aussi la peau
 - Voies et centres nerveux
- mais aussi la peau

➤ Il est possible de créer virtuellement efforts (forces et couples) sur le corps de l'utilisateur, via des interfaces dites "à retour d'effort" (haptiques)



Oreille interne :
1 Cochlée ;
2 Saccule ;
3 Utricule ;
4 Ampoule du canal postérieur ;
5 Ampoule du canal externe ;
6 Ampoule du canal supérieur ;
7 Canal endolymphatique.



Falcon (Novint), contrôleur haptique

Les propriocepteurs

Algorithm 1 movement ("raise the right arm"):

```
final_state = right_arm_raised  
current_state = None  
while current_state != final_state do  
    brain.ask("proprioceptors")  
    info = proprioceptors.send("right_arm")  
    current_state = brain.process(infos)  
    brain.send_proper_orders("effectors")  
end while
```

Système vestibulaire

➤ Perception

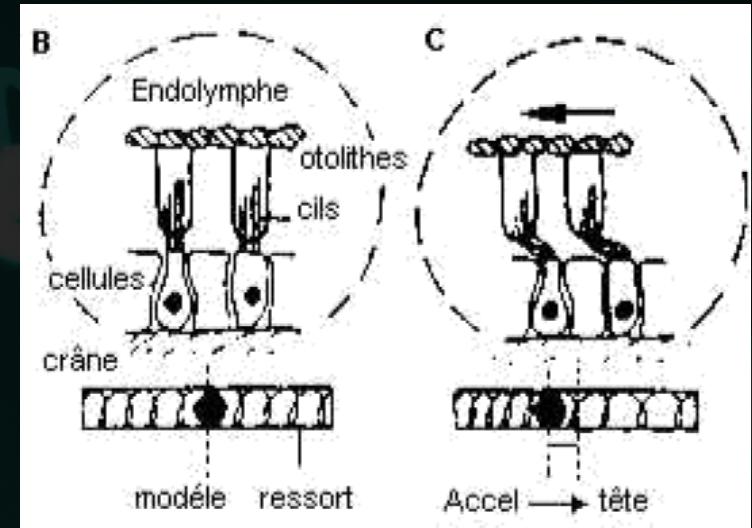
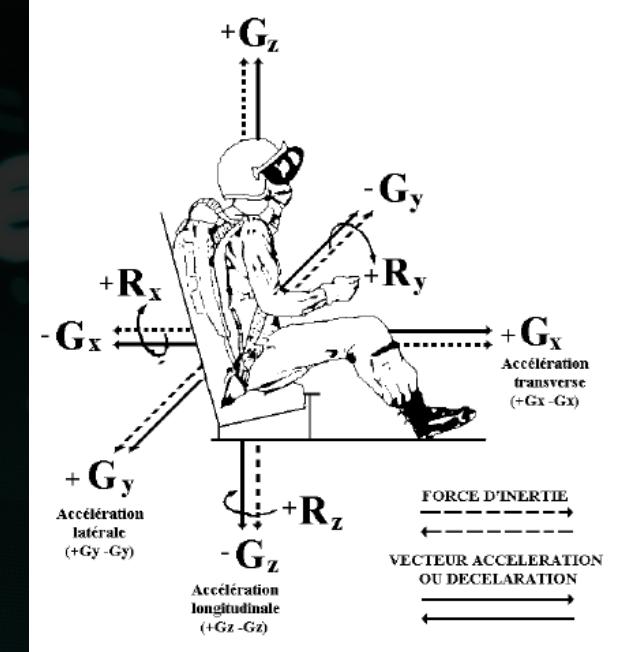
- du mouvement
- De l'orientation par rapport à la verticale : à la base du sens de l'équilibre

➤ Stimulé par

- Gravité
- Accélérations

➤ Organe impliqué

- Vestibule de l'oreille interne



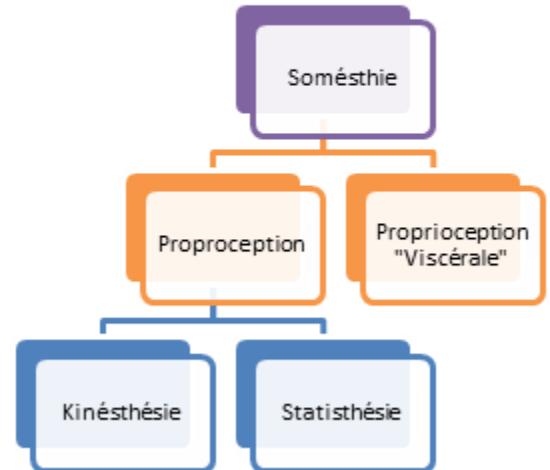
Hiérarchie

➤ La proprioception semble prendre une place toute particulière

- Permet de capter et de collecter les données nécessaires au système nerveux pour s'adapter à son environnement et exécuter le geste le mieux possible.
- Il paraît dès lors important de comprendre ce qu'est cette qualité et de la développer à l'entraînement.

➤ La kinesthésie, la statesthésie et l'équilibre sont des sous-éléments de la proprioception.

Hiérarchie somesthésique et ses éléments associés.



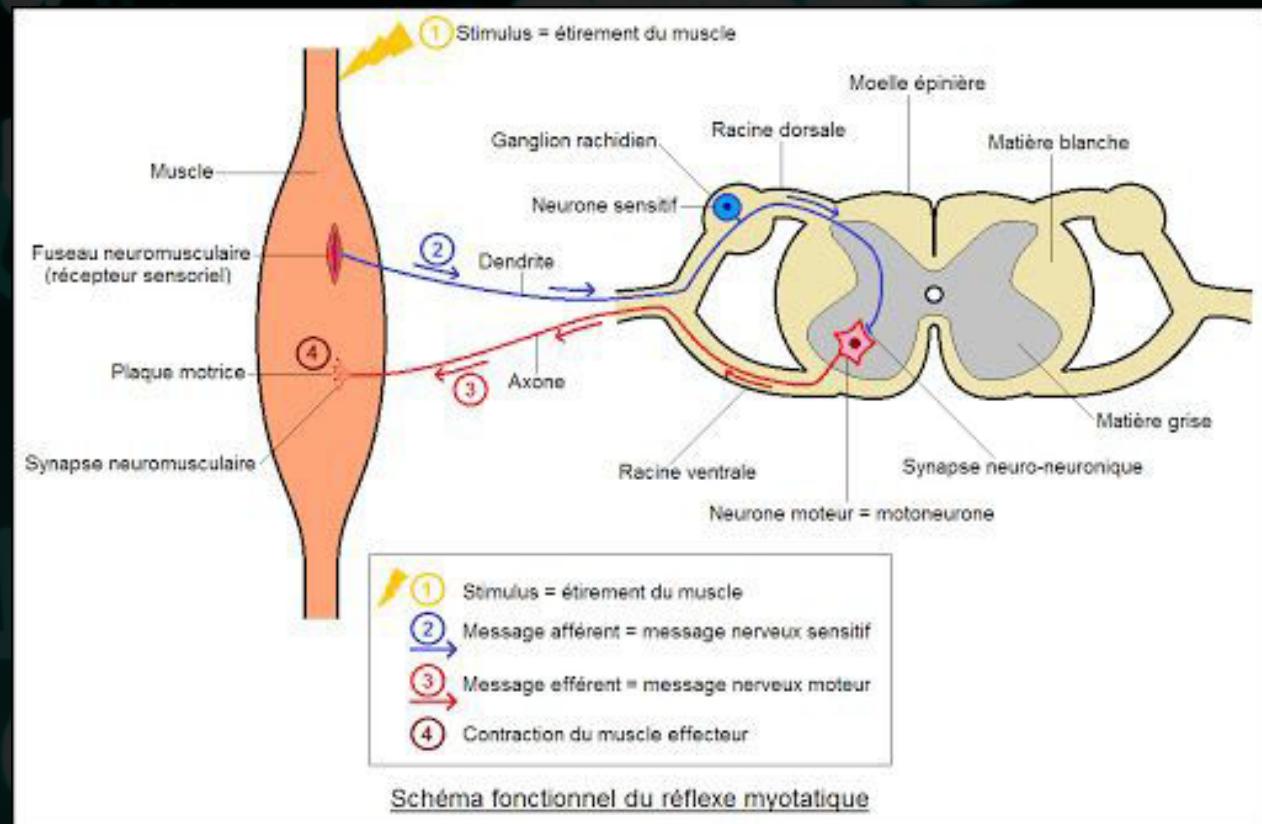
Les réponses motrices

➤ Les mouvements

- passifs (imposé par une force extérieure)
- actifs (commandé par le Système Nerveux Central)

➤ Deux catégories de mouvements actifs

- mouvements non-intentionnels
- mouvements intentionnels



Les mouvements non-intentionnels (réflexes)

➤ Réaction motrice stable

- déclenchée par des stimuli identifiés
- exécutée par des circuits nerveux prédéterminés génétiquement.
- C'est un automatisme moteur non ordonné par l'individu, rapidement exécuté, impulsé par la moelle épinière (le stimulus ne monte pas jusqu'au cerveau)

➤ Innés vs Acquis

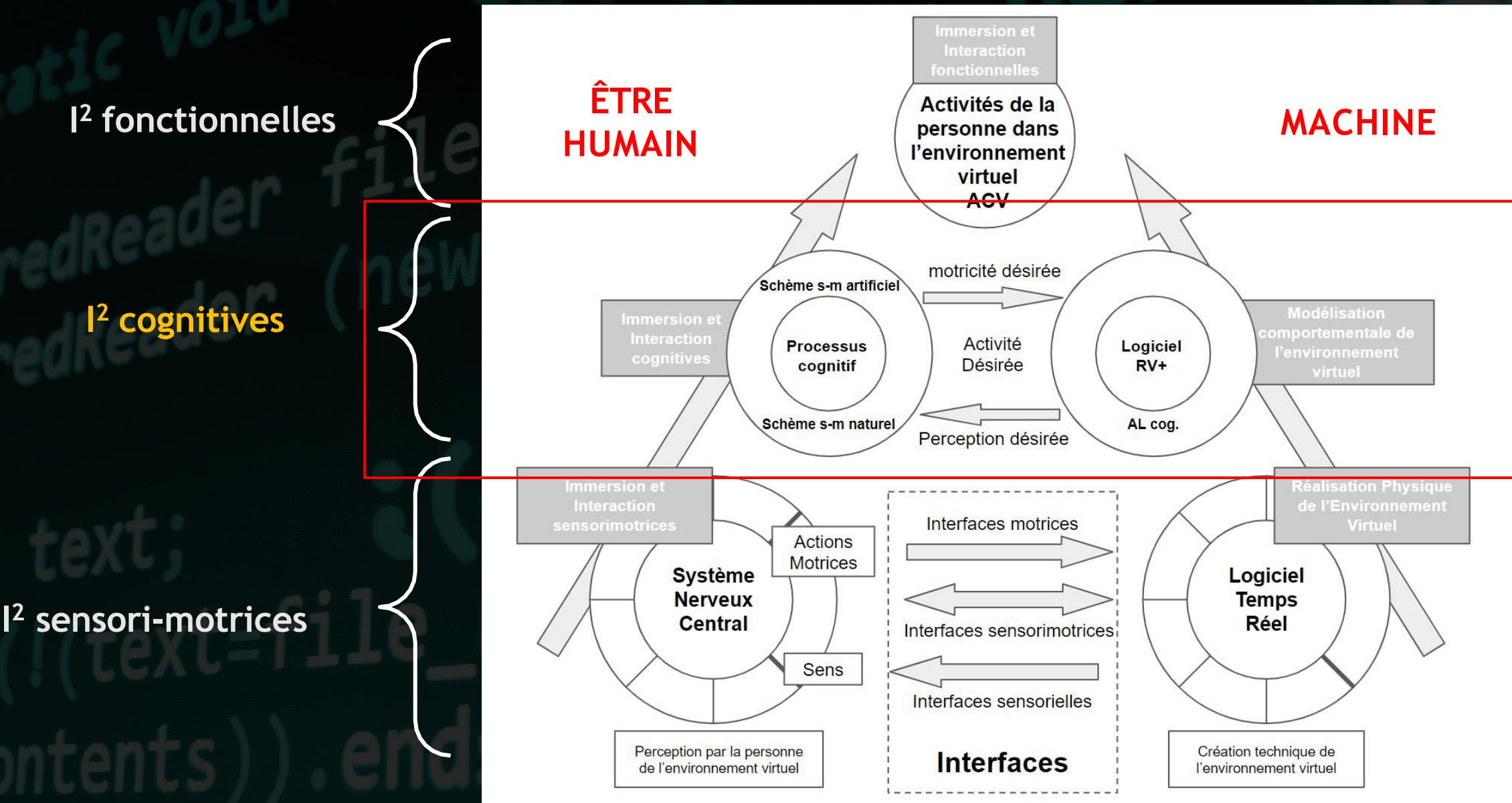
- Certains réflexes sont innés: respiration, déglutition.
- D'autres sont acquis: marche, parole, nage, vélo, activités liées au contrôle de la posture et de l'équilibre, séquences de mouvements automatiques apprises lors d'activités (conduite auto, sport, ... jeux vidéos)

➤ Certains réflexes impactent la XR

Certains réflexes impactent la XR

- ➊ Le réflexe oculomoteur (accommodation et vergence):
 - toutes les applications en XR devraient proposer une option “vision monoscopique” pour avoir un réflexe oculomoteur non contraint
- ➋ Le réflexe vestibulo-oculaire: compensation des mouvements de la tête pour maintenir le regard fixé sur son objectif (stabilisation de l'image rétinienne):
 - en XR via visiocasque, l'inconfort survient si l'affichage du “bon point de vue” ne vient pas “immédiatement” après un mouvement de la tête
- ➌ Le réflexe optokinétique évite le déplacement de l'image obtenue au centre de la rétine quand l'environnement extérieur est en mouvement
 - exemple: mouvement de va-et-vient rapide des yeux d'un voyageurs fixant le paysage, nystagmus optokinétique
- ➍ Le réflexe vestibulo-spinal: maintient la tête en position correcte par rapport aux épaules. Permet de stabiliser le regard lorsque le corps est en mouvement...
 - clé de l'équilibre
 - Le regard anticipe le mouvement ! :
- ➎ **Dans un visiocasque, si la vision est instable ou incorrecte, ou s'il y a contradiction entre le déplacement et l'orientation du regard, l'usager perdra l'équilibre**

Modèle théorique des I2 (Immersion & Interaction)



Perception

➤ Théorie classique “passive”:

- le système sensoriel reçoit passivement des stimulations, puis traite ces informations afin d'identifier objets et événements sous la forme d'une représentation interne.



➤ Théorie “active” de la perception:

- extraction par l'individu, grâce aux mouvements (yeux, tête et corps), de régularités entre les actions effectuées et les stimulations sensorielles résultantes [Bergson, Husserl, Gibson & Piaget]
- Extraction de l'information par la détection des invariants des boucles sensorimotrices



➤ Perception visuelle:

- voir est une action.
- L'oeil cherche à extraire de l'information sur un objet précisément interrogé par le regard.



➤ En RE la perception suivra le même schéma actif,

- il est important de proposer des boucles sensorimotrices invariantes et répétées pour faciliter la perception

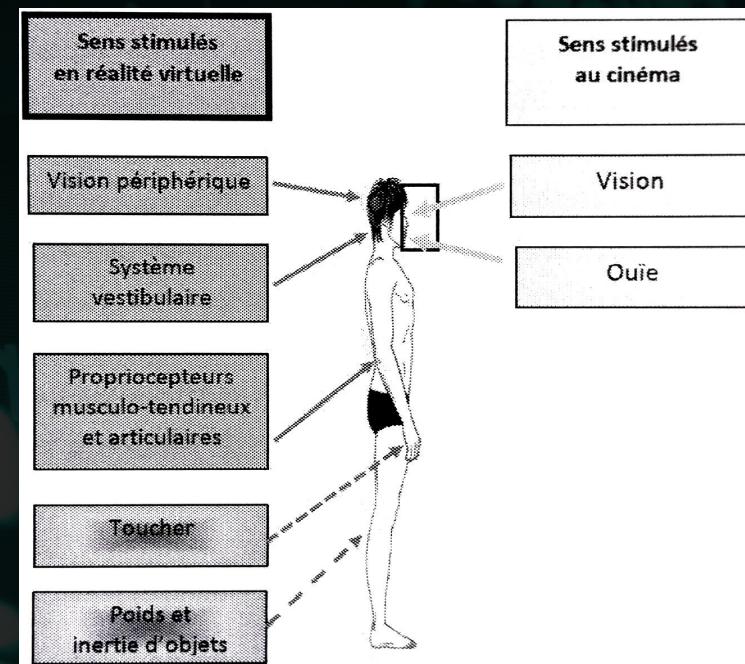
➤ Perception auditive et tactile: idem

Cognition (valable Humains & IA)

➤ Ensemble des processus mentaux dont la fonction est de produire et d'utiliser la connaissance

➤ A partir de

- la Perception : activité cognitive de traitement des stimuli sensoriels pour appréhender et interpréter l'expérience vécue dans l'environnement d'immersion (réel/virtuel)
 - ... est subjective
 - Difficulté au cinéma et en XR à focaliser l'attention de l'usager sur un objet ou une action en particulier
 - En XR, la transmission des actions musculaires (yeux et corps) à l'ordinateur est tout de même un avantage → une IA peut anticiper les actions de l'usager
- la mémoire, le langage, le raisonnement, la prise de décision, l'apprentissage, la résolution de problème, etc.
- les fonctions cognitives supérieures (propres à l'Humain (?)) : jugement, morale, esthétique
- les fonctions exécutives : planification, inhibition des émotions, flexibilité (adaptation aux aléas)
- les émotions



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»

VIRTUAL REALITY



VIRTUAL REALITY REALITY



Interfaçage

Tracking – Principe

➤ Objectif: Suivi de mouvement en 3D

- Suivi d'un point 3D dans l'espace réel et association avec un point 3D dans l'environnement virtuel
- Plus généralement, suivi d'un ensemble de points 3D dans l'espace et association avec un ensemble de points 3D dans l'environnement virtuel

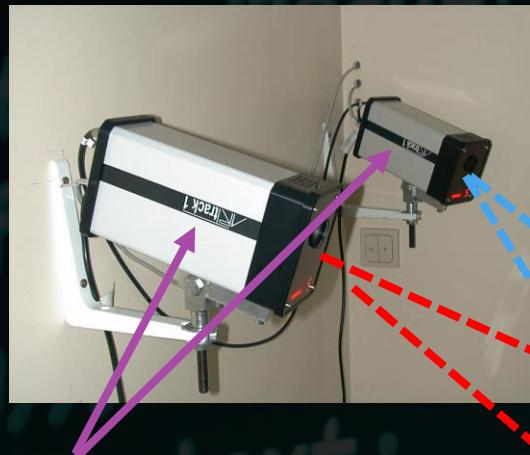
➤ Comment ? Avec l'aide de capteurs :

- caméras Infra-Rouge/boules réfléchissantes,
- marqueurs,
- gyroscopes,
- accéléromètres,
- encodeurs,
- caméras RGB

Caméras Infra-Rouge et marqueurs – Ex : système ARTTrack

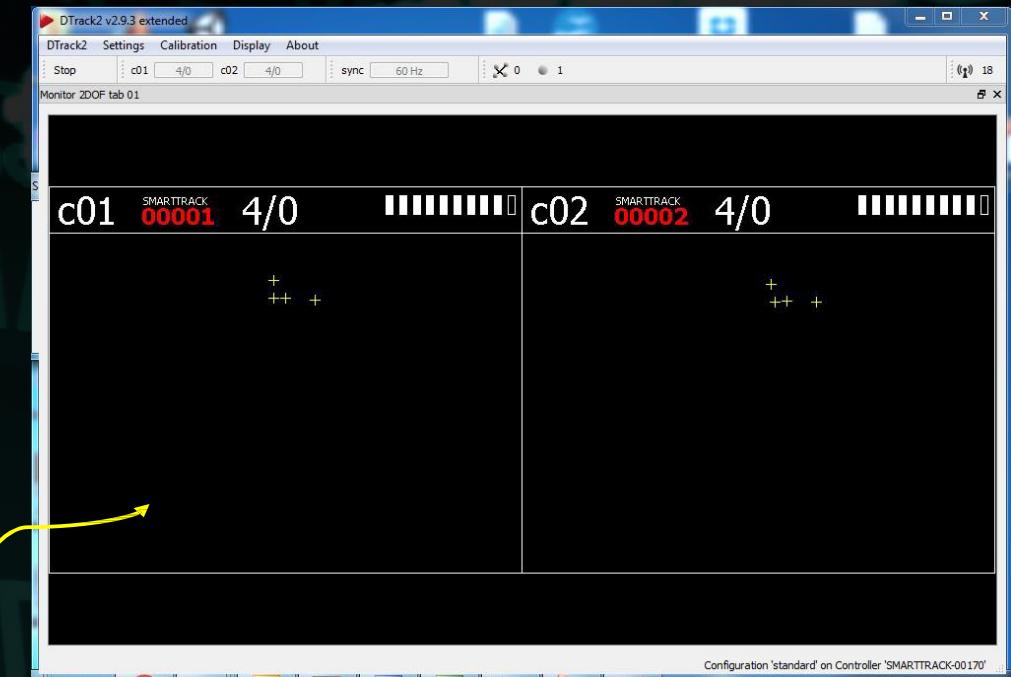
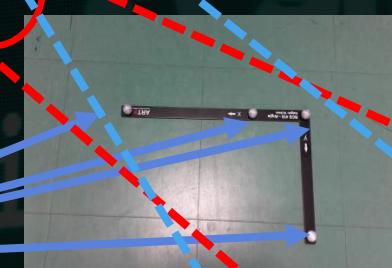
➤ Mesures caméras:

- Emission d'un signal IR selon un cône d'environ 30°
- Puis réception d'un signal réfléchi par les boules réfléchissantes.



➤ 2 caméras ARTTrack1 C01 et C02 synchronisées

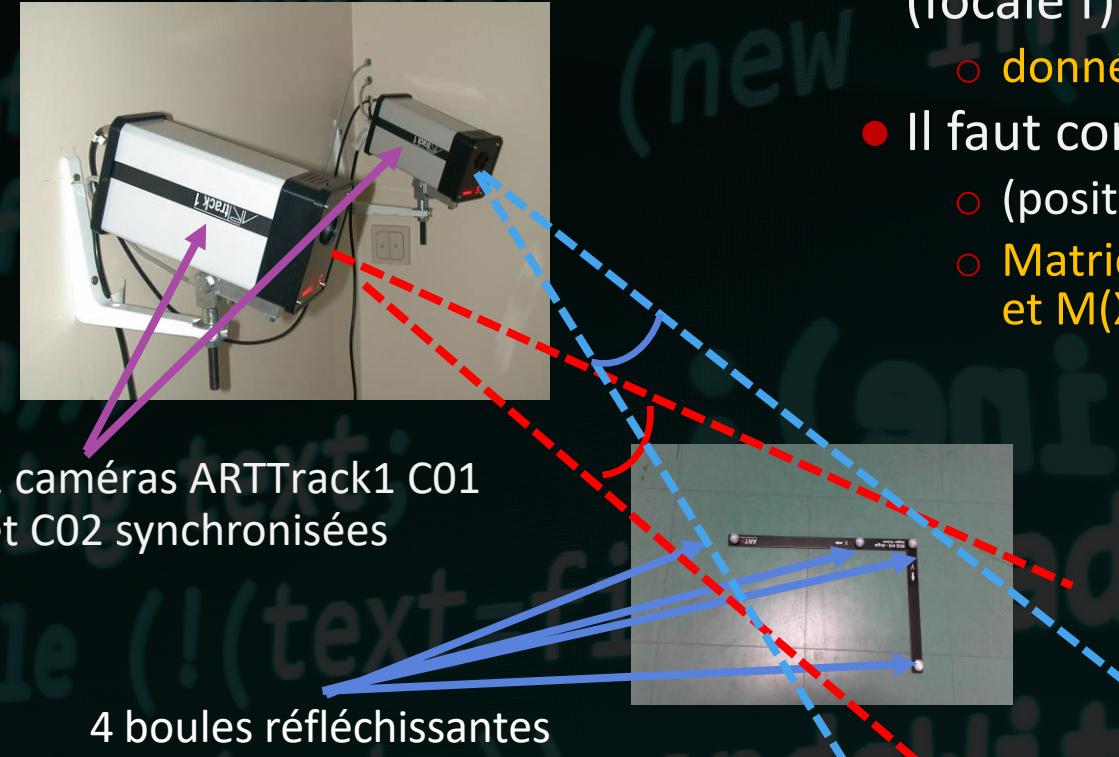
4 boules réfléchissantes



Les 4 boules réfléchissantes sont captées par les 2 caméras C01 et C02 (logiciel DTRACK)

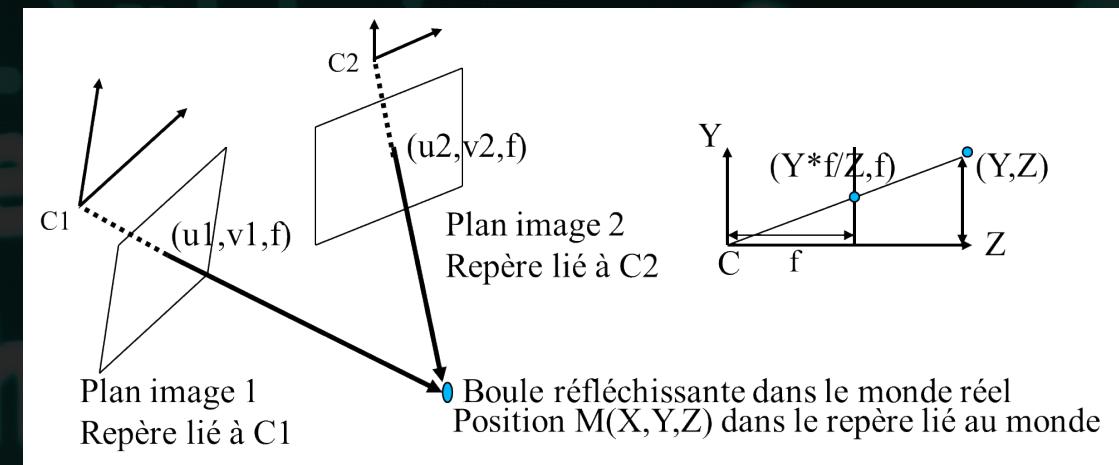
On connaît leurs positions 2D dans le repère des 2 caméras

Caméras Infra-Rouge et marqueurs – Ex : système ARTTrack

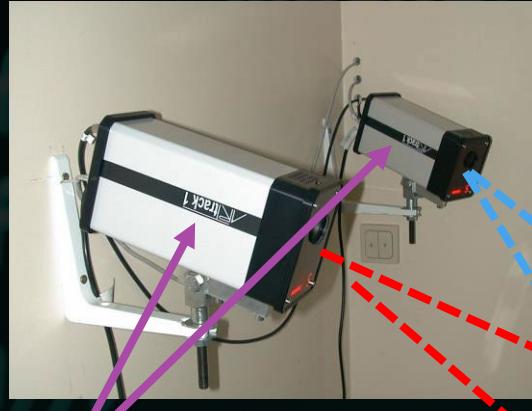


➤ À partir des positions 2d des caméras, comment obtenir les positions 3d des boules réfléchissantes ?

- Il faut connaître les paramètres intrinsèques des caméras (focale f) :
 - données constructeur fournies sur le système ARTTrack.
- Il faut connaître les paramètres extrinsèques des caméras
 - (position et orientation des caméras dans le repère du monde :
 - Matrices de passage $R1$ et $R2$ à déterminer entre $[(u1,v1,f),(u2,v2,f)]$ et $M(X,Y,Z)$ à déterminer.



Caméras Infra-Rouge et marqueurs – Ex : système ARTTrack



➤ 2 caméras ARTTrack1 C01 et C02 synchronisées

4 boules réfléchissantes

- Avant de connaître précisément les matrices R1 et R2 :
 - On ne peut pas connaître la position (X,Y,Z) d'une boule réfléchissante dans l'espace réel.
 - On ne peut pas associer une position dans l'espace réel avec une position dans l'espace virtuel.

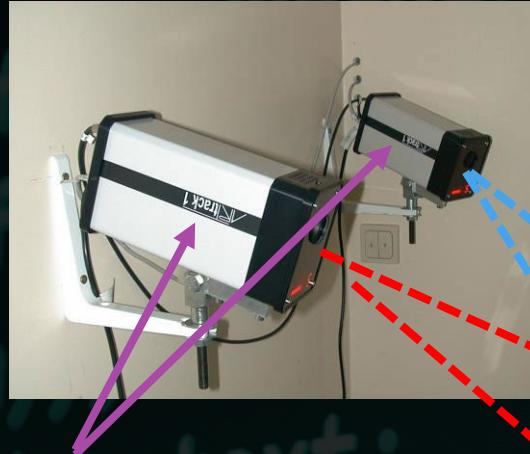
- Pour connaître précisément les matrices R1 et R2 :
 - Il faut effectuer une calibration des caméras C01 et C02
 - Déterminer R1 et R2



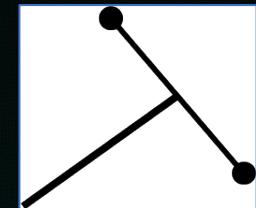
Caméras Infra-Rouge et marqueurs – Ex : système ARTTrack

Procédure de calibration des caméras C01 et C02 :

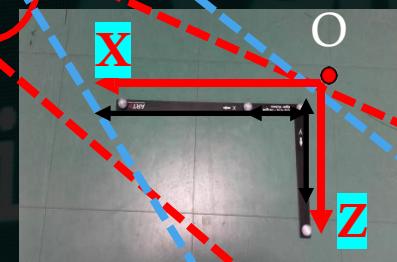
Utilisation d'un repère dont les distances entre boules sont connues.



2 caméras ARTTrack1 C01 et C02 synchronisées



Placer le repère au point Origine souhaité en faisant attention au sens du repère (O_x, O_z) (faire attention à ce que les 4 points du repère soient trackés par les deux caméras)



Balayer l'espace de travail par une tige de longueur connue terminée par deux boules réfléchissantes, qui doivent être trackées à tout moment par les deux caméras.

Pendant ce temps, récupérer tous les points 2d des caméras C01 et C02.

O=origine dans le repère du monde
Axes Z et X dans le repère du monde

L'ensemble des données recueillies permet de déterminer R1 et R2 avec une précision donnée, qui dépend de la phase de calibration.

Caméras Infra-Rouge et marqueurs – Ex : système ARTTrack

- Après la procédure de calibration des caméras C01 et C02 :
 - Précision en position entre 0,2 et 0,3 millimètres
 - Tracking d'objets rigides munis de plusieurs boules réfléchissantes (au moins 4)
 - Position et orientation de l'objet (précision < 1° après calibration)
 - Tracking de tête
 - Tracking de la main
- Les objets trackés se diffèrentient par la géométrie des boules réfléchissantes.
- Besoin de calibrer les différents objets trackés pour apprendre à les différencier.

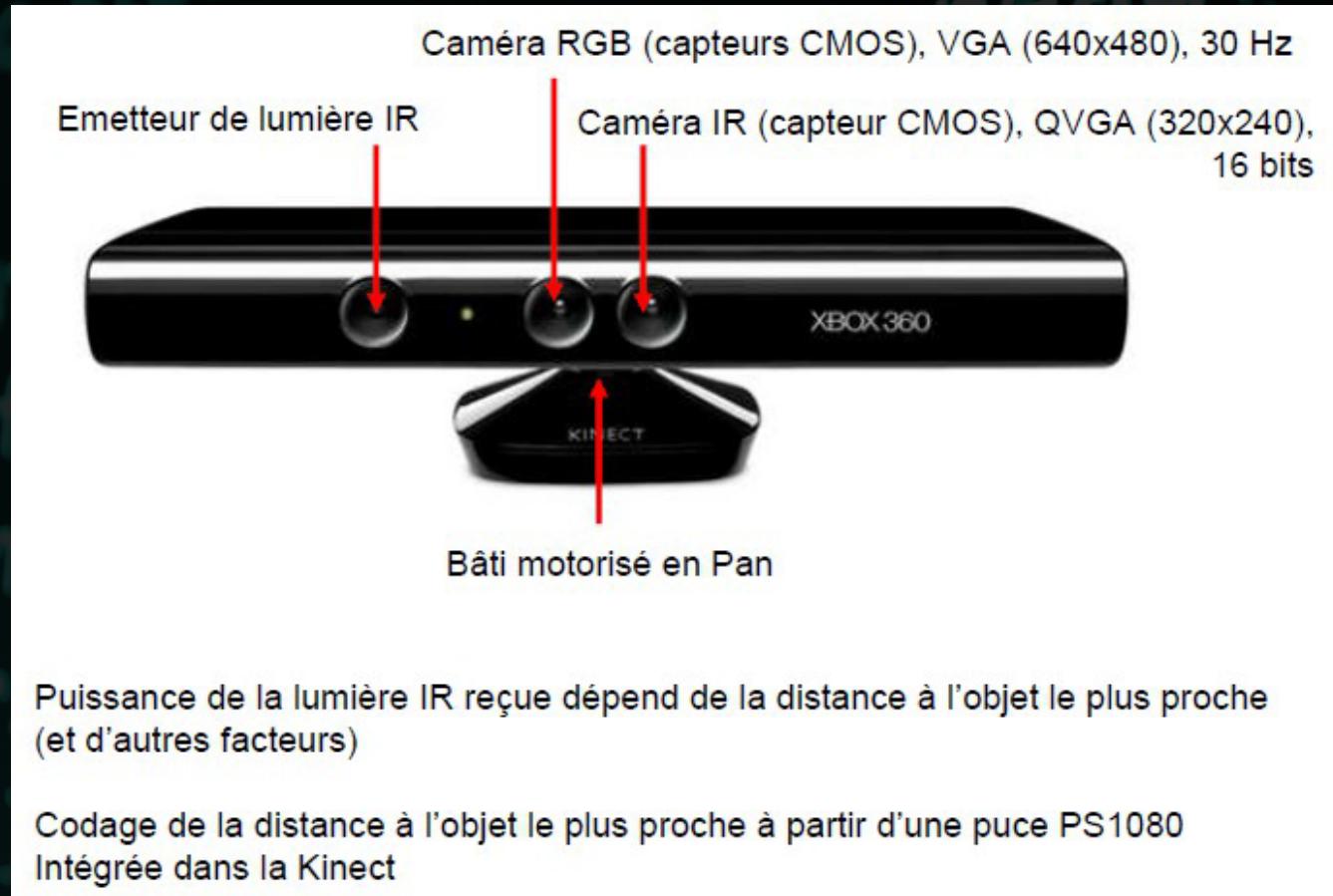


Flystick1 à 5 boules réfléchissantes



Lunette 3d Volfonni Edge, munie de 6 boules réfléchissantes

Caméras Infra-Rouge et marqueurs – Ex : système Kinect



➤ Kinect v1 (2010-2017)

➤ Capteurs

- profondeur (Infra-Rouge IR)
- image RGB
- Microphone

➤ Effecteurs

- moteur du bâti (rotation 1D)

➤ IR (bas niveau)

- grille 2D profondeurs (320x240 pixels)
- image 2D RGB (640x480 pixels)

➤ IR (haut niveau)

- suivi de mouvement (24 points et positions angulaires) sur le corps humain

Caméras Infra-Rouge et marqueurs – Ex : système Kinect

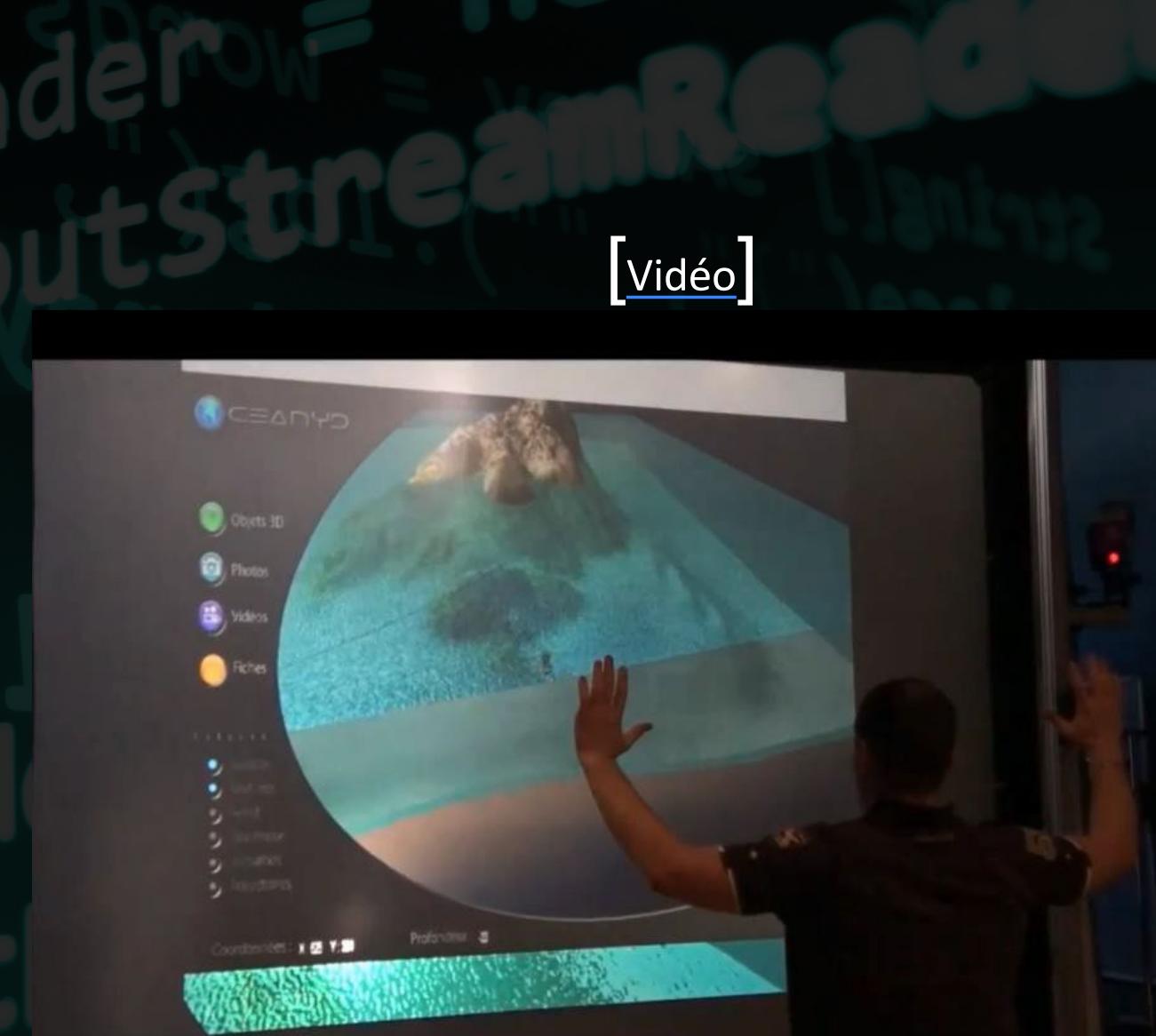
Sensor	Joint	Sensor	Joint
0	Head	12	Right Elbow
1	Neck	13	Right Wrist
2	Torso	14	Right Hand
3	Waist	15	Right Fingertip
4	Left Collar	16	Left Hip
5	Left Shoulder	17	Left Knee
6	Left Elbow	18	Left Ankle
7	Left Wrist	19	Left Foot
8	Left Hand	20	Right Hip
9	Left Fingertip	21	Right Knee
10	Right Collar	22	Right Ankle
11	Right Shoulder	23	Right Foot

- Squelettisation de 1 à 4 personnes devant la Kinect
- Fréquence du capteur : 30 Hz
- Portée du capteur : 1 mètre à 4 mètres
- Précision : plusieurs centimètres d'imprécision, données aberrantes fréquentes
- Logiciels interface sur PC
 - FAAST (Flexible Action and Articulated Skeleton Toolkit)
 - Production d'événements clavier/souris
 - Base de gestes associés à la production d'événements clavier/souris
 - Unity3d

FAAST/Kinect interagit avec un logiciel de cartographie marine (projet Digital Ocean)

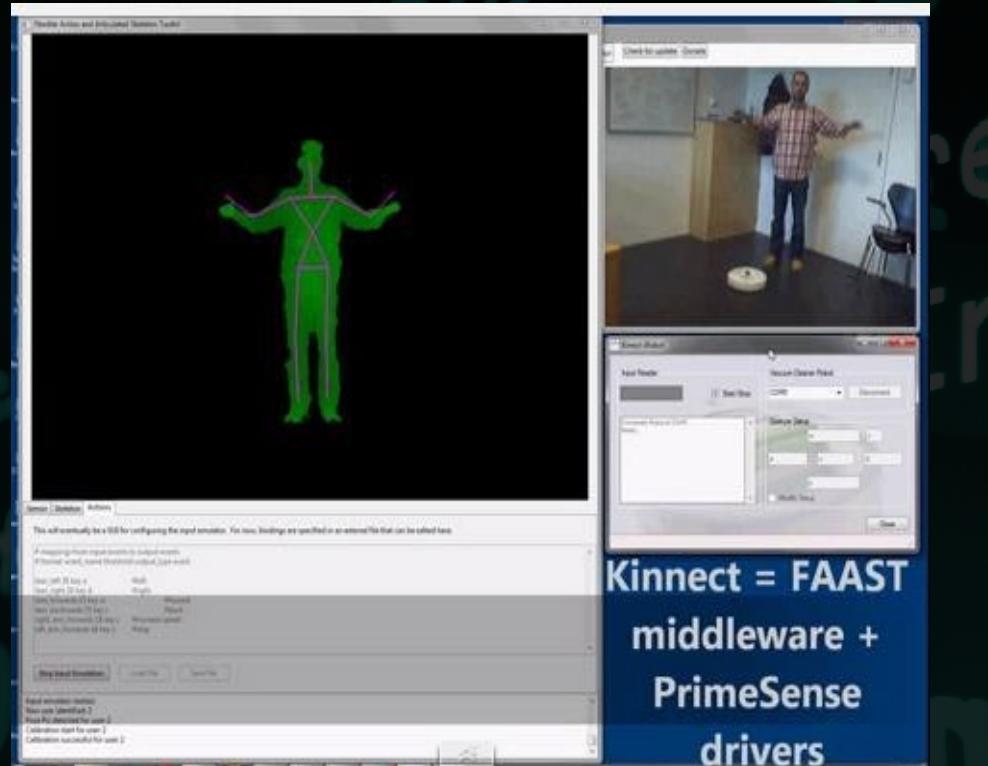


Logiciel FAAST



[[Vidéo](#)]

FAAST/Kinect interagit avec un logiciel de gestion du robot NAO



https://youtu.be/-Qi3luFh_F4?t=11



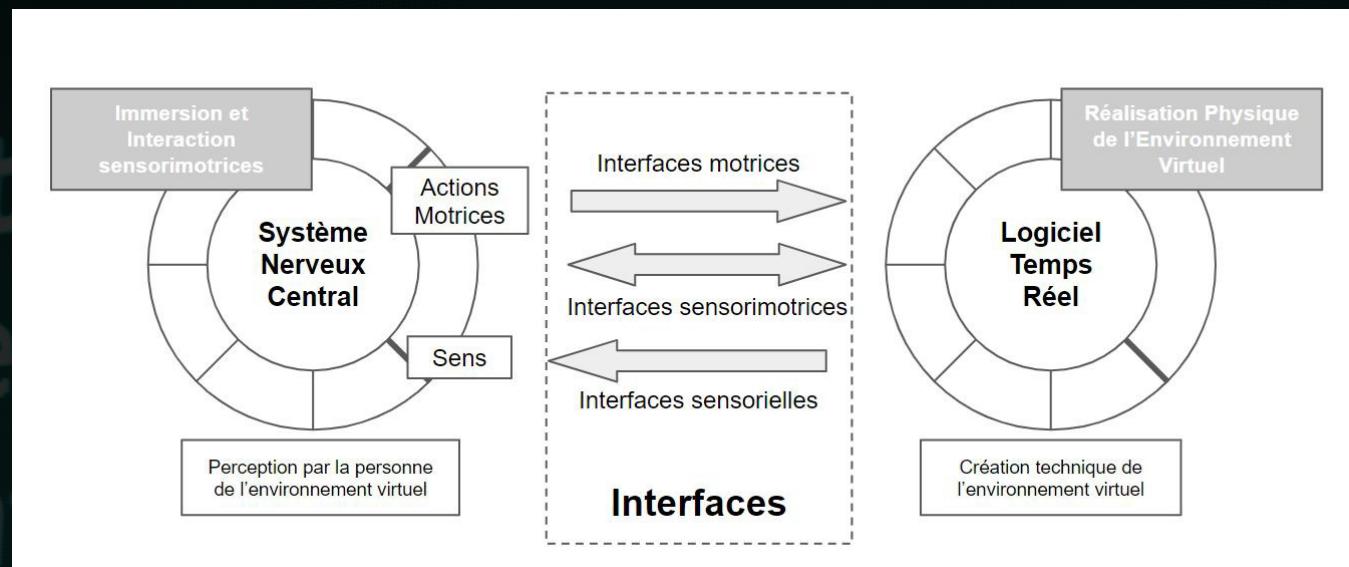
Les interfaces comportementales

► Les interfaces comportementales permettent le couplage physique Homme-Machine

- Interfaces motrices,
 - ex : joystick et boutons d'un gamepad, input touch, volant, tapis roulant
- Interfaces sensorielles,
 - ex: écrans, (dont écran de visiocasque), casque audio, vibrations d'un gamepad, cabines de simulation (stimulation proprioceptrice kinesthésique), gants tactiles
- Interfaces sensorimotrices,
 - ex: volant, gant, bras haptiques, i.e. à retour de force, gachette haptique d'une manette de PS5, tablette orientable, visiocasque avec tracking de la tête

► La plupart des applications (jeux vidéo, traitement de phobies,etc) se satisfont d'interfaces de qualité moyenne.

- Par contre les applications artistiques et les vidéos 360 en pâtissent



Les interfaces comportementales



Virtuose 6D / Haption



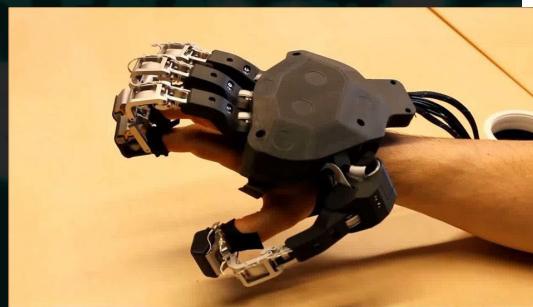
VirZOOM



Simulateur de vol / Thalès



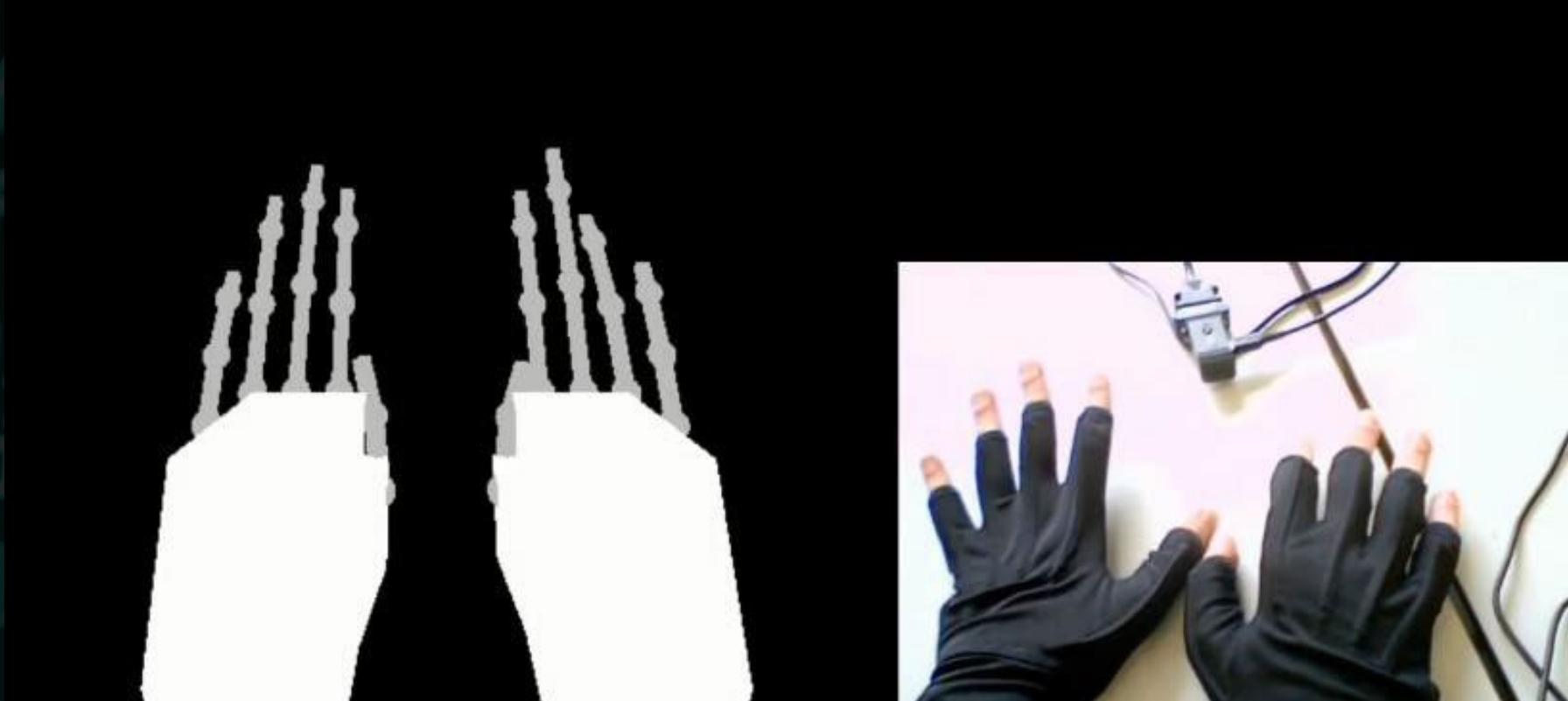
Infinadeck



Mandarin / CEA List & Haption

Tracking – Périphériques de tracking de l'avant-bras et de la main

- Gants de données 5DT 5 et 14 Ultra
- 5 ou 14 positions angulaires de phalanges par main



[[Vidéo](#)]

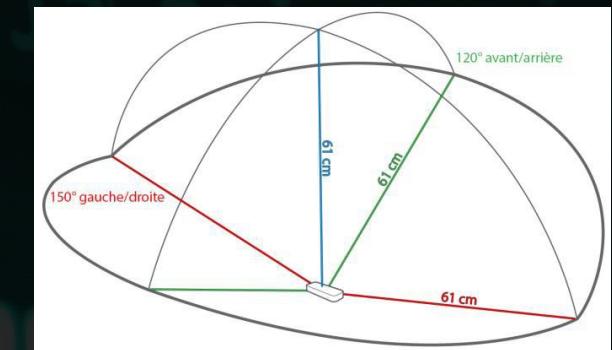
Tracking – Périphériques de tracking de l'avant bras et de la main

➤ LeapMotion (2010-)

- Connectique: port USB 2
- Synthèse 3D des images 2D prisent par les deux caméras
- Précision spatiale de 0,01 mm
- Fréquence de base: 200 Hz
- Mais perturbé par les sources externes de lumière infrarouges

➤ Deux caméras monochromatiques forment une paire stéréo

➤ 3 LED infrarouge éclairent l'environnement



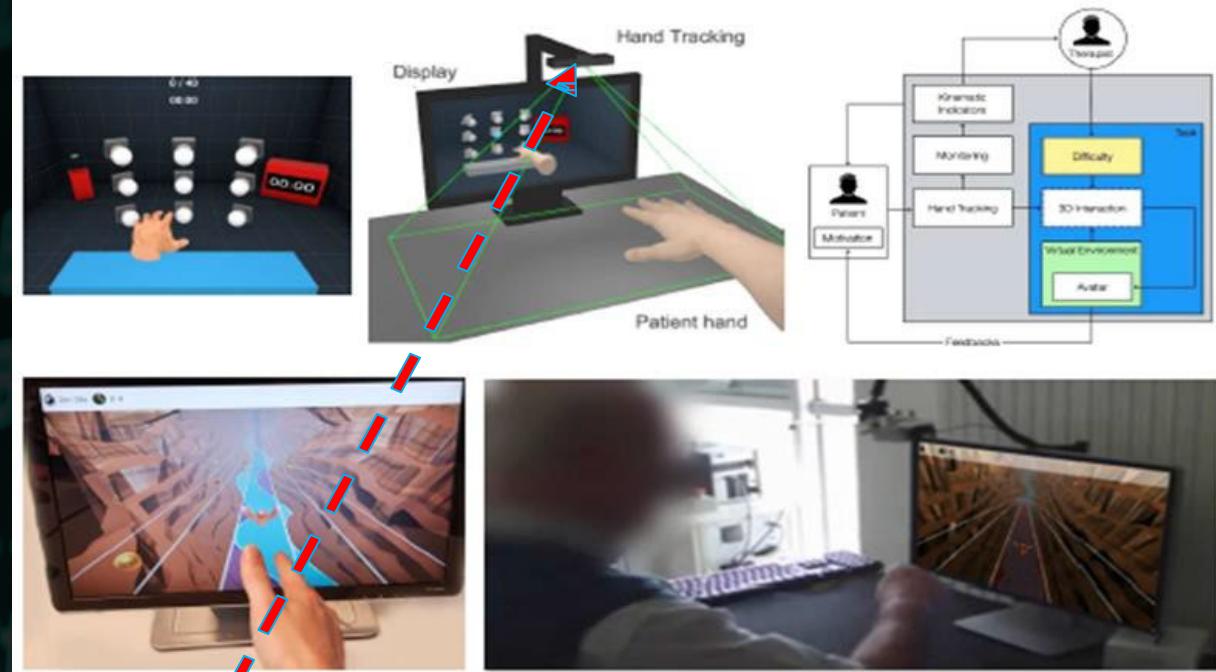
Portée des caméras IR de la LeapMotion



2 images issues des caméras IR de la LeapMotion

Tracking – Périphériques de tracking de l'avant bras et de la main

➤ La LeapMotion dans le projet CESAAR-AVC 2016-2020



[[Vidéo du projet CESAAR-AVC](#)]

Tracking – Périphériques de tracking de l'avant bras et de la main

Brassard MYO, capteur de mouvement de l'avant-bras

- Analyse l'activité électrique des muscles de l'avant- bras
- En déduit la position des doigts et le mouvement de l'avant-bras (position et rotation), des mains et des doigts
- Nécessite une procédure de calibration dépendant de la personne qui va utiliser le brassard



[\[Vidéo\]](#)

Tracking, retour d'effort – Périphériques de Rendu haptique, bras à retour d'effort

Bras PHANTOM OMNI 3d

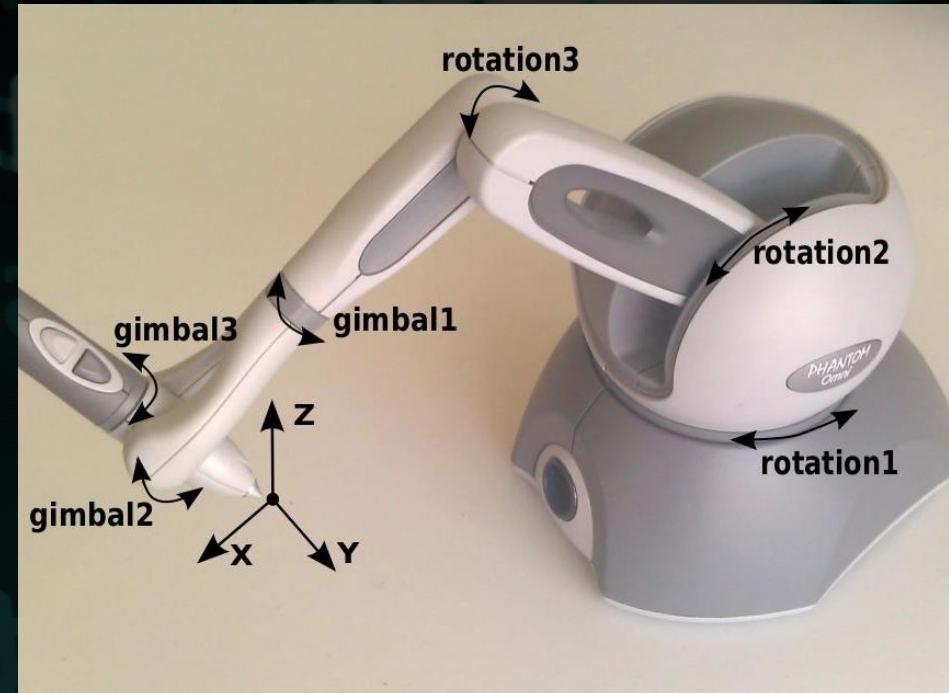
- Tracking de la main Résolution < 0,05 mm
- Espace de travail : 160 X 120 X 70 mm

Retour d'effort 3d

- 3d = retour d'effort dépend de la position 3d de la main virtuelle dans l'environnement virtuel
- Force maximale : 3,3 Newton (N)
- Retour d'effort très précis

Connectique : IEEE 1394 FireWire, Ethernet

Matériel de bureau, difficile à utiliser si la personne doit bouger dans l'espace (casque ou plateforme immersive)



[[Vidéo](#)]

Tracking, retour d'effort – Périphériques de Rendu haptique, bras à retour d'effort

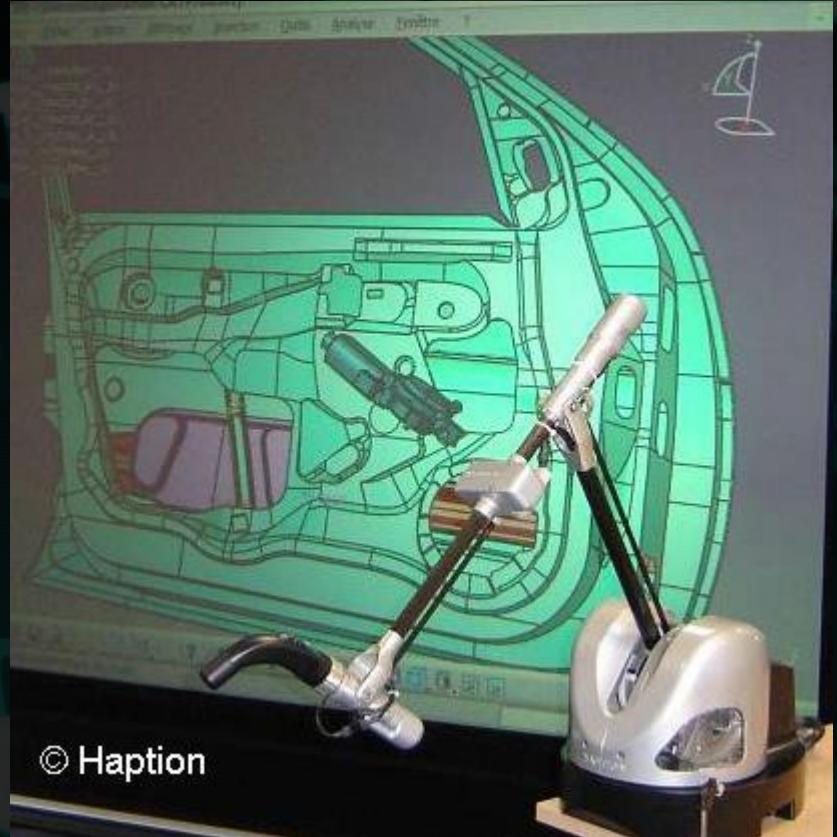
➤ Bras Virtuose 6d

- Tracking de la main
 - Résolution : trans.: 0,0016 mm, rot.:0,003°
 - Espace de travail : 1330 x 575 x 1020 mm

➤ Retour d'effort 6d

- **6d = retour d'effort dépend de la position 3d et de l'orientation 3d de la main virtuelle dans l'environnement virtuel**
- Force maximale : 35 Newton (N)

➤ Connectique : Ethernet



[[Vidéo](#)]

Tracking, retour d'effort – Systèmes à câbles

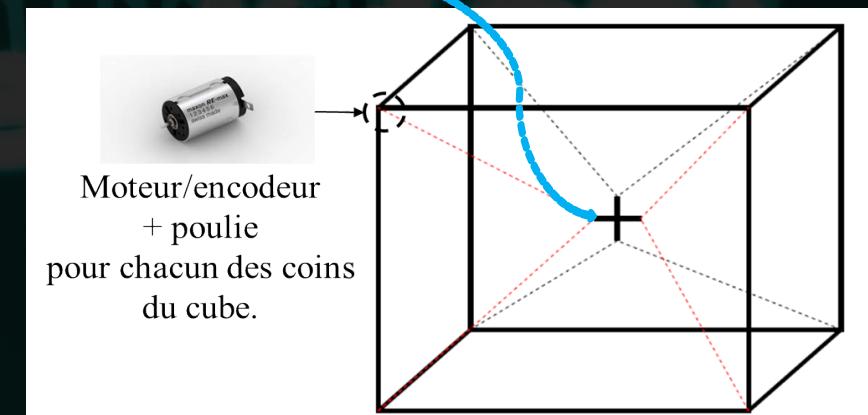
➤ Système SPIDAR

- Tracking de la main
 - Précision : trans. 5 mm au centre du cube, dérive exponentielle
 - Espace de travail : modifiable, suivant la structure géométrique choisie
- Retour d'effort 3x3d ou 6d
 - Force maximale : Dépend des moteurs choisis (<10N)
- Connectique : USB 2

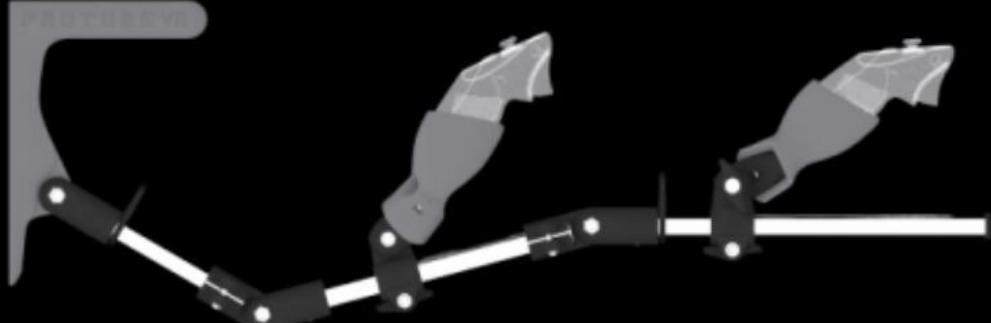
[[Vidéo du projet IRMBio](#)]



Effecteur tenu à la main



Les interfaces comportementales “bricolées”



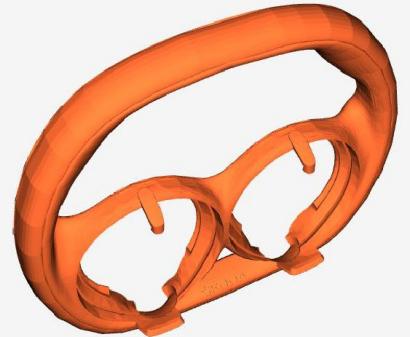
Gunstock MagTube



HTC Kit Vive Tracker



HTC Kit Vive Ultimate Tracker 3+1



Oculus Steering Wheel



ProVolver pistolet haptique



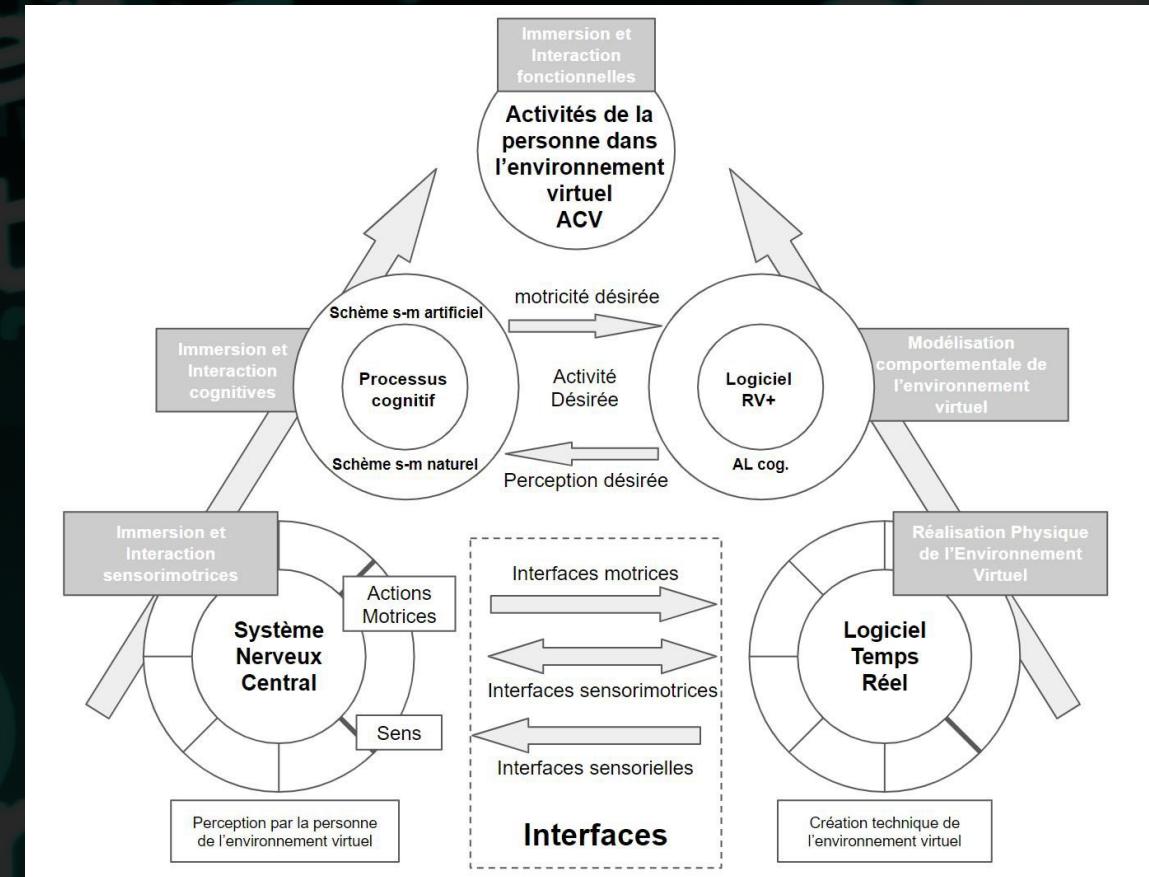
Saber Handles

L'interfaçage comportemental

➤ En fonction des ACV définies au niveau fonctionnel, l'interfaçage comportemental se définit par le choix :

- des interfaces comportementales (au niveau sensorimoteur)
- des schèmes (naturels ou artificiels) et métaphores (Au niveau cognitif)
- des Aides Logicielles, principalement Cognitives (ALCog)

➤ Un bon choix d'interfaçage comportemental doit permettre de réduire les perturbations de la boucle “perception, décision action” et d'atteindre



La Transparence et la cohérence de l'interfaçage

- La transparence d'une interface est sa capacité à être non perçue, à être transparente cognitivement lors de son utilisation par l'usager.
- L'activité sensorimotrice doit être exécutée inconsciemment par le SNC (cortex moteur)
- La conscience de l'usager est accaparée par les tâches de plus "haut niveau".

Recommandations et solutions

Solutions répondant aux 3 principales incohérences sensorimotrices.	Atténuer l'impact d'une incohérence sensorimotrice	Modifier le fonctionnement de l'ACV	Supprimer une incohérence sensorimotrice
Incohérence visuo-motrice temporelle	<ul style="list-style-type: none">diminution du temps d'exécution du logiciel	<ul style="list-style-type: none">séquence d'images figées	<ul style="list-style-type: none">écrans autour de la tête sans translation
Incohérence oculomotrice	<ul style="list-style-type: none">diminution des disparités rétiniennes et traitements d'images	<ul style="list-style-type: none">vision monoscopique	<ul style="list-style-type: none">écrans Light Field ou VRD (Virtual Retinal Display)
Incohérence visio-vestibulaire	<ul style="list-style-type: none">limiter accélération et inclinaisontrajectoires doucesdiminuer le champ de visiontraitements en vision périphériqueobjets fixes/environnement réel en vision périphériquevision périphérique non occultée	<ul style="list-style-type: none">environnements réel et virtuel géométriquement identiquesdéplacement par téléportationapplication en réalité augmentée	<ul style="list-style-type: none">avec une interface à simulation de mouvementavec un tapis roulant 1D ou 2D

L'interfaçage comportemental

► Choix des interfaces comportementales (le matériel)

- Dépend fortement de l'objectif fonctionnel et des ACV
- Dépend de la cible (âge, familiarité avec les nouvelles technologies), les utilisateurs
- Quel degré d'immersion extéroceptive et proprioceptive souhaité ?
- Où se situe le curseur entre Simulation réaliste et Usage récréatif
- Analyse bénéfices/coûts des matériels disponibles sur le marché
- Certaines interfaces requièrent un long temps d'apprentissage
- Attention à l'inconfort dû aux incohérences sensorimotrices
- Attention à la gêne physique occasionnée par le port d'un appareillage encombrant

► Le visiocasque n'est pas toujours de facto la solution à privilégier, dans certaines situations un simple écran plat suffit.

► Il ne faut pas hésiter à intégrer des objets réels qui seront trackés dans le monde virtuel



Notion de métaphore

- Les techniques d'I3D peuvent être basées sur des **métaphores**
- La métaphore, en I3D, consiste à reproduire des mouvements ou des gestes qu'on utilise dans le monde « réel » pour interagir dans le monde virtuel.
- Exemples d'association Métaphore/ gestes:
 - Métaphore du « Rayon laser » : « Je pointe avec ma main un point sur un mur avec un pointeur laser » se traduit par la sélection d'un objet par pointage dans le monde virtuel.
 - Métaphore de la « Main virtuelle » : « Je fais un geste avec ma main pour saisir un objet » se traduit par l'approche de la main virtuel de l'avatar de la personne dans le monde virtuel.

Quels processus cognitifs choisir ? Schèmes naturels ou métaphores ?

- Plusieurs angles d'analyse possibles
- Le choix doit découler de l'analyse des 12 fonctionnelles et émotionnelles, et de la faisabilité technico-économique
 - En général l'emploi d'un schème naturel est plus onéreux qu'une métaphore
- La qualité et la précision du geste dans la réalité sont-elles requises dans l'application virtuelle ?
 - évidemment oui si l'objectif de l'application est d'enseigner un geste pro particulier: souder, peindre, etc
 - Oui si l'activité sensorimotrice est elle-même sujet d'étude: conception produit et test d'ergonomie des boutons d'interface d'une planche de bord par exemple
 - Non pour une déambulation dans un musée
- Le confort et l'absence de malaise dû à une incohérence sensorimotrice sont-ils une nécessité ?
 - On préfèrera la métaphore de téléportation en RV
- Le schème naturel est-il inconnu ou inexploitable ?
 - Commande de vol par inclinaison de la tête
 - Situation de handicap
- Y-a-t-il un lien entre le processus cognitif choisi (schème vs métaphore) et l'interface comportementale exploitée ?
 - Les schèmes sensorimoteurs naturels et les métaphores sont fortement dépendants des interfaces concrètes utilisées pour l'interaction
- Attention: une métaphore n'est pas forcément perçue de la même manière par le concepteur et l'utilisateur
 - Un travail d'évaluation auprès des usagers est nécessaire
 - Parfois des aides logicielles sont nécessaires



Formation à la soudure:
<https://www.youtube.com/watch?v=jw3ty-s5fF4>

Les aides logicielles comportementales (ALC)

➤ En particulier les Aides Logicielles Cognitives (ALcog) ... facilitent la réalisation d'une tâche à accomplir

- Pour contrer les incohérences sensorimotrices
 - Guide virtuel de mouvement ou effet de magnétisme (snap)
 - Obscurcissement de l'écran si l'utilisateur regarde dans une direction fort différente de celle de son déplacement, ou s'il passe sa tête dans un mur
 - Image floutée sur les bords (restriction du champ de vision), affichage d'objets environnementaux fixes (intérieur de voiture, casque, etc.), pour contrer les incohérences sensorimotrices induites par un mouvement de translation continu
 - Prédétermination de trajectoires pour faciliter les déplacements
- Pour aider l'utilisateur à réaliser sa tâche:
 - Déetecter l'intention du sujet. ex : rendre une zone d'arrivée plus permissive (collider plus large), locker le pointeur laser sur l'objet si à proximité



Vignettage en chute dans
Resident Evil 7

<https://youtu.be/jz7xqzPQTBA?t=42>

7

➤ Les ALcog sont déterminées en fonction des affordances (interactions possibles entre l'objet et l'utilisateur) des objets

Notions à connaître

➤ Matériels utilisés pour les différents modes de fonctionnement:

- Visualisation 3D: Oculus Quest, Système immersif CAVE, Système semi-immersif EVR@-HC;
- Tracking: Caméras Infra-Rouge et boules réfléchissantes, Kinect, Systèmes retour d'effort PHANTOM OMNI et SPIDAR
 - Méthode: processus de calibration (caméras infra-rouge)
 - Problèmes associés: occlusion, ordre de grandeur de la précision
- Retour d'effort: PHANTOM OMNI et SPIDAR
 - Problèmes associés: ordre de grandeur de la précision

➤ Applications de la Réalité Virtuelle:

- projets E-Santé CESSAR-AVC
- VRSkills Lab sur la plateforme EVR@
-

DEFINITIONS VUES DANS LE COURS A CONNAÎTRE

➤ Définitions:

- Réalité Virtuelle (définition de Philippe Fuch)
- Immersion (définition de Burkardt)
- Autonomie (définition de Tisseau)
- Boucle Perception/Action (définition de Berthoz) ;

➤ Modes de fonctionnement:

- stéréoscopie humaine (accommodation, disparité rétinienne),
- stéréoscopie par machine (différents modes de fabrication d'images 3D), tracking d'un homme « appareillé » ou sans appareillage ;

when you can't afford VR
so you make your own VR



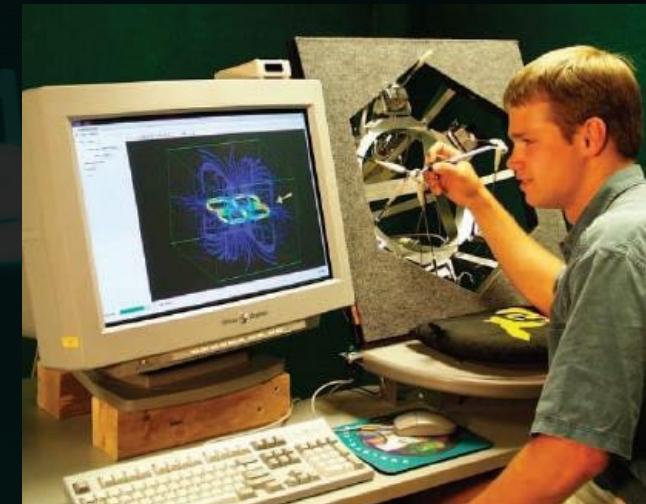
| Interface Visuelle

Caractéristiques utiles

- Champ de vision (horizontal et vertical)
- Champ de vision stéréoscopique
- Résolution (et ratio /taille), luminosité
- Fréquence de rafraîchissement (60/120Hz)
- Nb Utilisateurs / Encombrement
- Degré d'immersion
 - Impact sur le coût
- (Cf. caractéristique vision)

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]

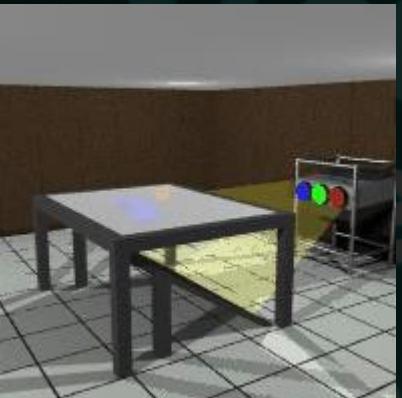


[Z-Space]



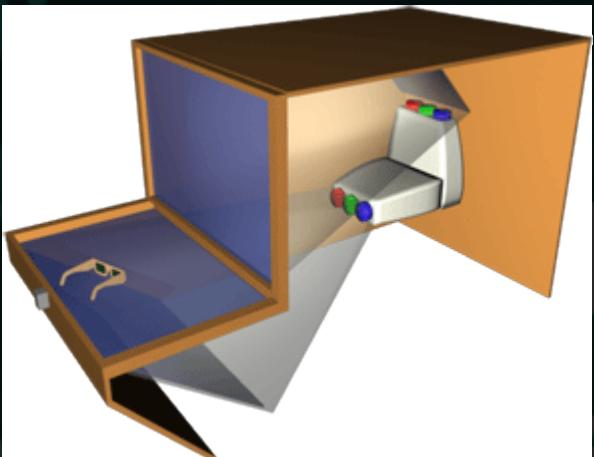
Bureau immersif

- « Immersion desk » ou « workbench »
- Champ de vision moyen
- Multi-utilisateurs possible
- Stéréocopie active possible
- Bonne immersion
- Variété de réalisation (interface haptique, miroirs, tactile...)

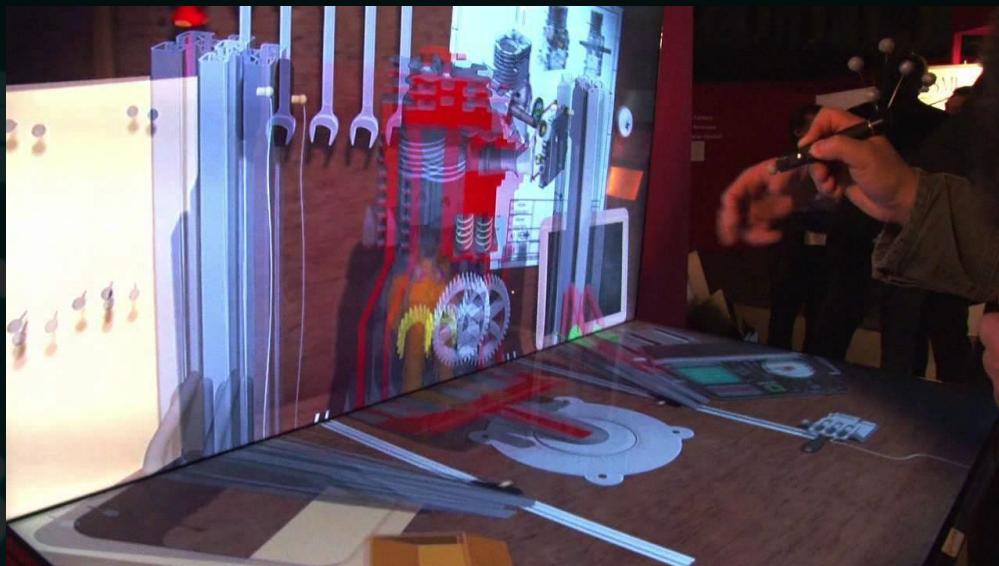


[Stanford Responsive Workbench 1998]

Bureau immersif



[Clarté Workbench]



[Clarté Flatbench]

Bureau immersif



[SenseGraphics 3D-LIW]



[Toucheo, INRIA]

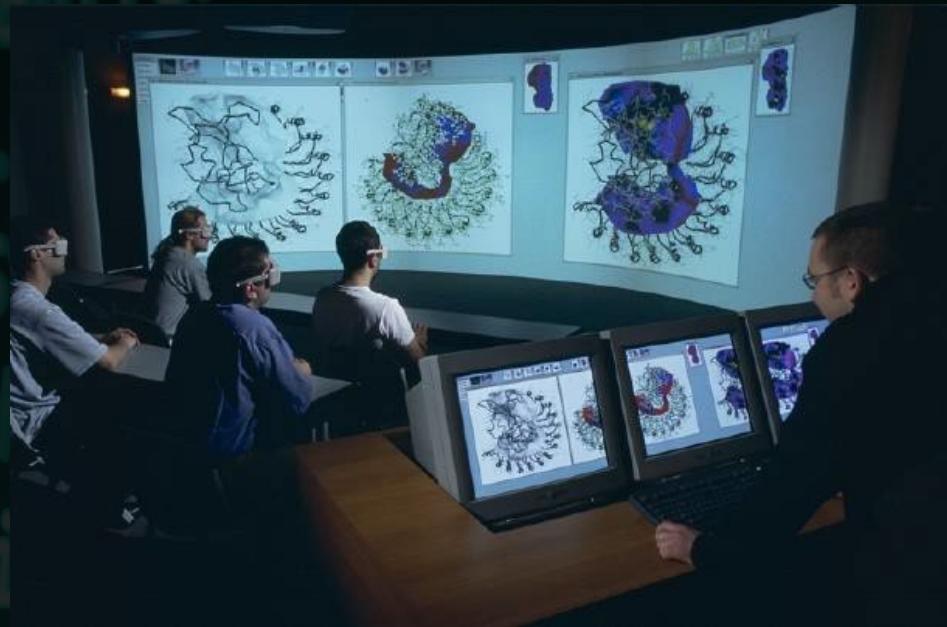


[Reachin]



Salle immersive

- Grand écran plat ou semi-cylindrique
- Champ de vision élevé
- Résolution élevée
- Multi-utilisateurs (sièges possibles)
- Stéréoscopie possible

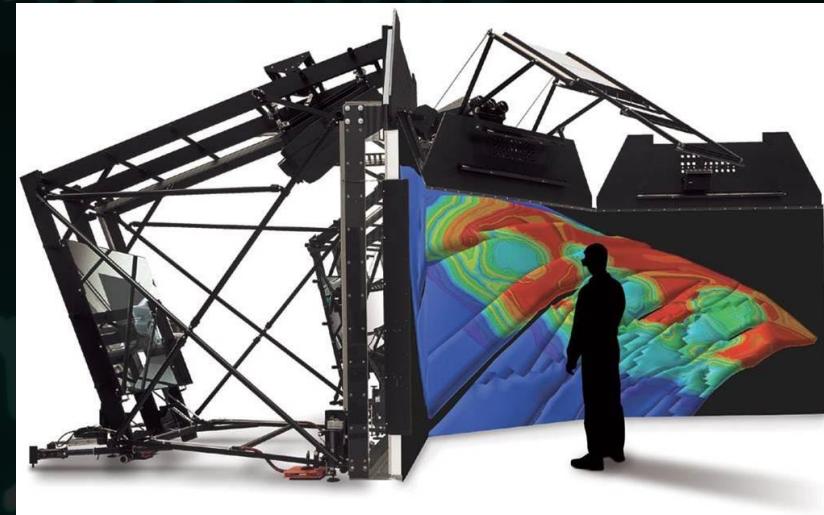


Visio-cube

- 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



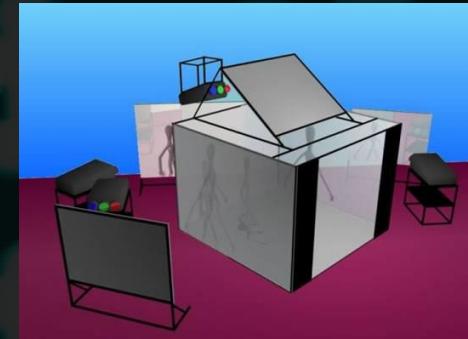
© SAS³



[Clarté, 2009]



[LIMSI-CNRS]



Visio-casque

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



[Sensics xSight]



L'avenir des visiocasques:

➤ Tracking des yeux (n'est pas encore généralisé)

- Avatars plus expressifs
- Rendu graphique fovéal (Foveated Rendering)
- Collecte d'information sur le regard de l'utilisateur ... et donc son comportement
 - IA/Machine learning
- Navigation dans les IHM avec les yeux



HTC Vive Pro Eye

➤ A plus long terme: suppression de l'incohérence oculomotrice

- Accommodation adaptative en chaque pixel:
 - Light Field
 - Virtual Retinal Display



➤ Elargissement du champ de vision

➤ Plus grande résolution

➤ Allègement du casque

➤ RV → RM → smartglasses



Meta Quest 3



Casque FOVE

Visio-casque "see-through"

➤ Variante des HMD classiques

➤ Permet de superposer des images virtuelles et réelles

- Écrans semi-transparents qui n'occultent pas le monde réel ("optical see-through")
- Caméras externes qui renvoient l'image du monde réel ("video see-through")

➤ Réalité Augmentée / réalité mixte / virtualité augmentée



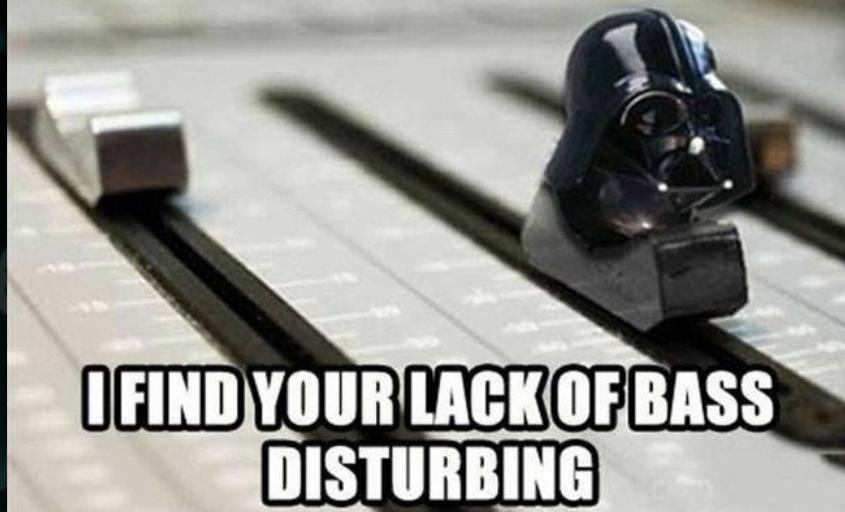
Les interfaces comportementales

➤ Tableau récapitulatif des avantages/inconvénients entre lesCAVEs et les Visiocasques

- En général, la précision du tracking des tête et mains est bonne pour les deux catégories de dispositifs.
- Peu de latence.

Dispositif	Avantages	Inconvénients
CAVE	<ul style="list-style-type: none">- Très haute qualité visuelle, proche de l'optimal si le nombre de vidéoprojecteurs est suffisant- Grands champs de vision- Immersion parfaite de l'usager dans l'environnement virtuel	<ul style="list-style-type: none">- Encombrant, installé dans un lieu fixe (... de rares installations transportables)- Cher, voire très cher- Espace de travail limité, mono-utilisateur (impossible pour 2 utilisateurs d'avoir chacun le bon point de vue)
Visiocasque	<ul style="list-style-type: none">- Coût modeste- Peu encombrant, portable- Déplacement aisément si non connecté par câble	<ul style="list-style-type: none">- Champs de vision limités- Réglages délicats pour une haute précision visuelle- Qualité visuelle médiocre- Pas de vision directe du corps de l'usager → proprioception perturbée et limitée- Dialogue avec une personne extérieure difficile

THE DARTH FADER



I FIND YOUR LACK OF BASS
DISTURBING

Interface Auditive

Audition

➤ 2ème 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

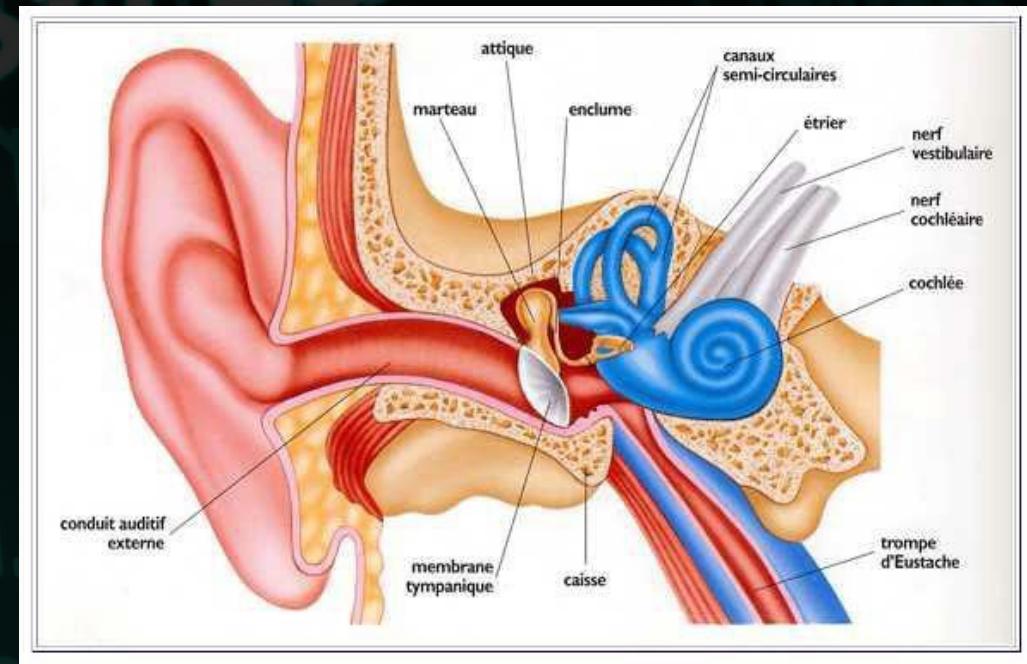
- Pavillon et conduit auditif
- Se conduit comme un résonateur, entraîne une amplification des vibrations comprises entre 1500 et 7000 Hz

➤ 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



<https://youtu.be/LkGOGzpbrCk>

Localisation spatiale

➤ Localisation circulaire : azimut

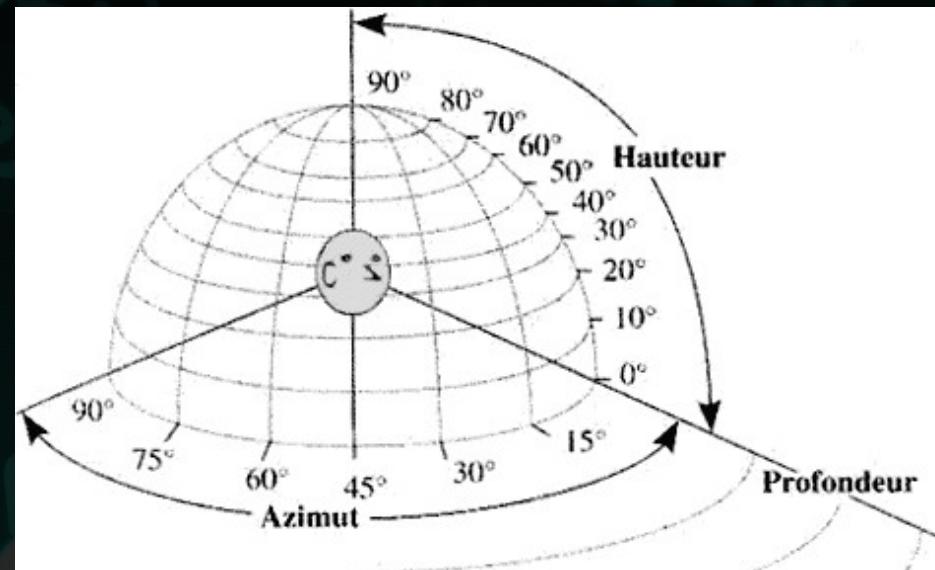
- La plus précise, la plus importante et la mieux connue
- Acuité 1° (3° pour des sources en mouvement)

➤ Localisation d'élévation : hauteur

- Moins précise : acuité 10° à 20°

➤ Localisation de distance : profondeur

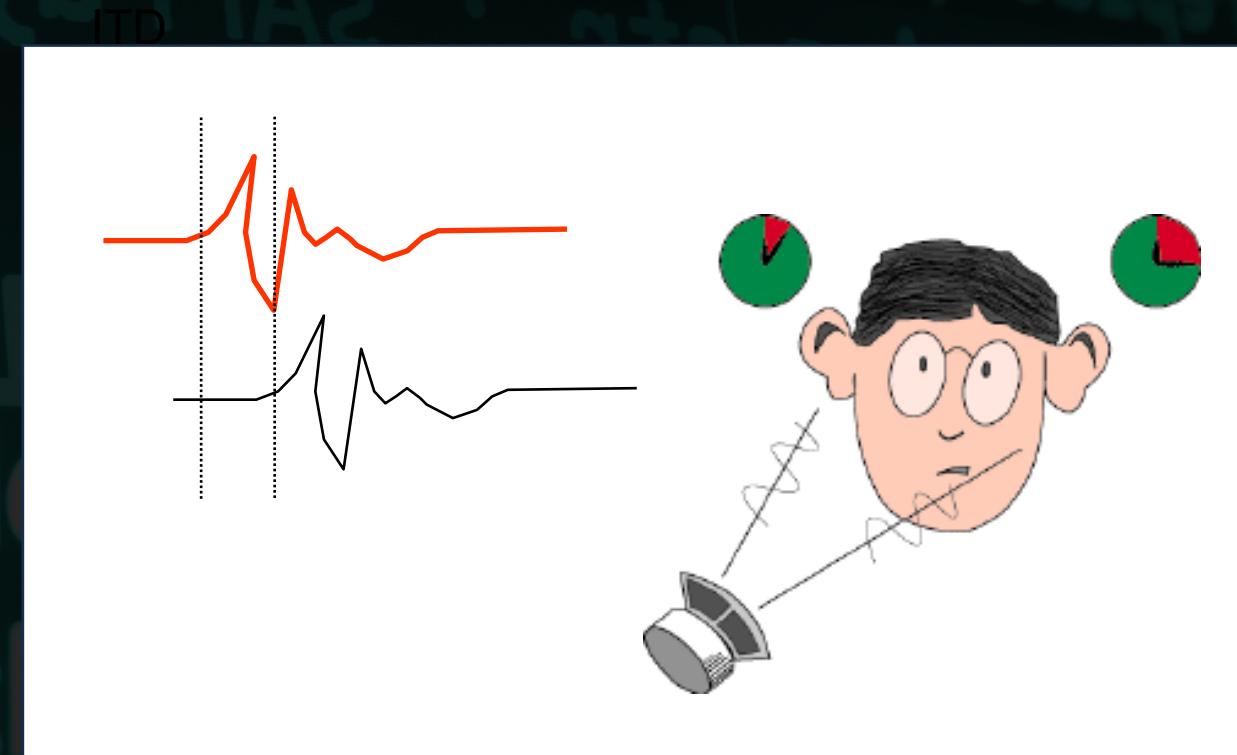
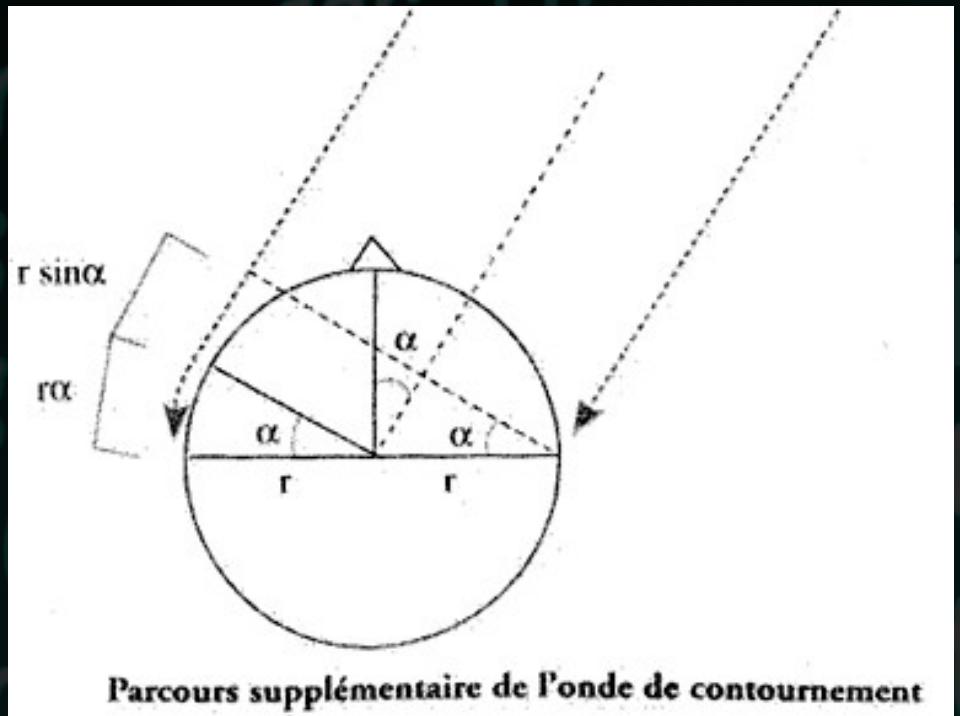
- Indépendante de la physiologie de l'appareil auditif
- Dépend de l'expérience (non innée)



Indices d'azimut

➤ Interaural Time Difference (ITD)

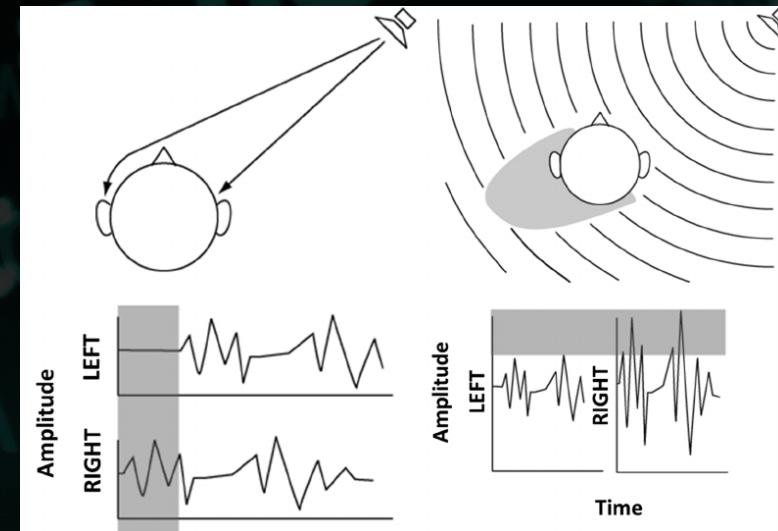
- Différence Δt du temps d'arrivée du signal à chaque oreille
- Toutes les fréquences audibles (20 - 20 000 Hz)



Indices d'azimut

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

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



➤ Hautes fréquences (> 4000 Hz)

- pas de différence perçue

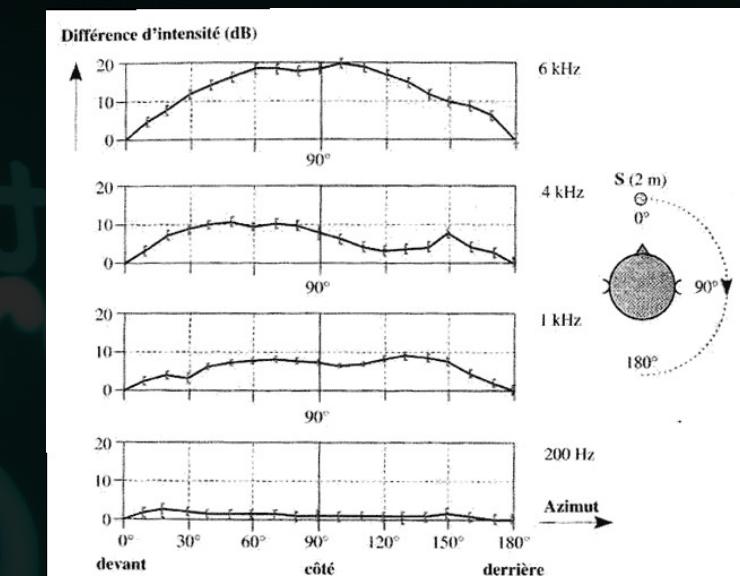


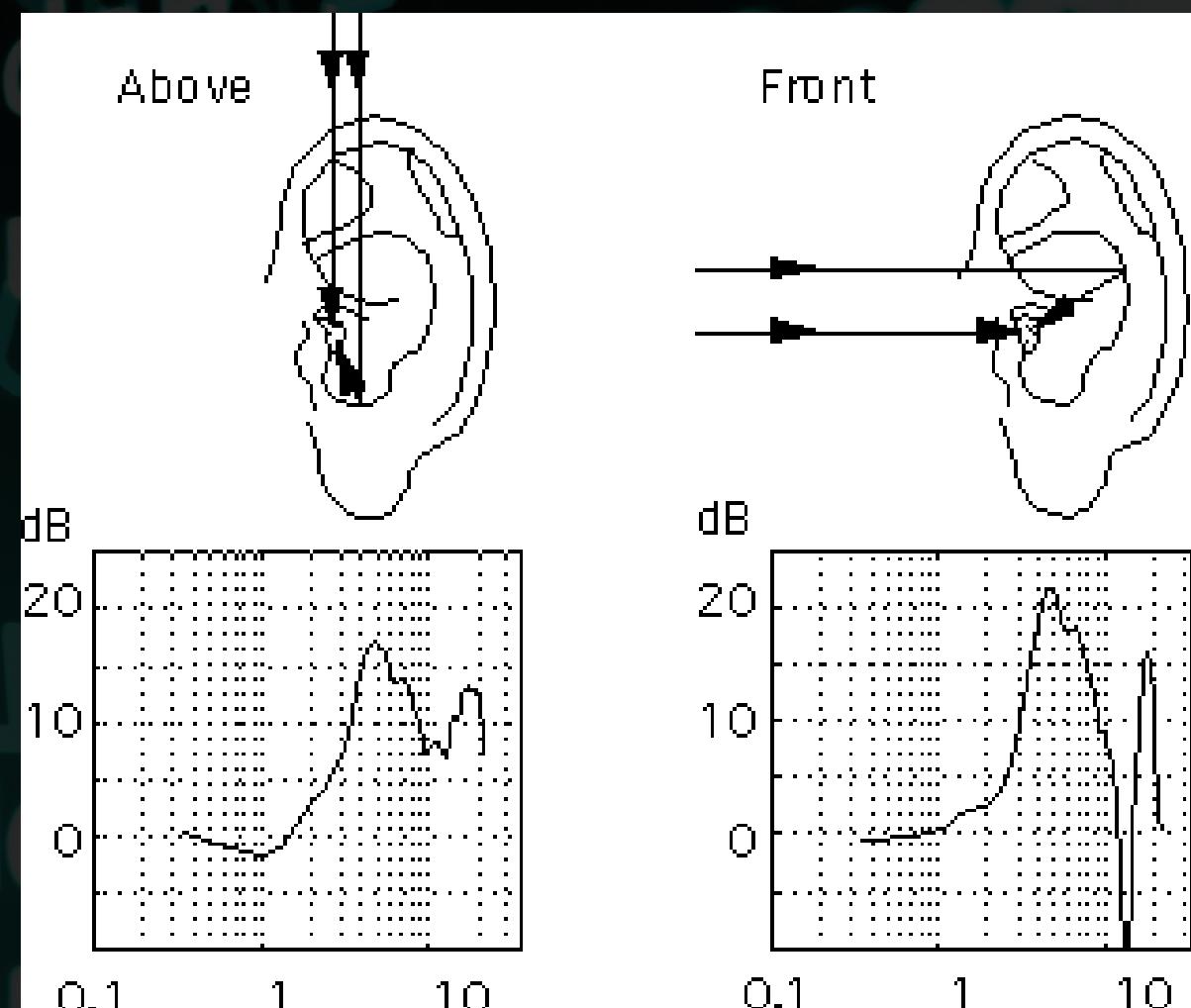
Figure 4.5 — Évolution de la différence d'intensité en fonction de la position de la source sonore pour 4 fréquences : 200 Hz, 1 kHz, 4 kHz et 6 kHz (d'après Fedderson, Sandel, Teas et Jefress)

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
- 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 (< 1m), 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

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



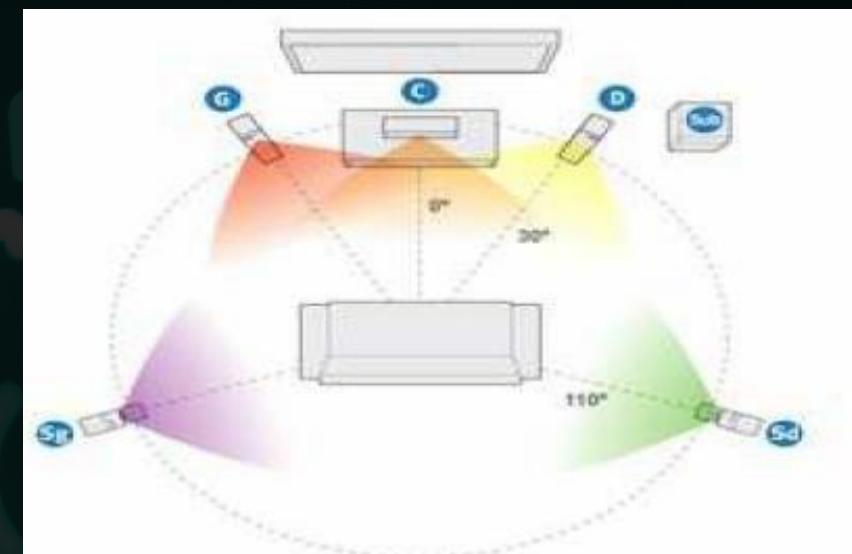
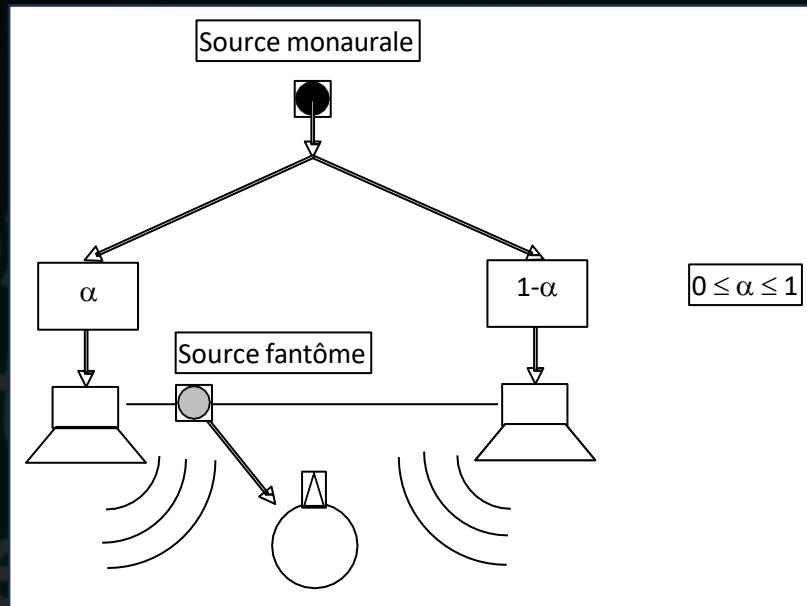
Systèmes audio 3d simples

➤ 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 droites et gauches

➤ Multivoies : champ sonore

- Distribution des signaux sur différents haut-parleurs répartis spatialement



Approche binaurale

➤ Diffusion par casque

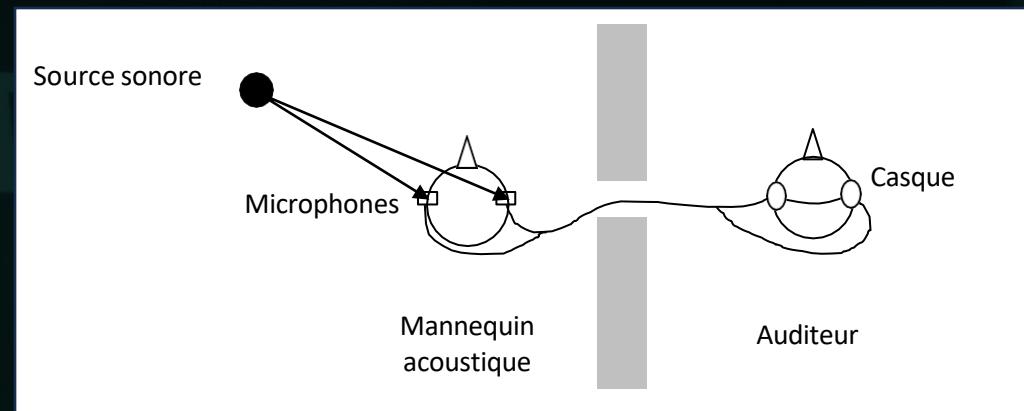
- recréation des pressions acoustiques adéquates sur chaque tympan

➤ 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



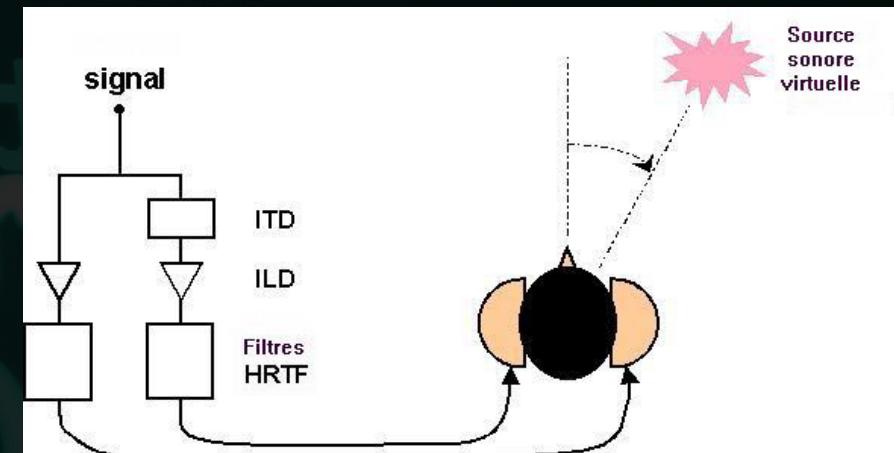
Approche binaurale

➤ 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

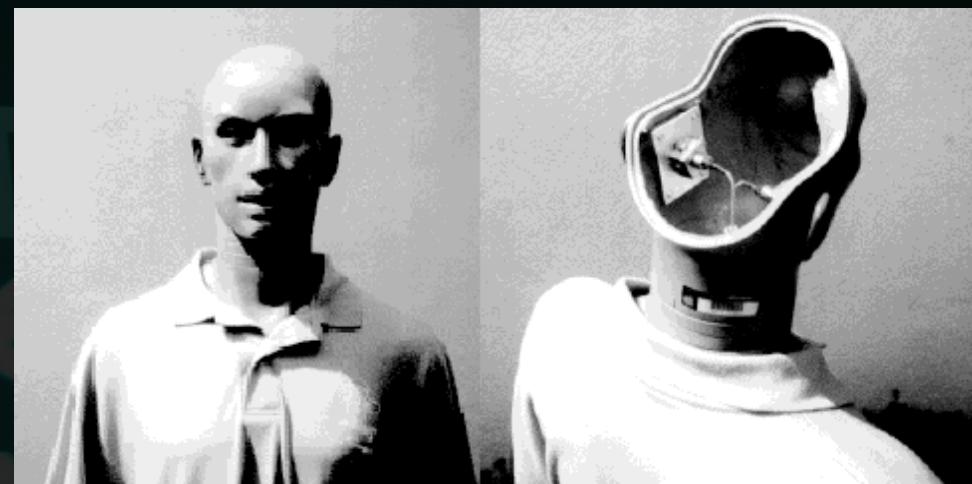
➤ Expérimental

- Enregistrement ou synthèse spécifique
(microphone tétraédrique à capsules)

➤ Restitution 2D ou 3D



Dispositifs d'évaluation et d'étude





Interface Motrices et Vestibulaires

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

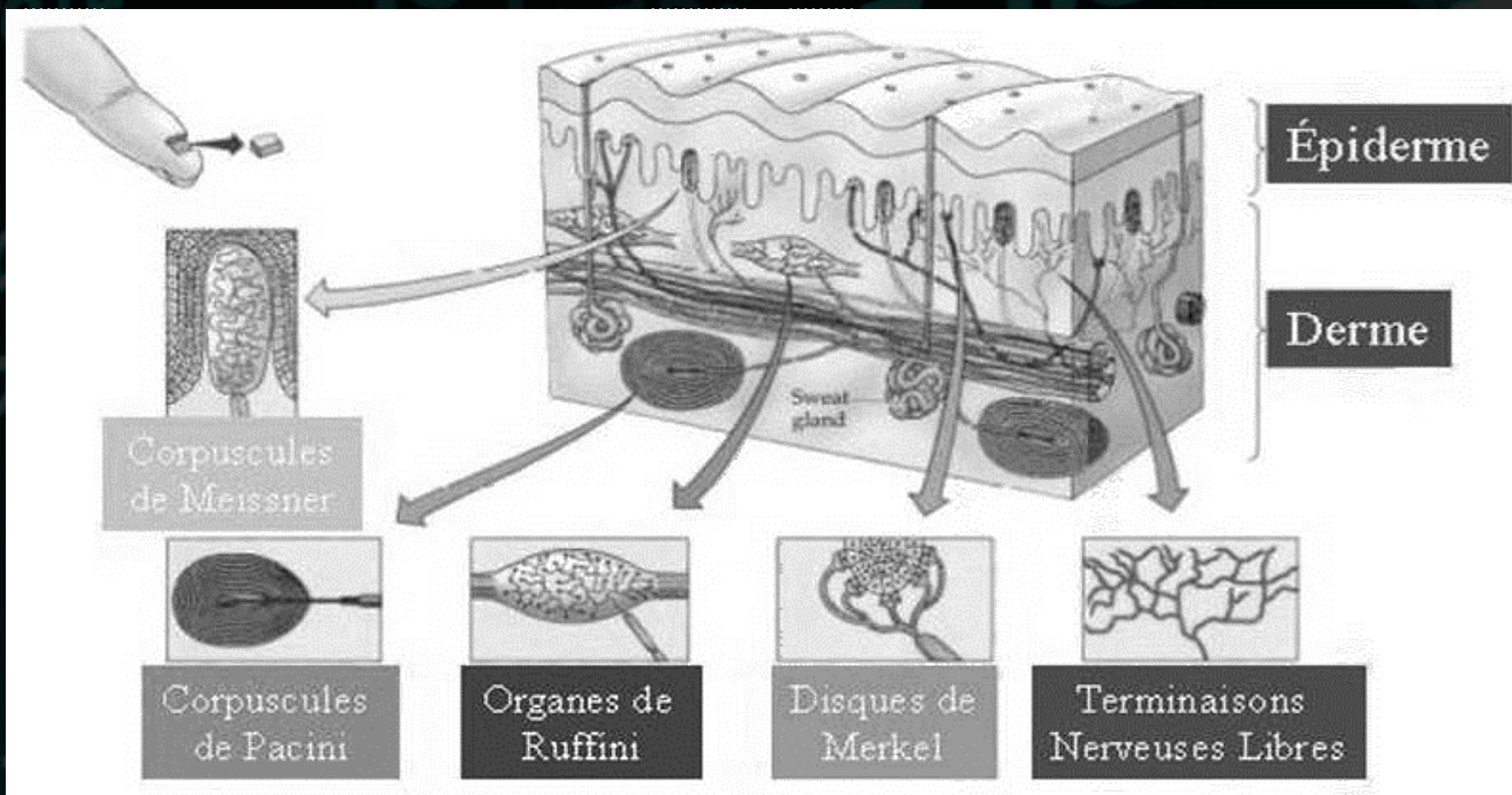
- Récepteurs du froid / récepteurs du chaud
- Spatialement séparés dans la surface et la profondeur de la peau

➤ 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
vitesses

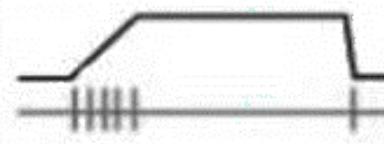
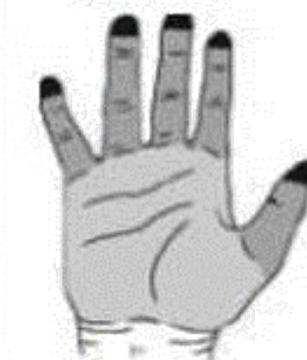
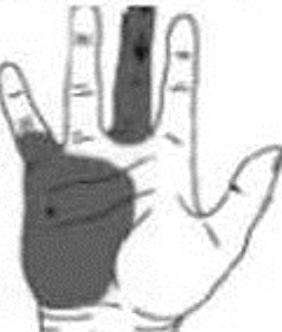
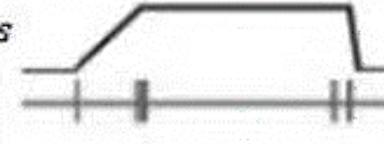
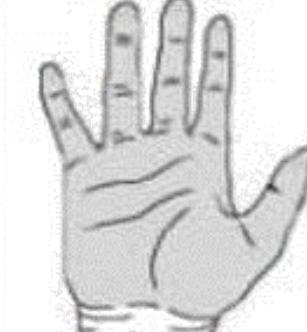
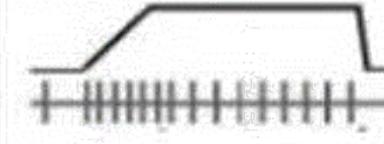


Accélération,
vibrations

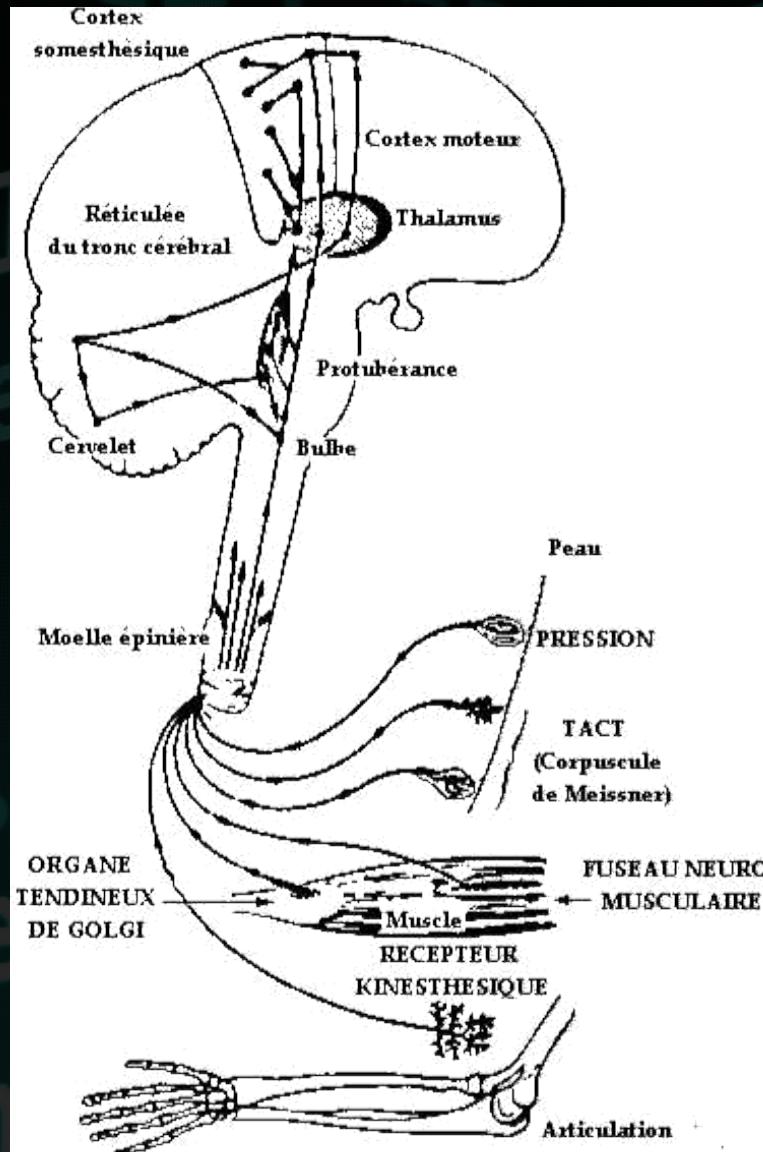
Intensité et direction
des forces statiques,
étirement latéral de
la peau

Capteurs de
pression, texture,
vibrations

Mécanorécepteurs extéroceptifs

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

Kinesthésie



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

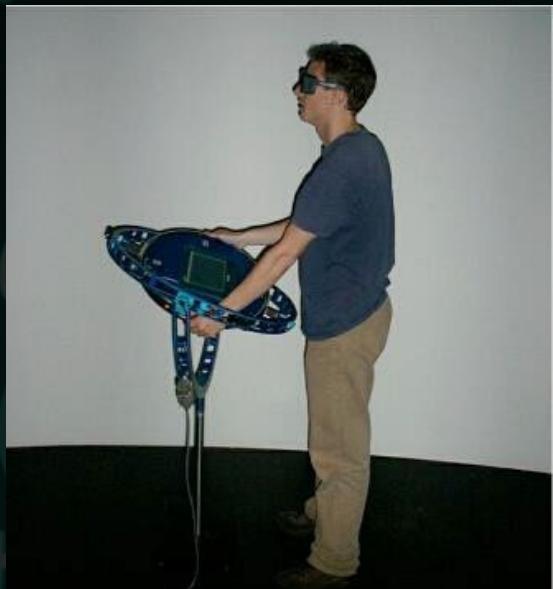


Interfaces de commande RV

- Transposition des interfaces classiques
- Interfaces spécifiques
- Interfaces kinesthésiques (cf. suite)
- Systèmes de capture (cf. suite)



[intersense]



[HTC Vive Controller]



[Oculus Touch]



[Oculus Go]

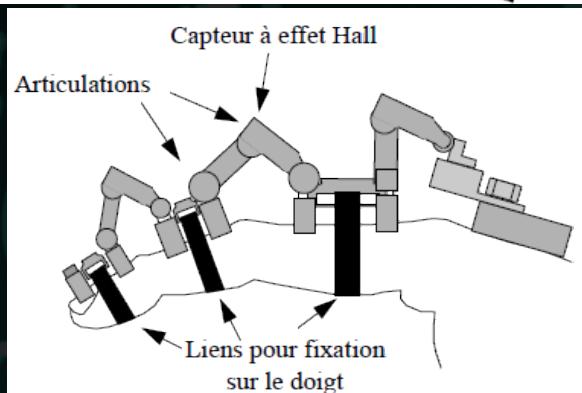
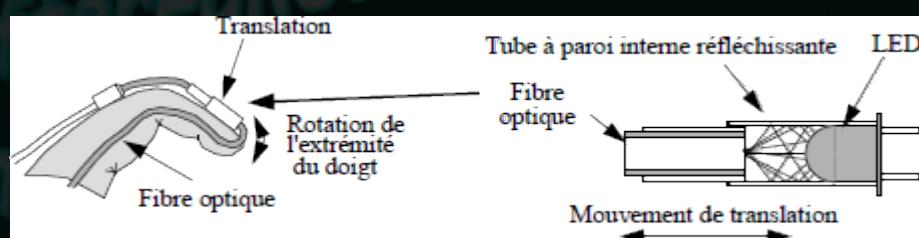
Gants de données

➤ 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]



[Manus]



[5DT]

Commande vocale

➤ Préserve

- l'immersion (pas d'interface)
- 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



[OpenVibe 2, INRIA]

Caractéristiques des interfaces haptiques

- 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)

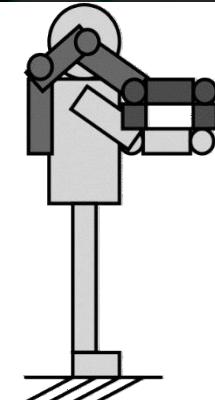
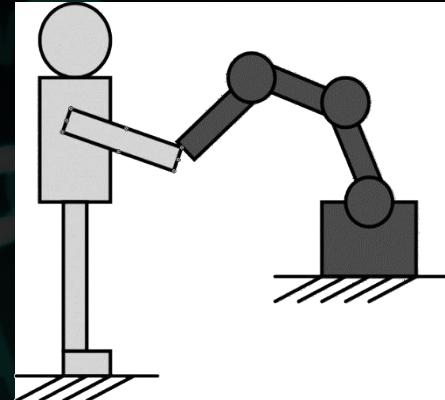
➤ Moteurs

- À une tension donnée correspond un couple moteur
- Problème des efforts continus

Catégorisations

➤ Réaction interne

- Structure portée par l'utilisateur

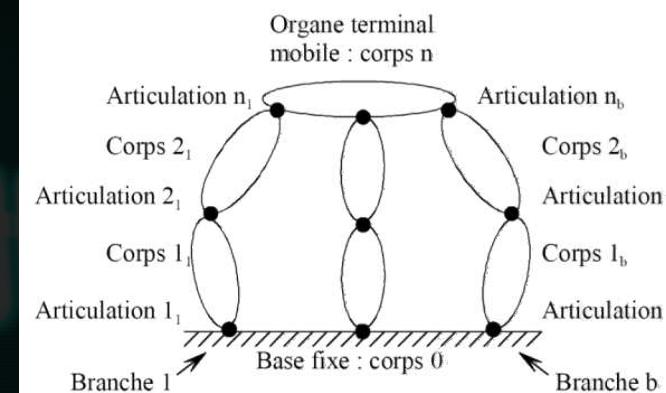
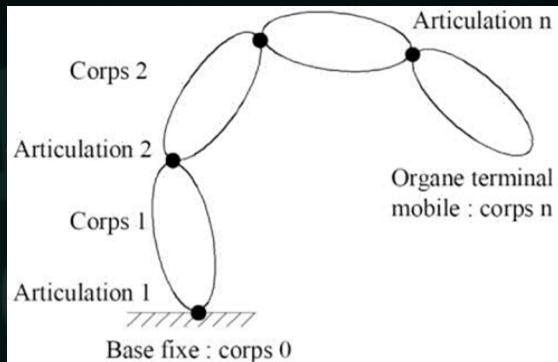


➤ Réaction externe

- Structure implantée dans l'environnement

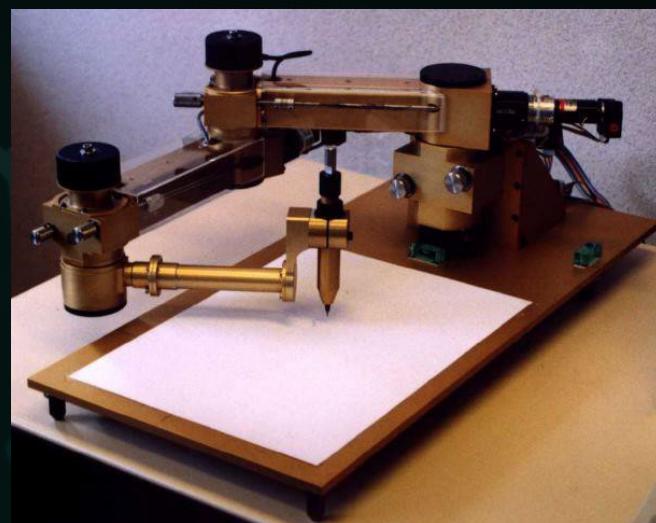
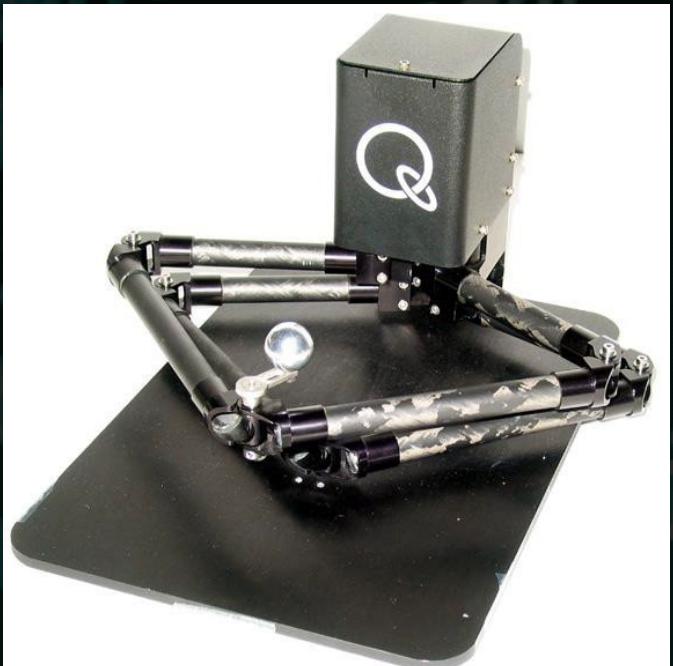
➤ Structures mécaniques

- 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]



[Sensable Premium 6D]



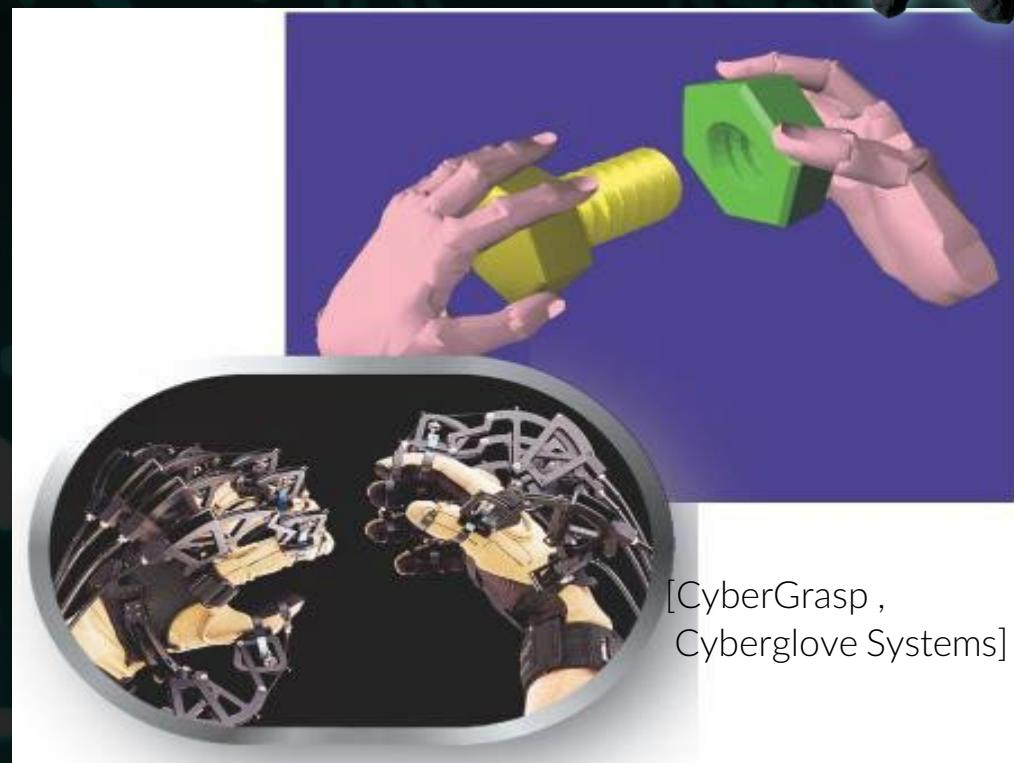
[Virtuose 3D et 6D, Haption]



Gants haptiques

Grande liberté de mouvement

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



[CyberGrasp ,
Cyberglove Systems]

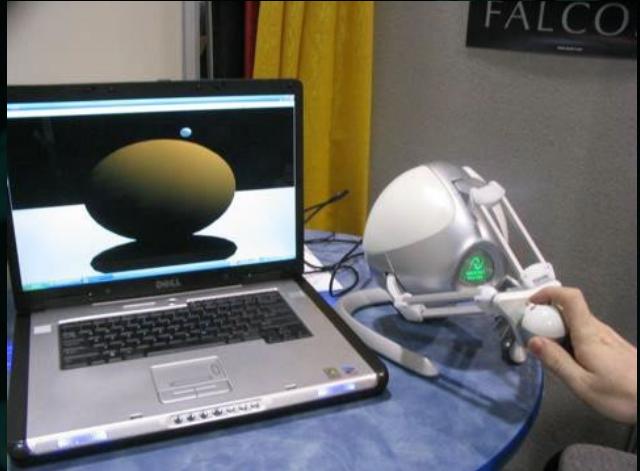


Exosquelettes et bras maîtres

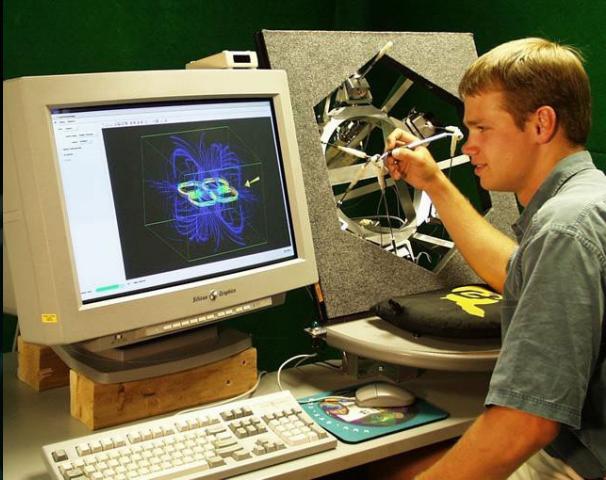


[Mat 6D, Haption]

Structures parallèles



[Novint Falcon]



[Virtuose 6D Desktop, Haption]



Dispositifs à câbles (Spidar)



[Spidar IBISC]

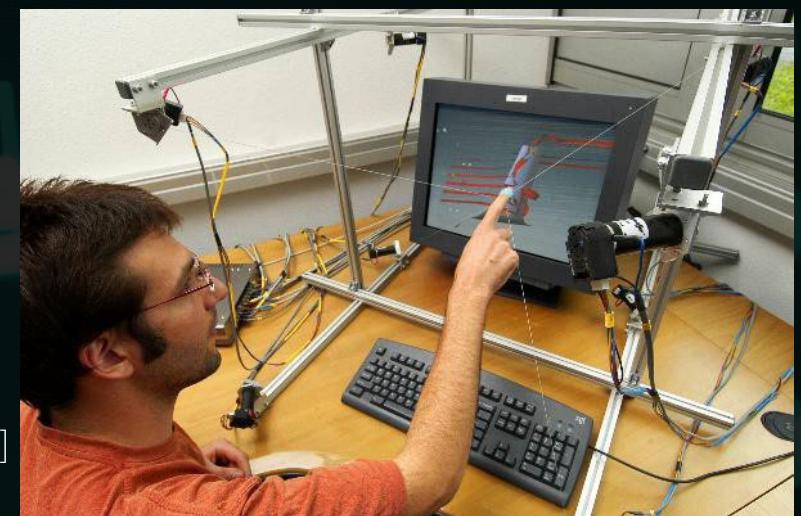


[Tokyo Institute of Technology]



© PSA

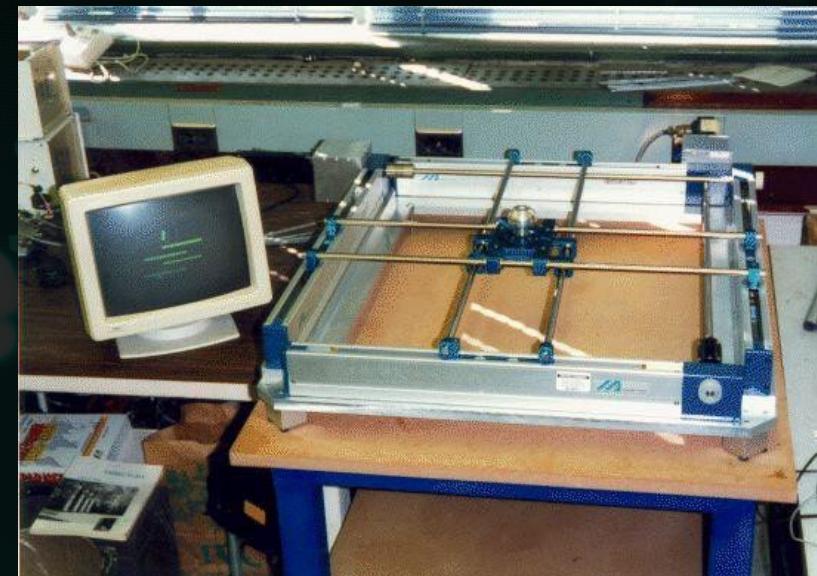
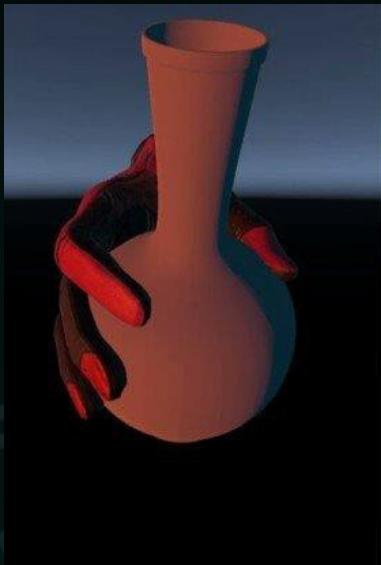
[Inca 6D, Haption]



[Inria]

Structures spécifiques

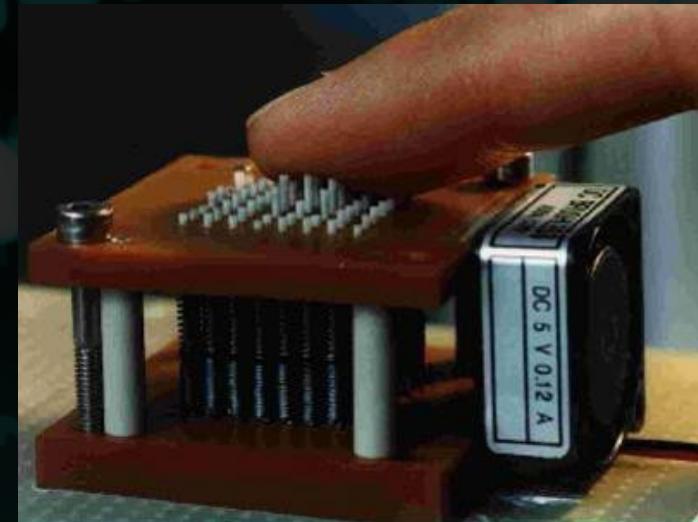
- Recherche
- Caractéristiques mécaniques et métrologiques adaptées
- à des contraintes ou métiers spécifiques



[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 (μm)
- Alliages à mémoire de forme
 - 1 forme préalablement mémorisée dépendante d'une température
- Vibro-tactile
 - Vibrateurs électro-mécaniques
- Electro-tactile
 - Impulsions électriques sur/sous la peau
- Pneumatique
 - Impulsions d'air au bout des doigts
- Thermique



bHaptics Tactsuit et TactGlove



CyberTouch, Cyberglove Systems

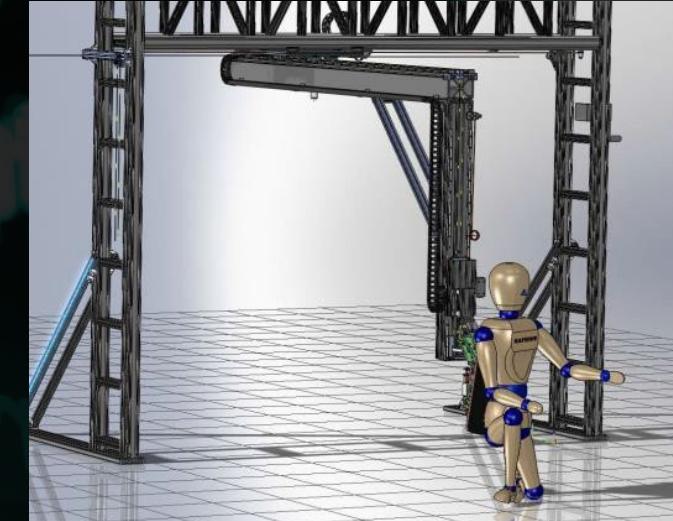
Combinaisons d'interfaces



[Haptic Workstation,
Cyberglove Systems]



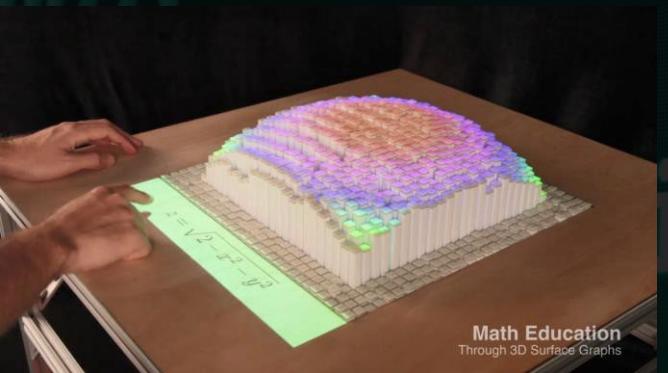
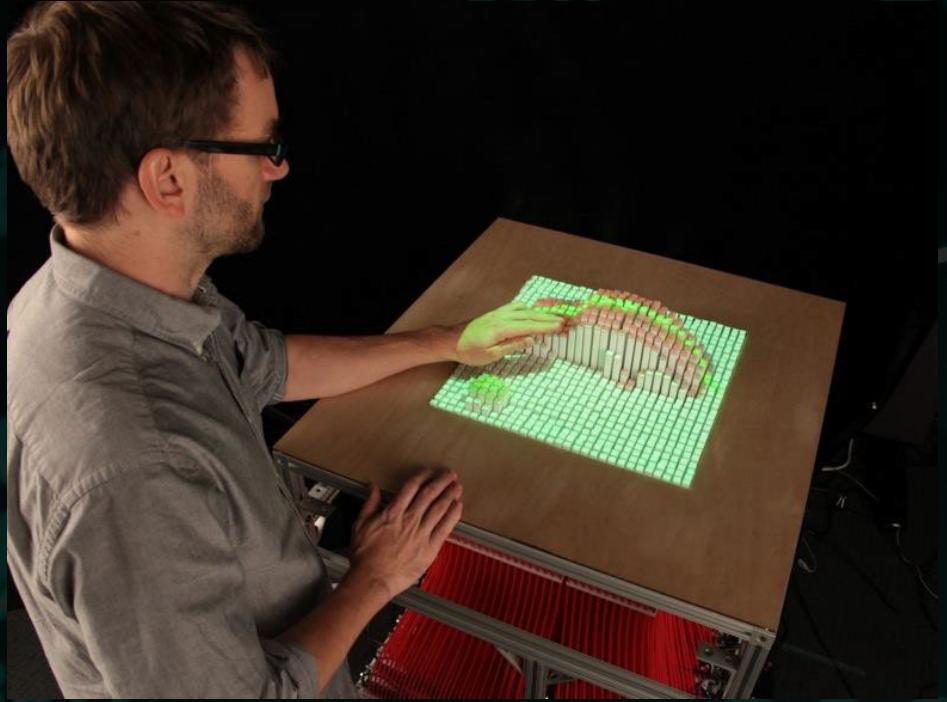
[CyberForce , Cyberglove Systems]



[Scale 1, Haption]

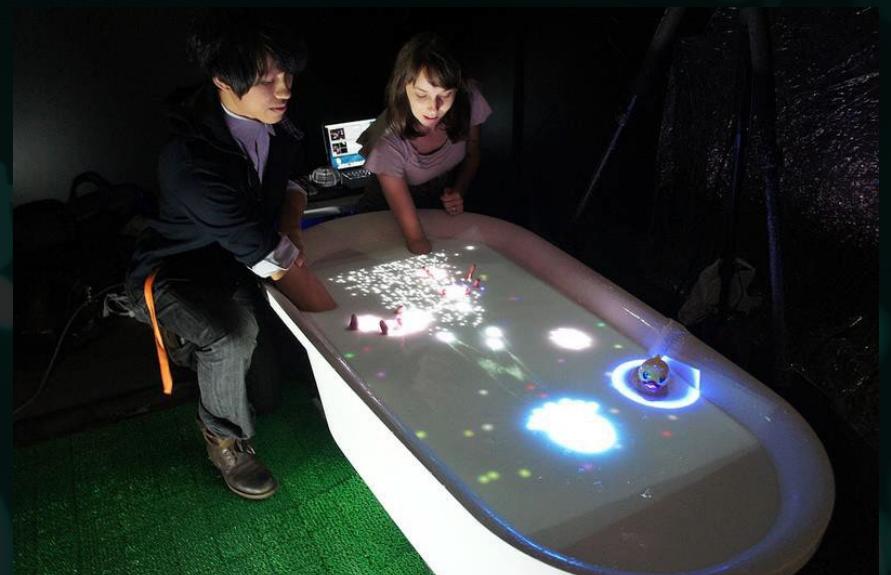


Interfaces tangibles



[MIT Media Lab, Tangible Media Group, 2013]

[Reactable]



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

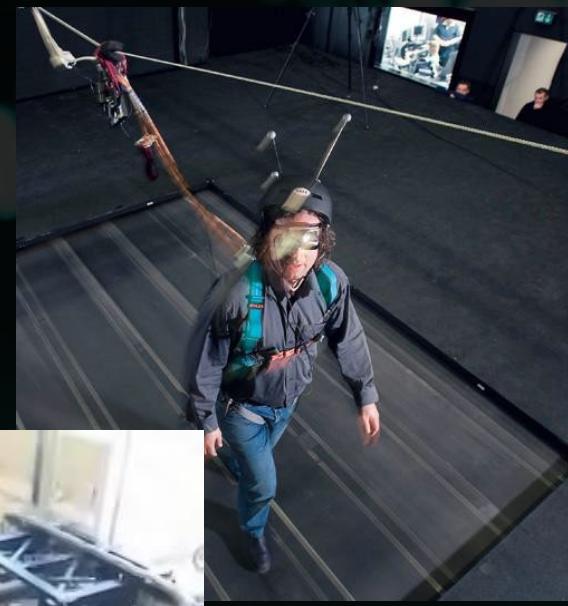
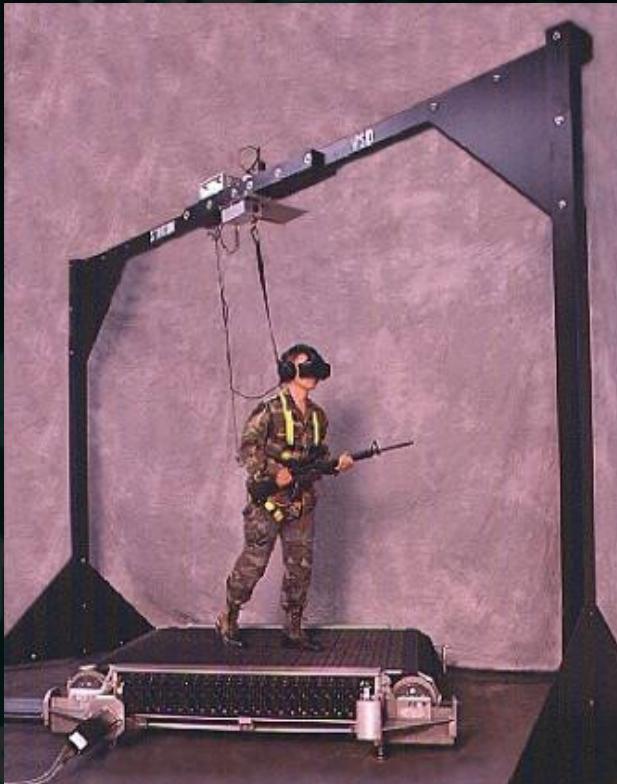
Déplacement 1D/2D

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

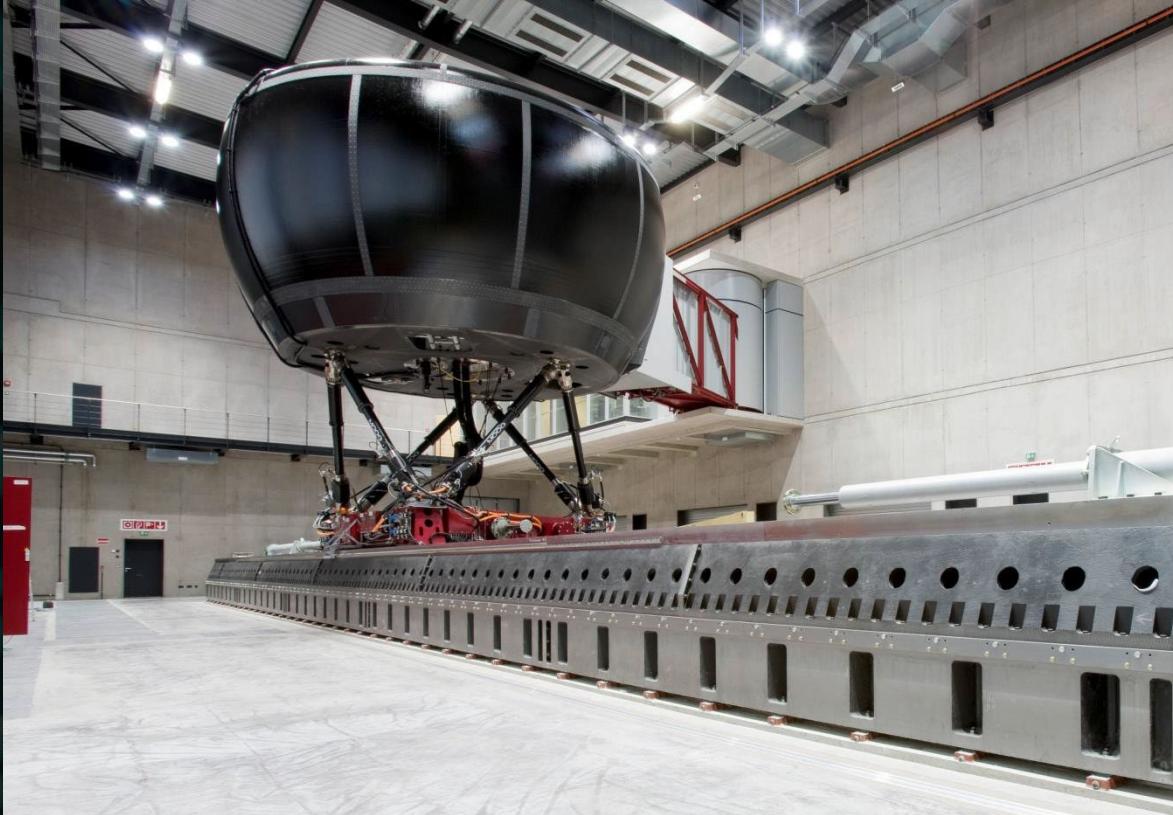


Déplacement 1D/2D

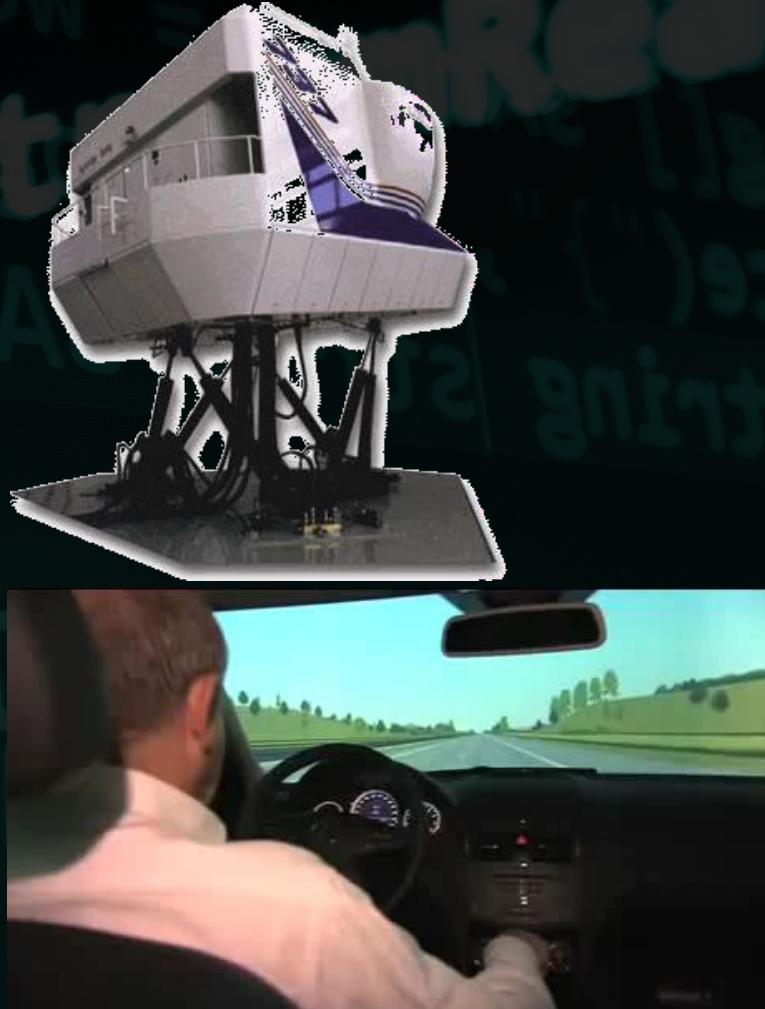
- Tapis roulant 1D, 2D, circulaire
- Plateforme instrumentée



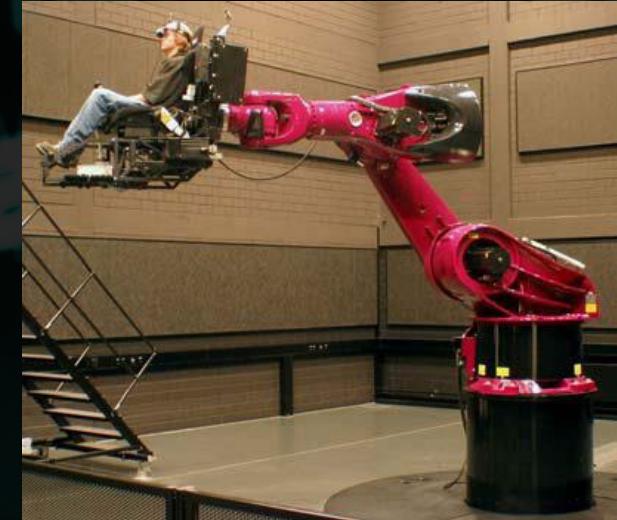
Plateformes



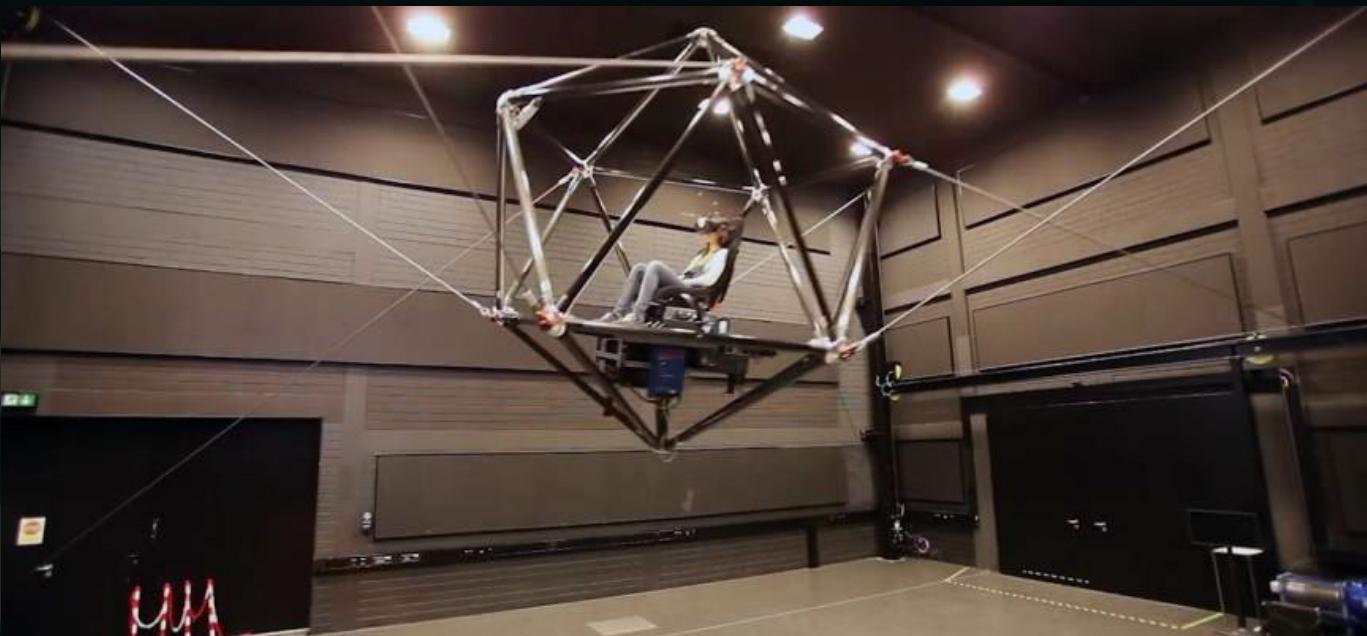
[Mercedes]



Robots



[Cable Robot, Max Planck Institute]



GPS SAYS...



CAPTEURS DE LOCALISATION

TRACKERS

Objectifs d'un capteur de localisation

- Donner

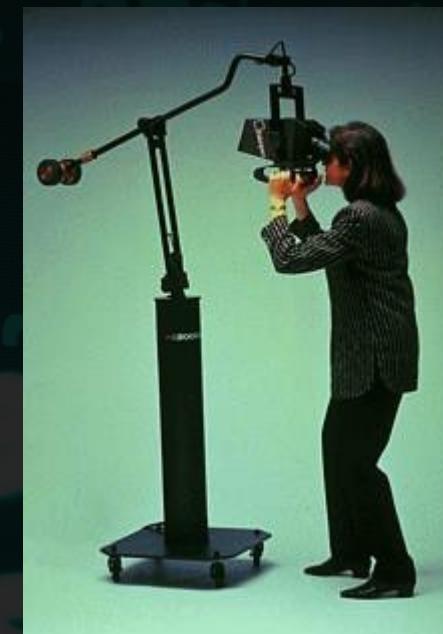
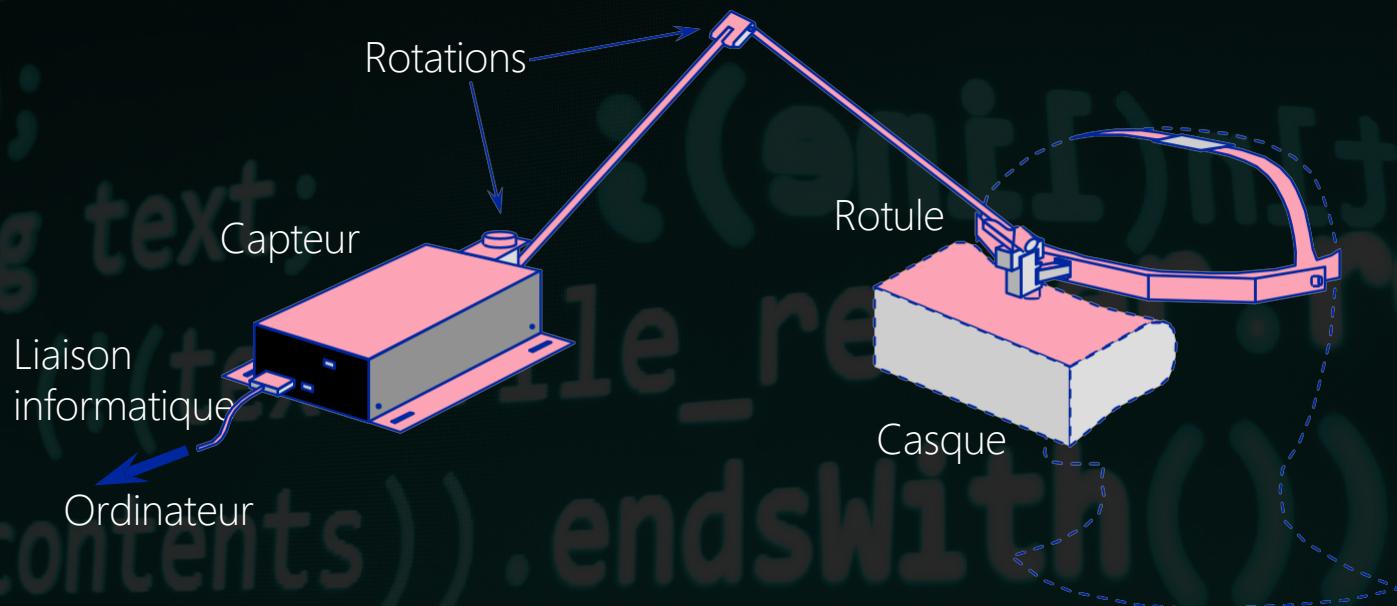
- La position 3d
- Et/ou l'orientation 3d

- 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 recaler en RA...)

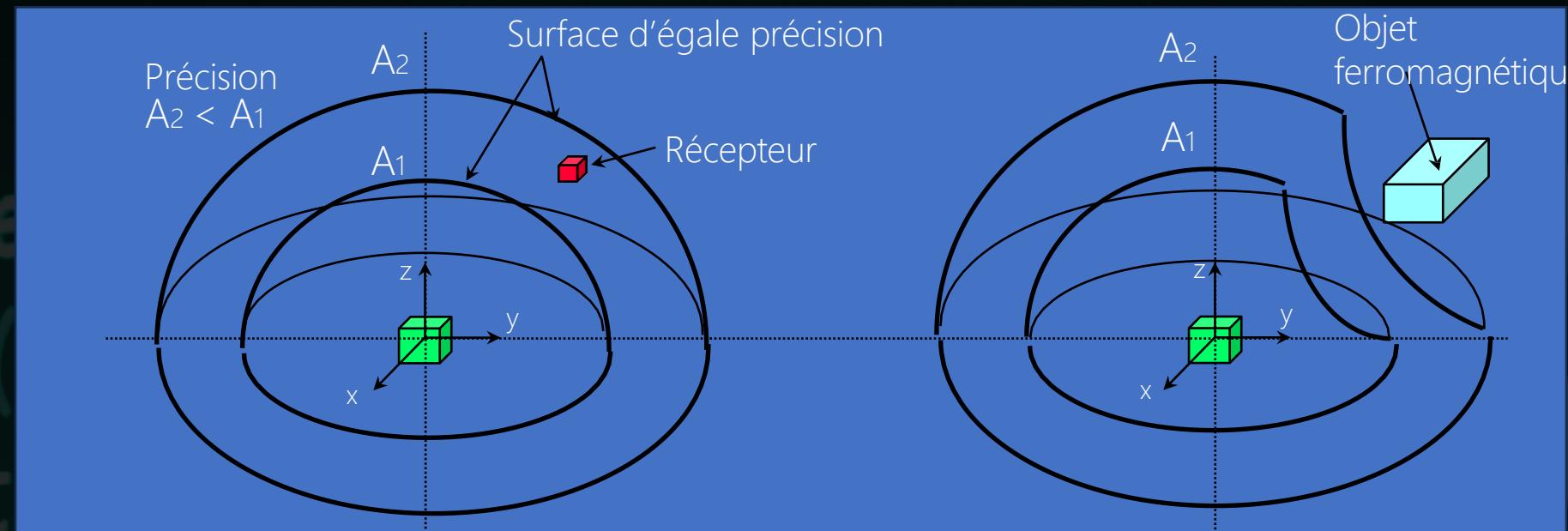
Capteurs mécaniques

- 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



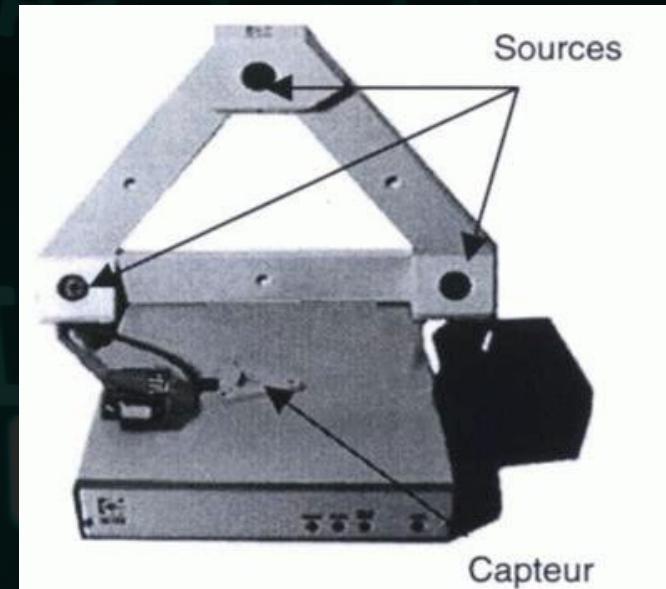
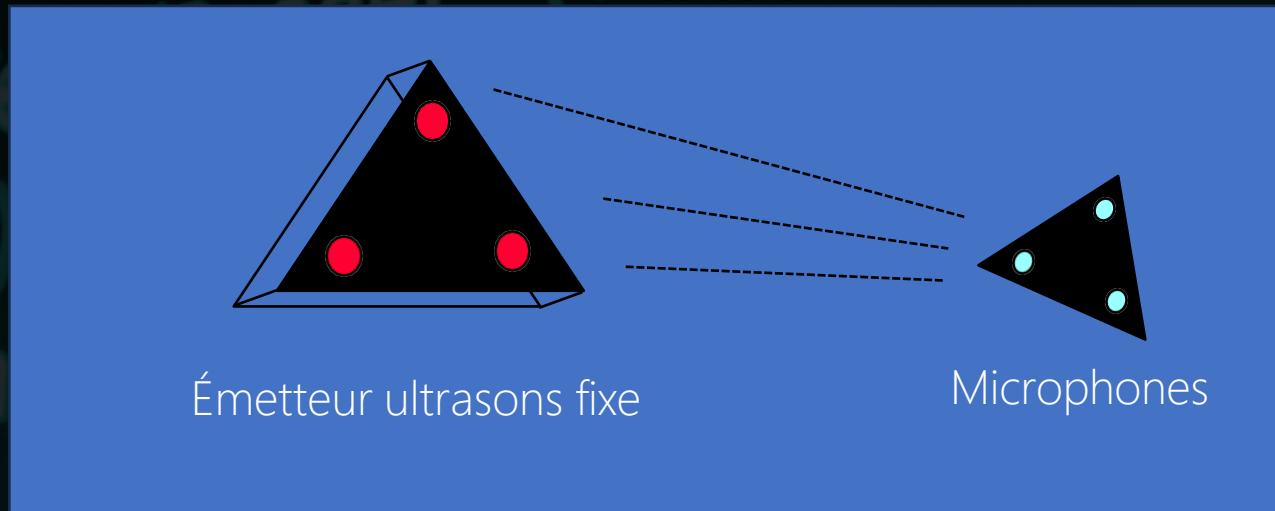
Capteurs magnétiques

- 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

- Emetteur et récepteur d'ultrasons
- Faible coût
- Sensible aux bruits de fond, nécessite une vision mutuelle directe



Capteurs optiques

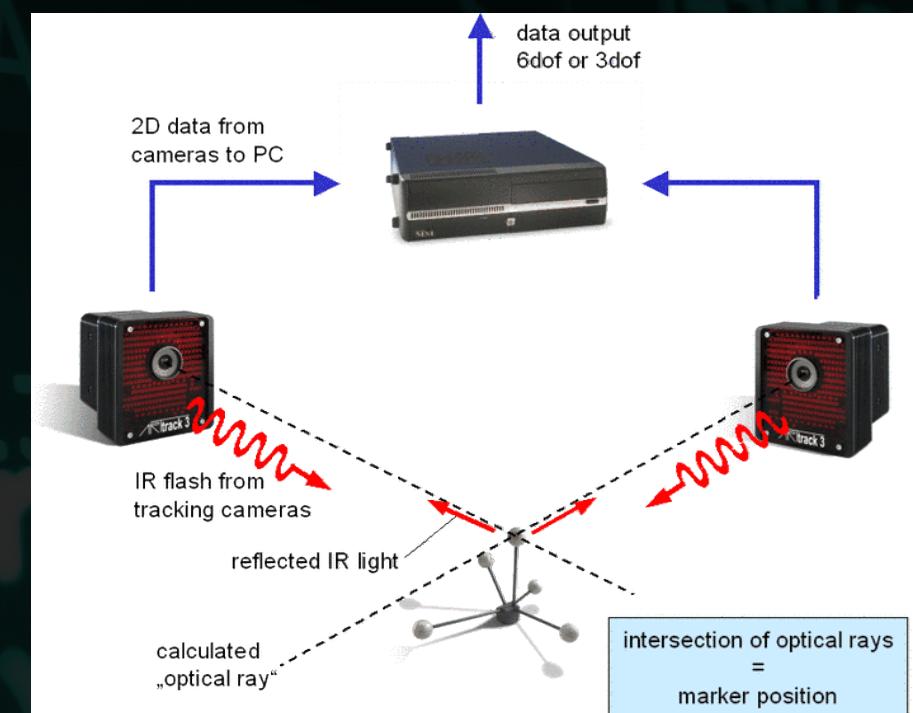
➤ Marqueurs

- Passifs : retro-réfléchissant
- Actifs : diodes

➤ Capteurs

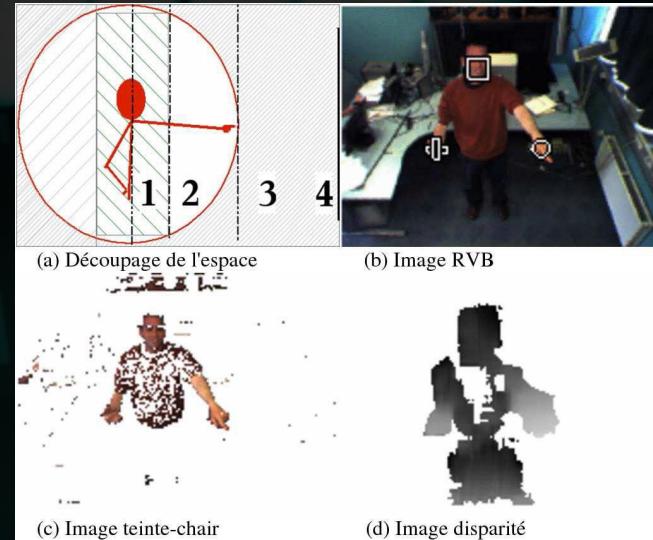
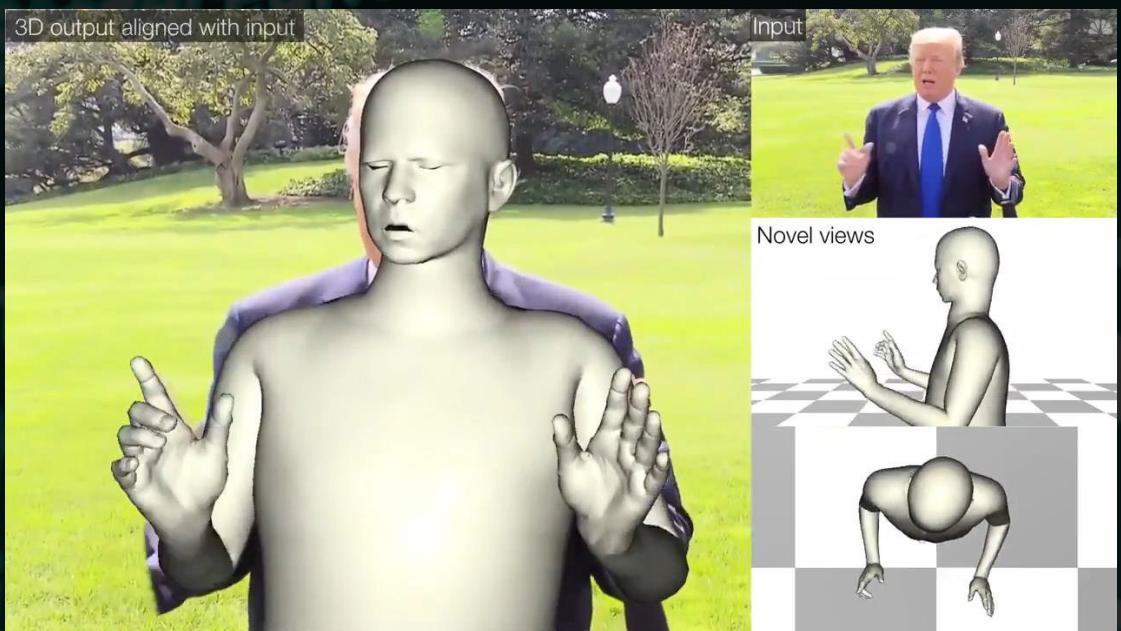
- Caméras infrarouges
- Sans fil, grand nombre de cibles possibles

➤ 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



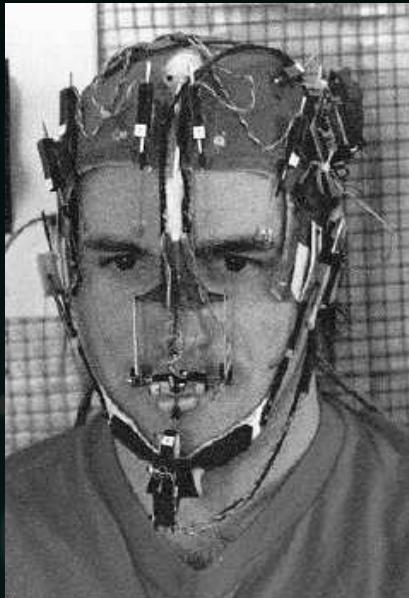
Capture 3D

- Kinect
- Leap motion
- Intel realsense



Capteurs corporels spécifiques

- Combinaisons de données
- Interfaces de locomotion
- Oculomètres
- Détection du visage ou des lèvres

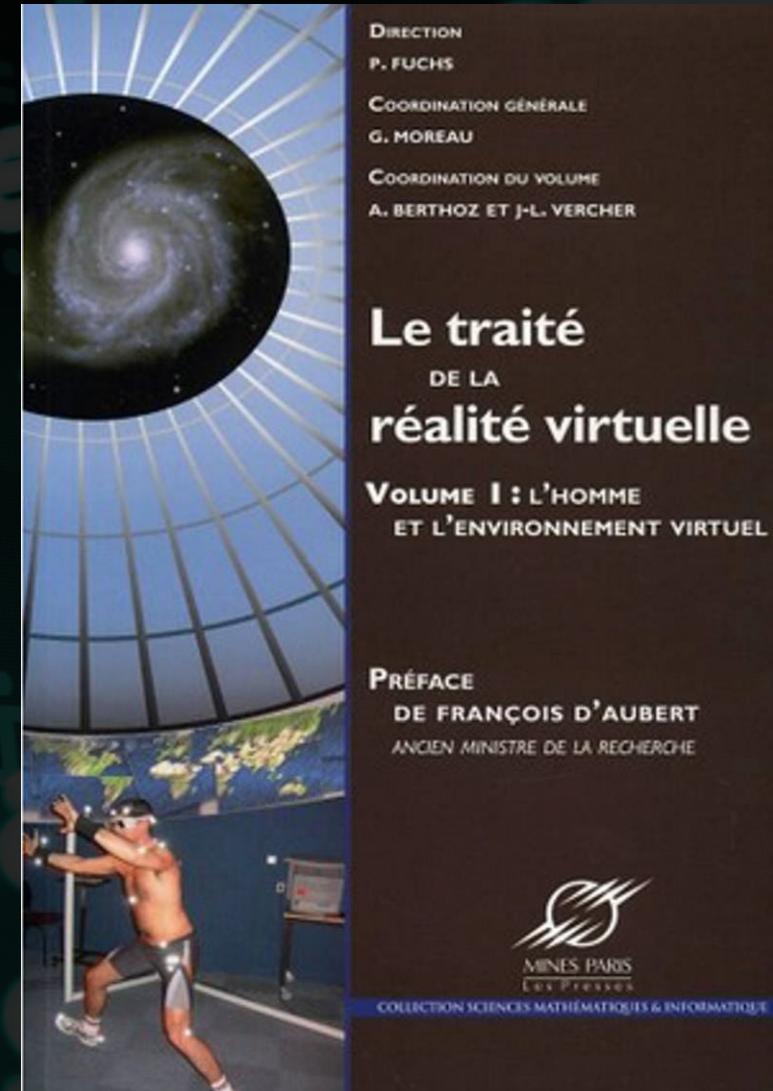


[Immersion 2007]

Traité de la réalité virtuelle F. Fuchs, Guillaume Moreau, 2006-2009 5 volumes

- Vol. 1 : L'homme et l'environnement virtuel
- Vol. 2 : L'interfaçage, l'immersion et l'interaction en réalité virtuelle
- Vol. 3 : Outils et modèles informatiques des environnements virtuels
- Vol. 4 : Les applications de la réalité virtuelle
- Vol. 5 : Les humains virtuels

Les volumes sont récupérables gratuitement au format électronique pour les étudiants: [[Voir sur le site Web de l'AFXR](#)]



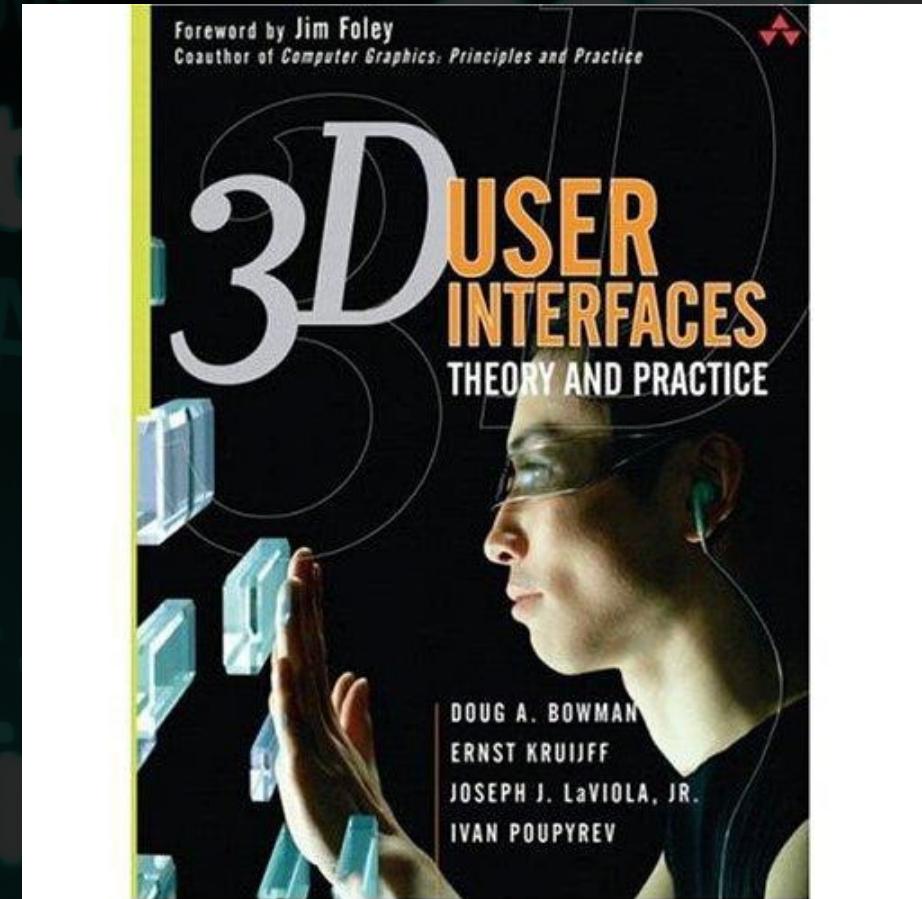
INTRODUCTION: BIBLIOGRAPHIE

➤ 3D User Interfaces, Theory and Practice

- D. Bowman, E. Kruijff, J. Laviola, I. Poupyrev, Addison-Wesley, Boston, 2005

➤ Interaction 3D en réalité virtuelle. Etat de l'art.

- N. Ouramdane, S. Otmane, Malik Mallem, Technique et Science Informatiques, 2009: 1017~1049,
- Fichier PDF récupérable [ici](#)



Bibliographie

- [Berthoz, 1997] Berthoz, A. « Le sens du mouvement», 345p, Odile Jacob.
- [Bowman et al., 2005] Bowman, D., Kruijff, E., LaViola, J. et Poupyrev, I. « 3D User Interfaces: Theory and Practice », Addison-Wesley, Boston, 2005.
- [Burkhardt, 2003] Burkhardt, J.-M., Bardy, B., Lourdeaux, D., « Immersion, réalisme et présence dans la conception et l'évaluation des Environnements Virtuels », Psychologie Française, p. 35-42, 2003.
- [[Essabbah et al., 2009](#)] Essabbah, M., Otmane, S., Hérisson, J. et Mallem, M. « A New Approach to Design an Interactive System for Molecular Analysis », 13th International Conference on Human-Computer Interaction (HCI International 2009), États-Unis d'Amérique (2009).
- [Fuchs et al., 2009] Fuchs, P., « Le traité de la réalité virtuelle» , Vol. 1, 380p, Presse de l'Ecole des Mines, 2009.
- [Julesz, 1971] Jules, B. Julesz, B. « Foundations of Cyclopean Perception» . Chicago: The University of Chicago Press, 1971
- [[Ouramdané, 2008](#)] Ouramdané, N. « Vers un système d'assistance à l'interaction 3D pour le travail et le télétravail collaboratif dans les environnements de réalité virtuelle et augmentée », thèse de doctorat de l'Université d'Evry-Val-d'Essonne, 2008.
- [[Ouramdané et al., 2009](#)] Ouramdané, N., Otmane, S. et Mallem, M. « Interaction 3D en Réalité Virtuelle - Etat de l'art », Technique et Science Informatiques (TSI) 28, 8 (2009) p. 1017— 1049.
- [Otmane et al., 2000] Otmane, S., Mallem, M., Kheddar, A. et Chavand, F. « ARITI : an Augmented Reality Interface for Teleoperation on the Internet », in Advanced Simulation Technologies Conference 2000, High Performance Computing » HPC 2000, Pages 254-261, April 16-20, Wyndham City Center Hotel, Washington, D.C., USA.
- [Tisseau, 2001] Tisseau, J. « Réalité virtuelle : autonomie in virtuo. » Habilitation à Diriger des Recherches - Université de Rennes I. Décembre 2001

Sources

- ④ <https://blog.3ds.com/fr/brands/delmia/comprendre-les-differences-entre-realite-augmentee-realite-virtuelle-et-realite-mixte/>
- ④ <https://digipad.app/p/197019/babb370a58fba>
- ④ <https://kaizen-solutions.net/kaizen-insights/kaizen-events/tech-week-ar-vr-avr21/>
- ④ <https://www.researchgate.net/publication/260749608 Annotations gestuelles pour capitaliser les interactions en environnement virtuel informe Application a la maintenance industrielle>
- ④ <https://www.linkedin.com/pulse/back-basics-7-how-users-interact-product-part-1-mikey-brogdon/>
- ④ <https://youtube.com/playlist?list=PLVsoGAjYGRjle1pVEHs0TSrtj5BKzOewp>