

Dominique Yolin
dominique@arcrean.com



Comprendre et concevoir

- Cours de découverte -

WHEN USING VR



FOR THE FIRST TIME

Comprendre la boucle Perception Action

Les éléments clés

Comprendre la vision

La stéréoscopie en VR

Quelques dispositifs

Avant-propos

- Merci à David Bilemdjian pour son cours / atelier de conception sur la réalité virtuelle
- Celui-ci a grandement aidé à structurer et enrichir ce chapitre et le suivant

Hands In VR



After
long
session



| La Boucle Perception/Action

Sujets couverts dans ce chapitre

➤ Un peu de vocabulaire

➤ « Comprendre » le fonctionnement du cerveau

- Notion de boucle perception / action

➤ Qu'est-ce qu'un schème

- Naturel
- Artificiel

➤ Notion d'interprétation

➤ Exemple

Vocabulaire nécessaire pour la suite

- ➊ **Proprioception** : Proche de la kinesthésie, la proprioception est la capacité du corps à ressentir sa position dans l'espace et la position des différentes parties du corps les unes par rapport aux autres.
 - Elle dépend de capteurs situés dans les muscles, les tendons et les articulations.
 - La proprioception est la conscience qu'a le corps de sa position dans l'espace (en termes de statique).
 - La kinesthésie est la conscience qu'a le corps de son mouvement dans l'espace.
- ➋ **Extéroception** : C'est la perception des stimuli venant de l'extérieur du corps, principalement via les cinq sens (vue, ouïe, toucher, goût, odorat).
 - L'extéroception permet de détecter les changements dans l'environnement et d'y réagir de manière appropriée.
- ➌ **Schèmes** : En psychologie cognitive, un schème désigne une structure mentale ou un cadre de référence à travers lequel une personne interprète et organise les informations.
 - Les schèmes sensorimoteurs, par exemple, sont des ensembles d'actions répétitives qui permettent à l'individu d'interagir avec son environnement.
- ➍ **Métaphores** : concepts ou analogies utilisés pour rendre l'interaction avec le monde virtuel plus intuitive pour l'utilisateur.
 - Elles consistent à transposer des actions ou des objets de la vie réelle dans un environnement virtuel pour que l'utilisateur comprenne rapidement comment interagir avec ce dernier.
 - **Exemples de métaphores en réalité virtuelle :**
 - Métaphore de l'outil : Dans un contexte où un utilisateur doit interagir avec des objets spécifiques, une interface en RV peut imiter des outils réels, comme un pinceau pour peindre ou un tournevis pour visser.
 - Métaphore de la téléportation : Comme se déplacer naturellement en VR est limité par la taille de la pièce physique, une métaphore courante est la téléportation, où l'utilisateur "sauter" instantanément à un autre point du monde virtuel en pointant simplement une direction.

Canaux et interfaces ?

- Les 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
- Pour concevoir des applications correctes il est nécessaire de
 - 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

Comprendre le cerveau et la perception

➤ Le cerveau n'est pas réactif, mais proactif projetant ses interrogations sur le monde.

- Devenir un champion de ski implique plus que simplement réagir à des informations sensorielles et corriger la trajectoire.
 - Cela nécessite de visualiser mentalement la course, de prédire les états des capteurs, d'anticiper des solutions possibles pour les erreurs, de prendre des décisions et d'agir avant qu'elles ne soient exécutées.

➤ Hypothèses et configurations de capteurs

- Lorsque le cerveau initie une action, il forme des hypothèses sur les états attendus de certains capteurs pendant le processus.
 - Le skieur champion simule mentalement le parcours sur la piste et vérifie de manière intermittente si les états des capteurs correspondent aux prédictions (par exemple, l'angle du genou, la distance aux portes).
- Ces regroupements de capteurs sont appelés "configurations", et le cerveau vérifie simultanément les configurations de capteurs spécifiées avec les mouvements programmés.

Kinesthésie et sens du mouvement

- La collaboration de plusieurs capteurs donne naissance au "sens du mouvement" ou kinesthésie.
- Le cerveau doit reconstruire de manière cohérente les mouvements du corps et de l'environnement pour maintenir ce sens.
- Défis perceptifs et illusions
 - Lorsque la cohérence entre les informations sensorielles et les représentations internes est perturbée, des troubles perceptifs et moteurs surviennent.
 - Le cerveau peut créer des illusions comme solutions aux données sensorielles et aux représentations internes incohérentes.

Relation entre Perception et Interprétation

➤ Le cerveau traite les informations sensorielles en les filtrant à travers ses propres hypothèses, créant une réalité subjective qui peut limiter notre capacité à percevoir de nouvelles perspectives.

- Face à des informations ambiguës, le cerveau se base sur des expériences passées pour anticiper l'avenir, illustrant sa capacité à naviguer dans un monde complexe.

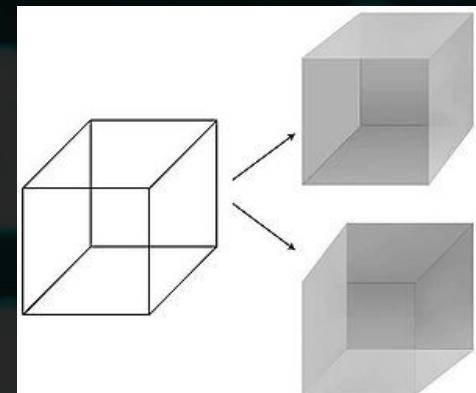


➤ Intégration de la Perception et de l'Action

- La perception est liée à l'action, car le cerveau simule des actions en fonction des objets perçus, soulignant l'interaction entre perception et action.

➤ Exploration des Concepts d'Illusion et de Réalité

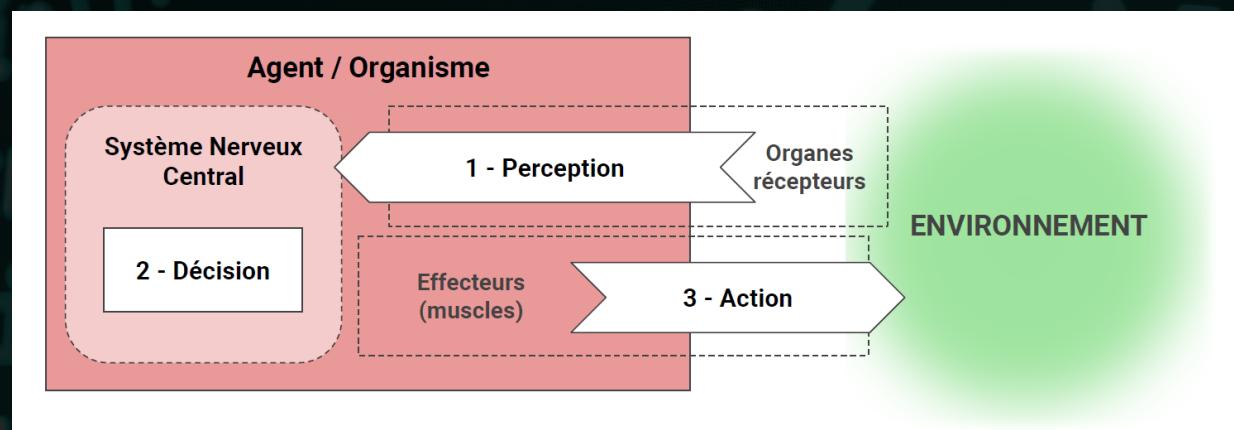
- L'illusion et la réalité mettent en lumière la complexité de la prise de décision du cerveau, illustrant sa capacité à interpréter et créer des réalités subjectives.



Modélisation du comportement d'un agent / organisme

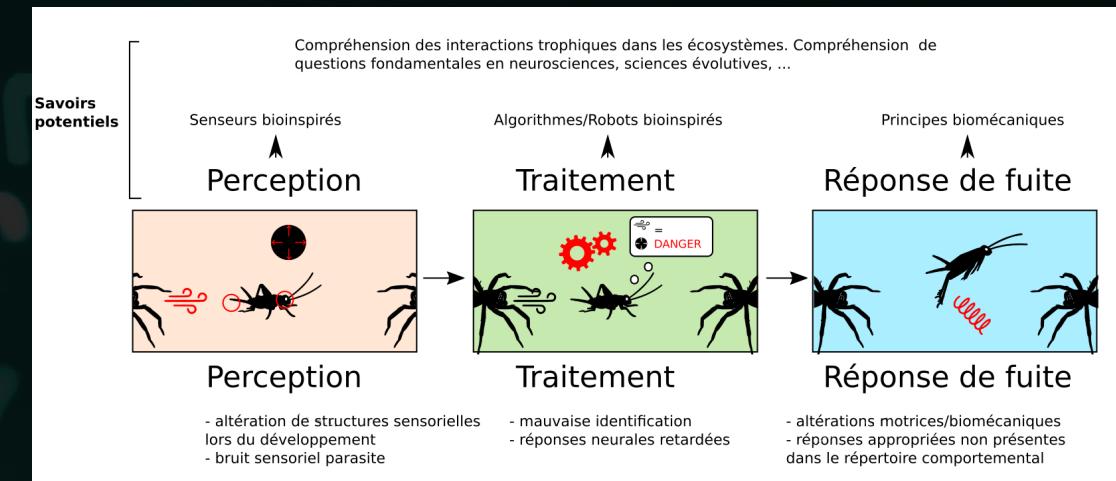
➤ Système Nerveux Central chez l'humain:

- cerveau,
- cervelet,
- tronc cérébral
- moelle spinale



➤ Organes récepteurs:

- capteurs sensoriels extéroceptifs
- capteurs sensoriels proprioceptifs



Boucle perception/action chez l'homme

➤ Dans la vie de tous les jours ...

- L'humain utilise de nombreuses actions réflexes
- Utilisation des sens pour contrôler le bon fonctionnement des actions
- Utilisation des actions pour mobiliser les sens.

➤ C'est la signification du terme « Boucle perception/action »

- [Berthoz, 1997]

Les actions et le cerveau

➤ Découvertes Récentes en Neurosciences

- Les neurones du cerveau reflètent à la fois les actions observées et effectuées, brouillant la frontière entre perception et action.
- Le cerveau agit comme un simulateur biologique complexe, démontrant sa capacité à s'adapter et interagir avec son environnement de manière dynamique.

➤ Prise de Décision et Quête de Vérité

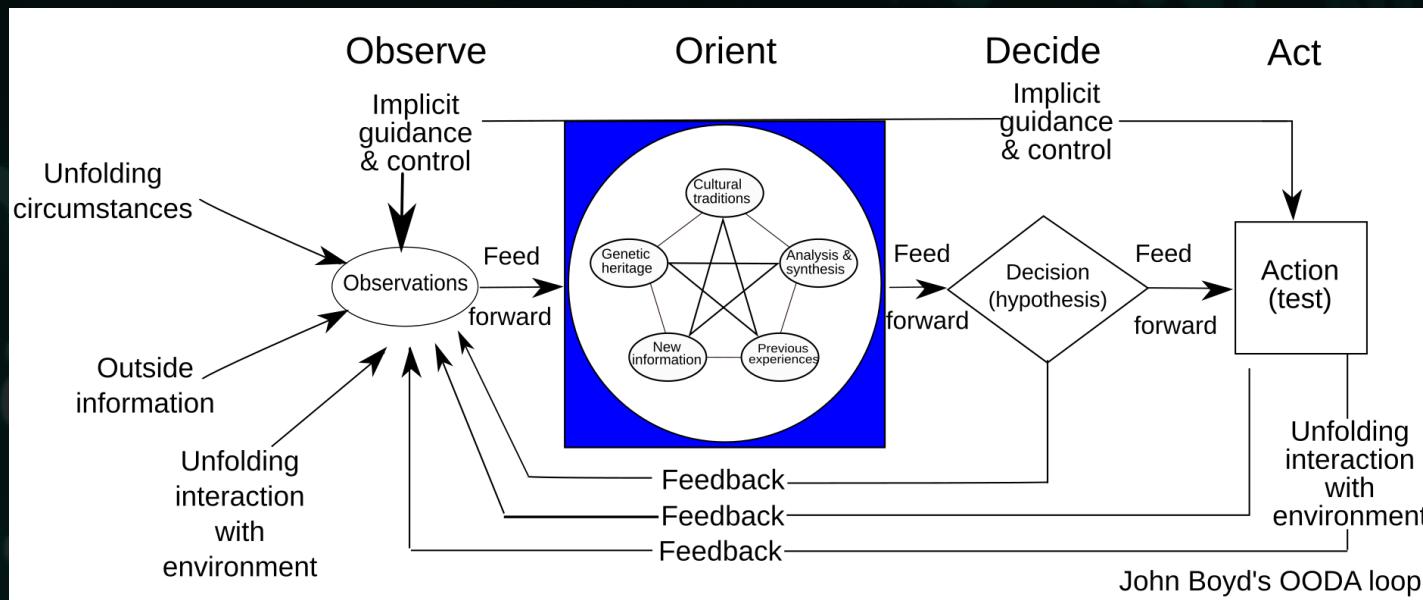
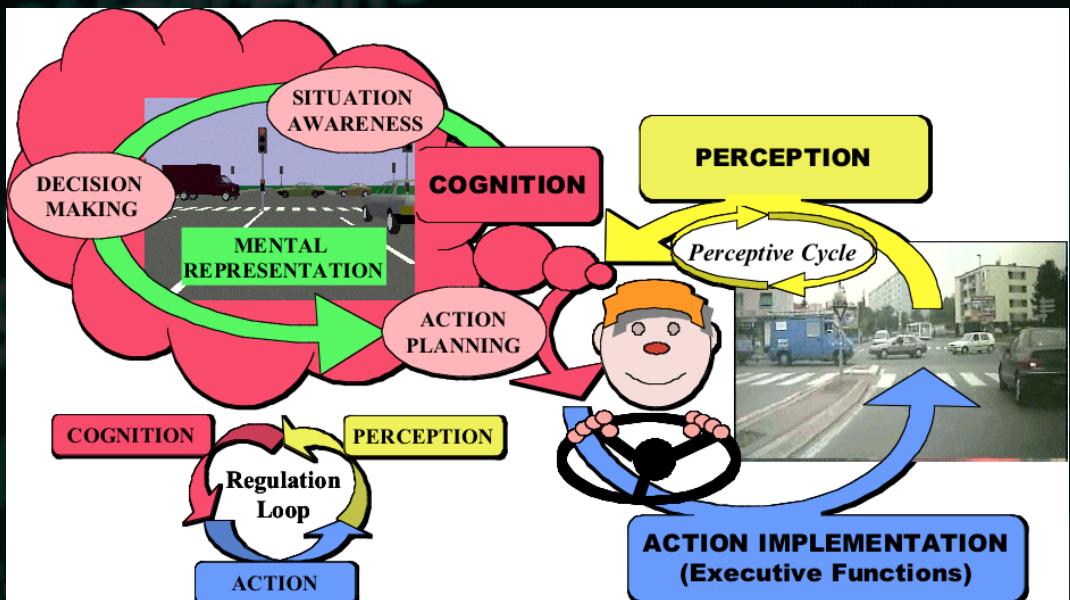
- La prise de décision implique l'inhibition et le traitement émotionnel pour discerner la vérité, équilibrant les entrées cognitives et limbiques.
- Le cerveau construit sa propre version de la vérité en s'appuyant sur des expériences passées et des anticipations futures, influencées par des facteurs émotionnels.

➤ Mémoire et Anticipation Future

- Les systèmes de mémoire et les simulations de scénarios futurs partagent des réseaux neuronaux complexes, démontrant la plasticité et l'adaptabilité du cerveau face à un monde en constante évolution.

Extension de la boucle « Perception / Action »

- On trouve également des références à « Action / Perception / Action » (APA - <http://www.revue-proteus.com/articles/Proteus06-4.pdf>)
- Ainsi qu'à « Perception / Cognition (ou Décision ou Traitement) / Action »
- Ou alors « Observe / Orient / Decide / Act »



Schèmes comportementaux

- Comportement "naturel" dans le monde réel = inconsciemment et sans grand effort mental
- Notion de schèmes [Piaget 1979] :
 - Organisation mentale des actions pour des classes de situations
 - Se transfèrent, se reproduisent ou se généralisent lors de la répétition de ces actions en des circonstances analogues
 - Inconscients
- Exemple : préhension d'un objet
 - Canevas général reproduit dans des conditions différentes (distance, poids...)
 - Donne lieu à des réalisations variées caractérisées par des paramètres sensori-moteurs (ouverture de la main, tension du bras...)

Schèmes comportementaux

- Transposition et adaptation des schèmes du monde réel dans l'environnement virtuel
 - Efforts cognitifs : dispositif matériel, incohérences...
- Exemple : préhension d'un objet en RV
 - Réutilisation du schème naturel
 - Dépendant de l'interface : gant de donnée, traqueur 6dof...
 - Biais sensori-moteurs : regard vers l'écran, main non fermée, pas de poids de l'objet...

Schème Artificiel

- Un schème artificiel est une construction mentale intentionnellement élaborée dans le but de résoudre des problèmes spécifiques dans des contextes particuliers.
- En opposition aux schèmes naturels qui émergent de manière instinctive à travers des expériences répétées, les schèmes artificiels sont délibérément conçus et mis en place pour répondre à des besoins particuliers de réflexion et de résolution de problèmes.

Caractéristiques des Schèmes Artificiels

➤ Conception intentionnelle

- Les schèmes artificiels sont conçus pour répondre à des besoins précis, comme piloter un avion ou manipuler un logiciel complexe.

➤ Basé sur des règles

- Ils reposent sur des méthodes, des algorithmes ou des instructions spécifiques à suivre pour atteindre un objectif défini.

➤ Nécessite un apprentissage formel

- Contrairement aux actions naturelles, les schèmes artificiels exigent un enseignement structuré pour être maîtrisés.

Exemples de Schèmes Artificiels

➤ Conduite automobile

- Apprendre à conduire implique la maîtrise de schèmes artificiels tels que la coordination entre le volant, les pédales et la vue sur la route.

➤ Utilisation de logiciels professionnels

- Interagir avec des outils complexes comme des logiciels de modélisation 3D nécessite la compréhension de schèmes artificiels.

➤ Gestes techniques en chirurgie

- Les techniques chirurgicales sont des schèmes artificiels acquis par une formation spécialisée et répétée.

Exemple 1: la saisie d'objets dans le monde réel

➤ Remarques initiales:

- La construction de l'espace proche peut être compliquée en RV

➤ Conséquence:

- La préhension en RV n'est pas facile a priori

Vidéo



Exemple 1: la saisie d'objets dans le monde réel

- ➊ C'est un réflexe sensorimoteur complexe appris
- ➋ Nécessite une coordination entre:
 - Les muscles du bras (organe moteur)
 - Les yeux pour le contrôle en phase d'approche et de saisie
 - Des retours sensoriels de la main en phase de saisie
- ➌ Caractérisée par une vitesse d'approche rapide (loin de l'objet), puis plus lente (à l'approche de l'objet)



Exemple 1: la saisie d'objets dans le monde virtuel

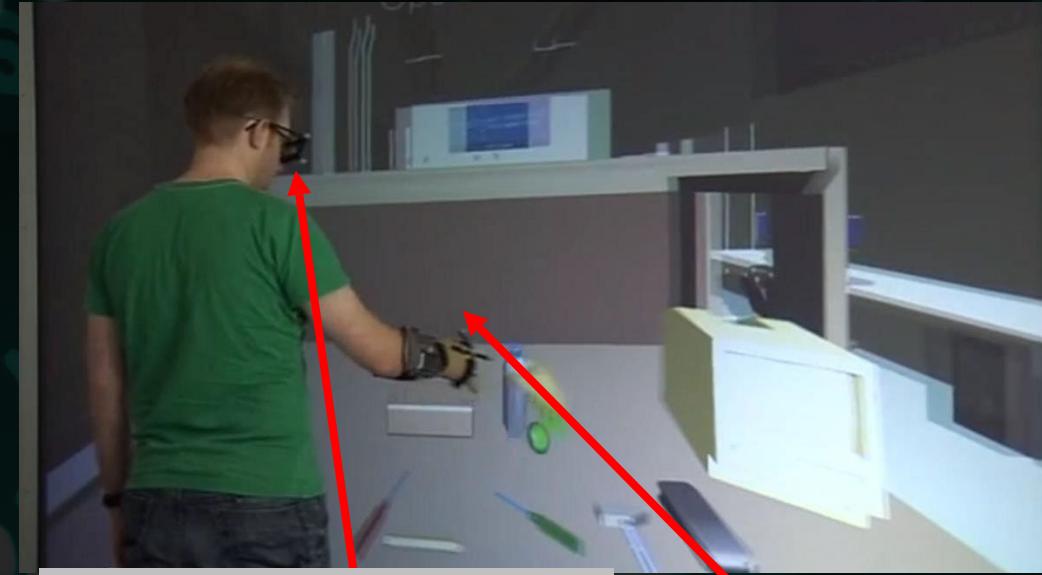
➤ Nécessite:

- Capteurs (caméras Infra-Rouge, gants de données)
- Effecteurs (exosquelette)
- Liant entre réel et virtuel

➤=> techniques d'interaction 3D

Vidéo 1

Vidéo 2



Lunettes stéréoscopiques
Marqueur de tête

Marqueurs pour la main
Exosquelette
Gants de données

Exemple 2: la marche dans le monde réel

- C'est un réflexe sensorimoteur complexe appris
- Nécessite une coordination:
 - des muscles des jambes, des bras, de la colonne et du cou (organes moteurs)
 - Des yeux, de l'oreille interne, des sensations tactiles des pieds et des muscles (organes sensoriels)

Exemple 2: la marche... dans le monde virtuel

➤ Nécessite:

- Capteurs
- Effecteurs
- Liant entre réel et virtuel

➤ = techniques d'interaction 3D

[[Vidéo ancienne \(2007\)](#)]

[[Vidéo plus récente \(09/2017\)](#)]



Gyroscope

Casque
HMD
stéréoscopique

Sphère
Liaison
Rotule



Dans les deux cas, côté réel

- Apprentissage très tôt dans l'enfance
- Mécanisme robuste et fiable (si pas de problèmes de santé ...)
- Aucun besoin de concentration après apprentissage

Besoins

- Dans le monde virtuel, coté système
 - Besoin d'instrumentation
 - Périphériques adaptés à la restitution sensorielle et motrice.
 - Besoin d'une couche logicielle spécifique
 - Construction d'une relation entre les mouvements de l'homme et la réaction du système dans le monde virtuel.
- Dans le monde réel, coté utilisateur
 - Besoin d'une adaptation à l'interaction avec le monde virtuel ;
 - Besoin de concentration? Besoin d'apprentissage? ;
- Études cognitives à mener pour apprêhender l'adéquation humain/système.

Des interactions plus naturelles entre l'homme et la machine sont possibles.



[Marche et course « naturelles » \(Virtuix\)](#)



➤ Pourquoi utiliser une interaction « naturelle » avec l'environnement ?

➤ Principalement parce que :

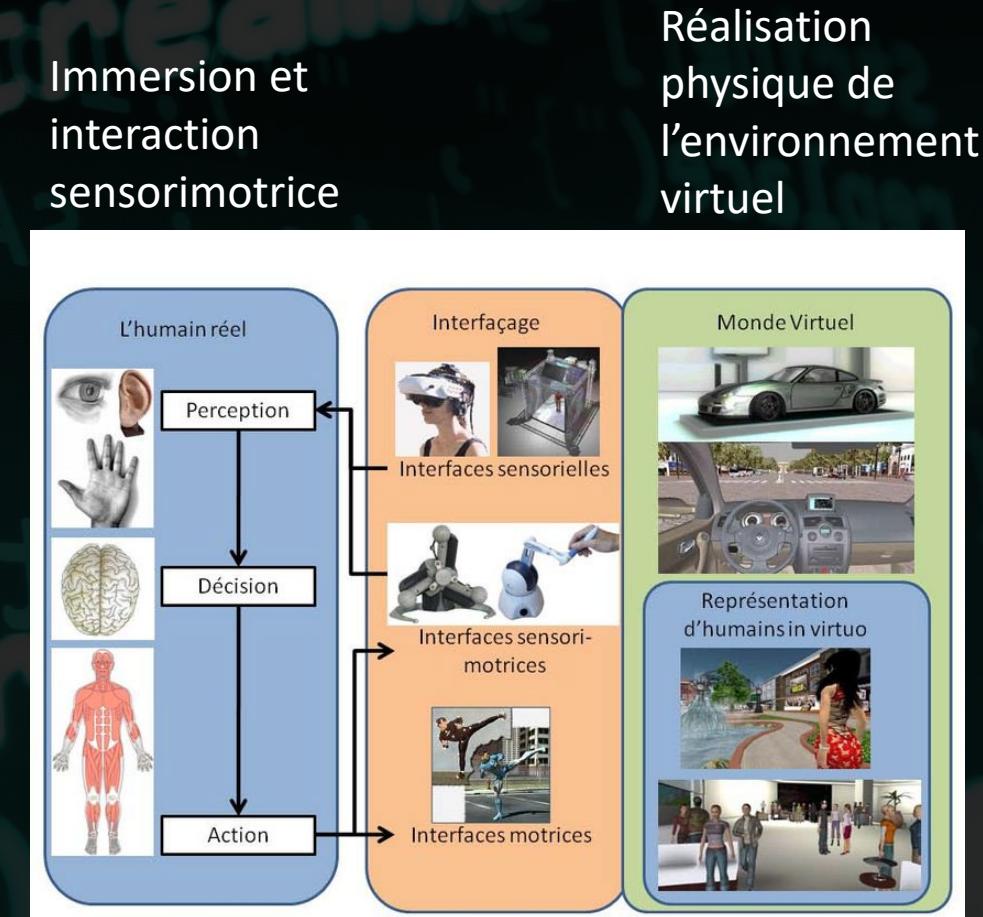
- On espère une meilleure acceptation de la machine par l'homme
- On espère réduire l'apprentissage lié à l'interaction avec la machine pour se concentrer sur la tâche à exécuter dans le monde virtuel

Boucle “perception, décision, action” en Réalité Virtuelle

➤ Le cerveau anticipe au niveau de la boucle perception/action interne à la personne donc en environnement virtuel, elle sera perturbée par les **incohérences sensorimotrices** dues aux interfaces

➤ S'il existe un petit décalage entre ce que le cerveau anticipe et ce qui se passe (incohérence), possibilité de mal du simulateur.

- Exemple classique: navigation dans un monde virtuel.

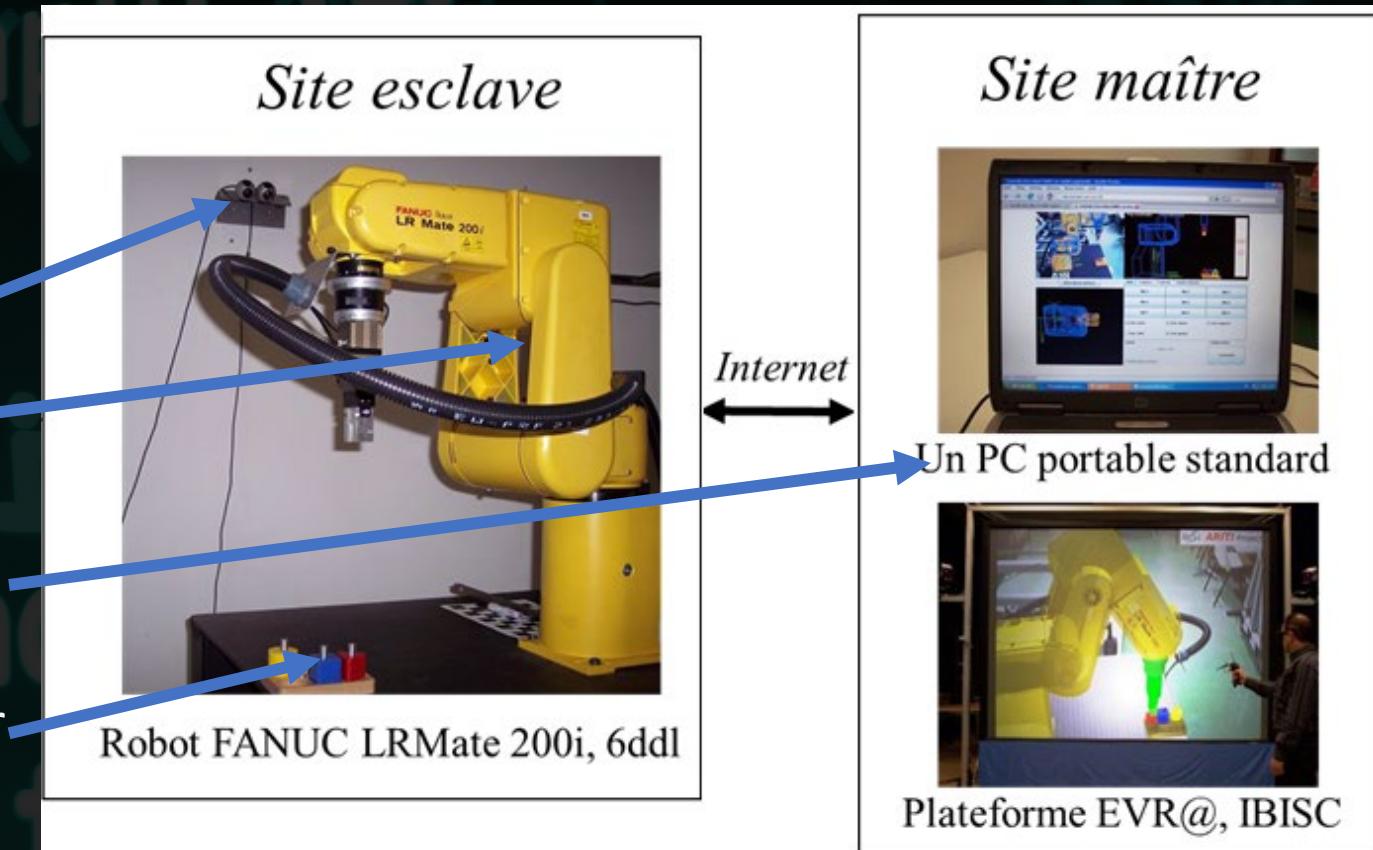


Un premier exemple complet d'interaction homme/machine ...

- Interaction entre un homme et un robot distant via une liaison internet
 - Article de référence: [Otmane et al., 2000]

- Site esclave robotisé, plate-forme EVR@-RO, 2006
 - Deux Webcams (permet la vision stéréoscopique) surplombant le robot
 - Robot FANUC LR Mate 200i, 6ddl
 - PC serveur d'images relié aux Webcams, délivrant un flux stéréoscopique
 - PC serveur de commandes pilotant le robot axe par axe
 - Pièces géométriques colorées à déplacer d'un socle à l'autre

- Projet ARITI (1997-2006)
 - [Vidéo du projet ARITI](#)



Que nous apprend ce premier exemple sur l'interaction homme/machine?

- Diversité des actions et modes perceptifs pour réaliser un même objectif
- Choix de la méthode (technique) d'interaction très important
- La mise en œuvre technique est rapidement complexe si des outils adéquats ne sont pas utilisés
- Beaucoup de questions relevant des sciences cognitives

Mom: Don't sit too close to the TV.
It's bad for your eyes.



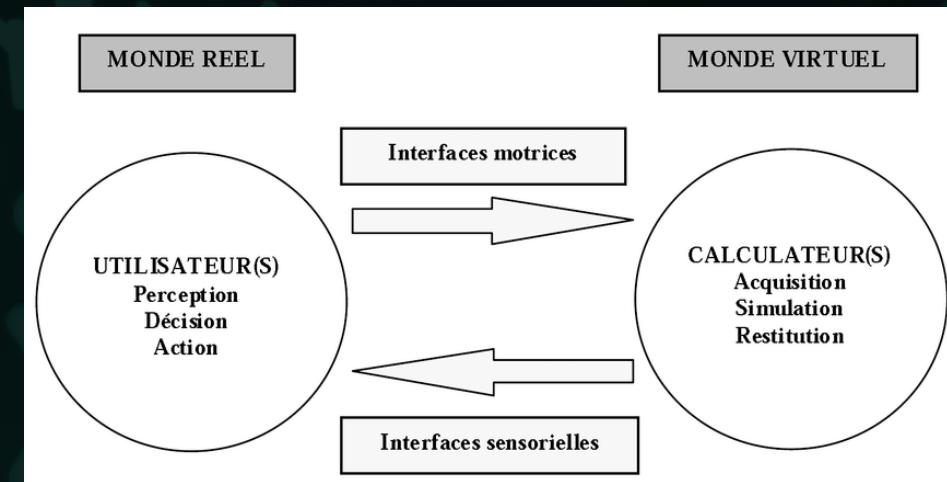
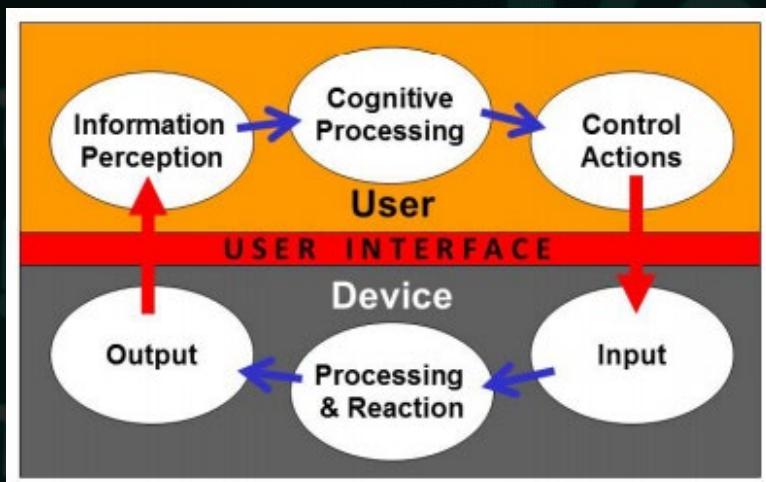
20 years later...



Éléments clés pour une bonne
compréhension de la VR

Naissance d'une « autre » réalité

- Caractérisation des éléments clés de la boucle perception/action en rapport avec la réalité virtuelle
 - L'homme perçoit la réalité à travers l'action coordonnée de ses organes sensori-moteurs.
- Une autre réalité naît
 - de l'action coordonnée des périphériques d'entrée
 - transfert de l'action des organes moteurs de l'homme vers la machine
 - et des périphériques de sortie
 - transfert de l'activité de la machine vers les organes sensoriels de l'homme



Rappel : Une définition de la Réalité Virtuelle

- La finalité de la réalité virtuelle et de permettre à une personne (ou plusieurs) une **activité sensorimotrice et cognitive dans un monde artificiel** créé numériquement qui peut être imaginaire symbolique ou une simulation de certains aspects du monde réel
 - [Fuchs 2009]
- La réalité virtuelle est un univers de modèles au sein duquel tout se passe comme si les modèles étaient réels parce qu'il propose simultanément la **triple médiation des sens de l'action et de l'esprit**

Rappels sur la Notion d'immersion

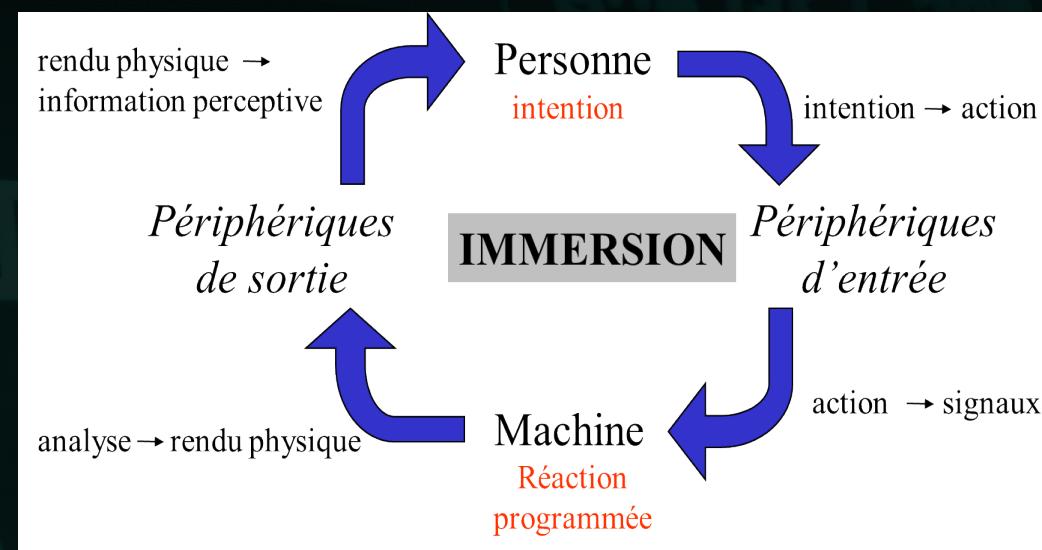
➤ Objectif:

- Recréer les sensations du monde réel dans un monde virtuel à partir des dispositifs dédiés.

➤ Technologies à utiliser (et qui vont être étudiées)

- Vision : Stéréoscopie
- Haptiques : Retour d'effort
- Audio : Son 3D
- Etc.

➤ En reprenant le schéma précédent de la boucle Perception / Action



adapté de [Bowman et al., 2005]

Rappels des facteurs importants

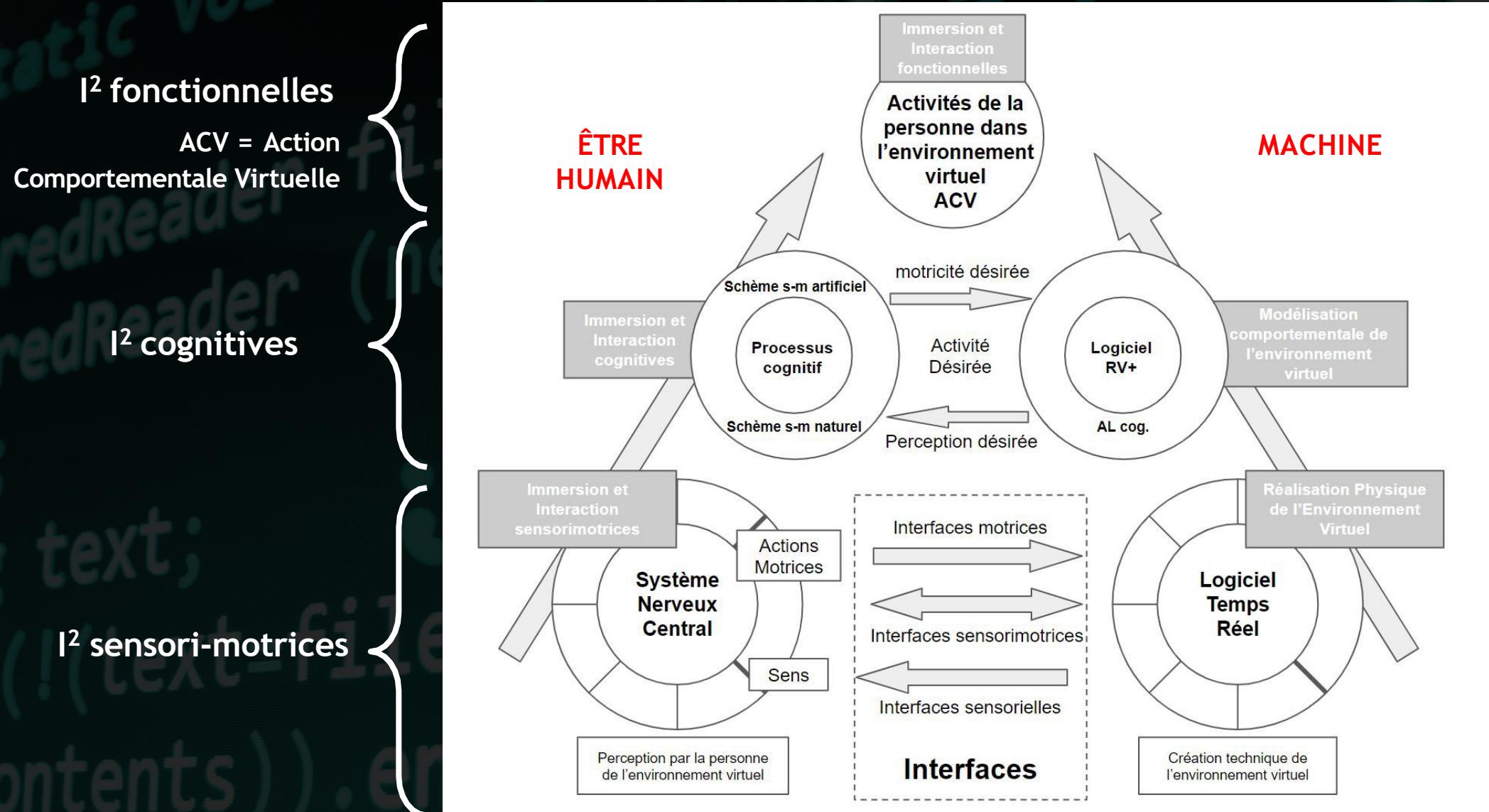
➤ La création d'une méthode d'interaction en RV (I3D) doit tenir compte de tous ces facteurs:

- Besoin d'Immersion
- Besoin de Présence
- Besoin d'Autonomie
- Besoin d'Interaction
 - (Co-)Influence des actions, de la perception et de l'environnement afin de réaliser une tâche en RV/RA le mieux possible.

➤ Important

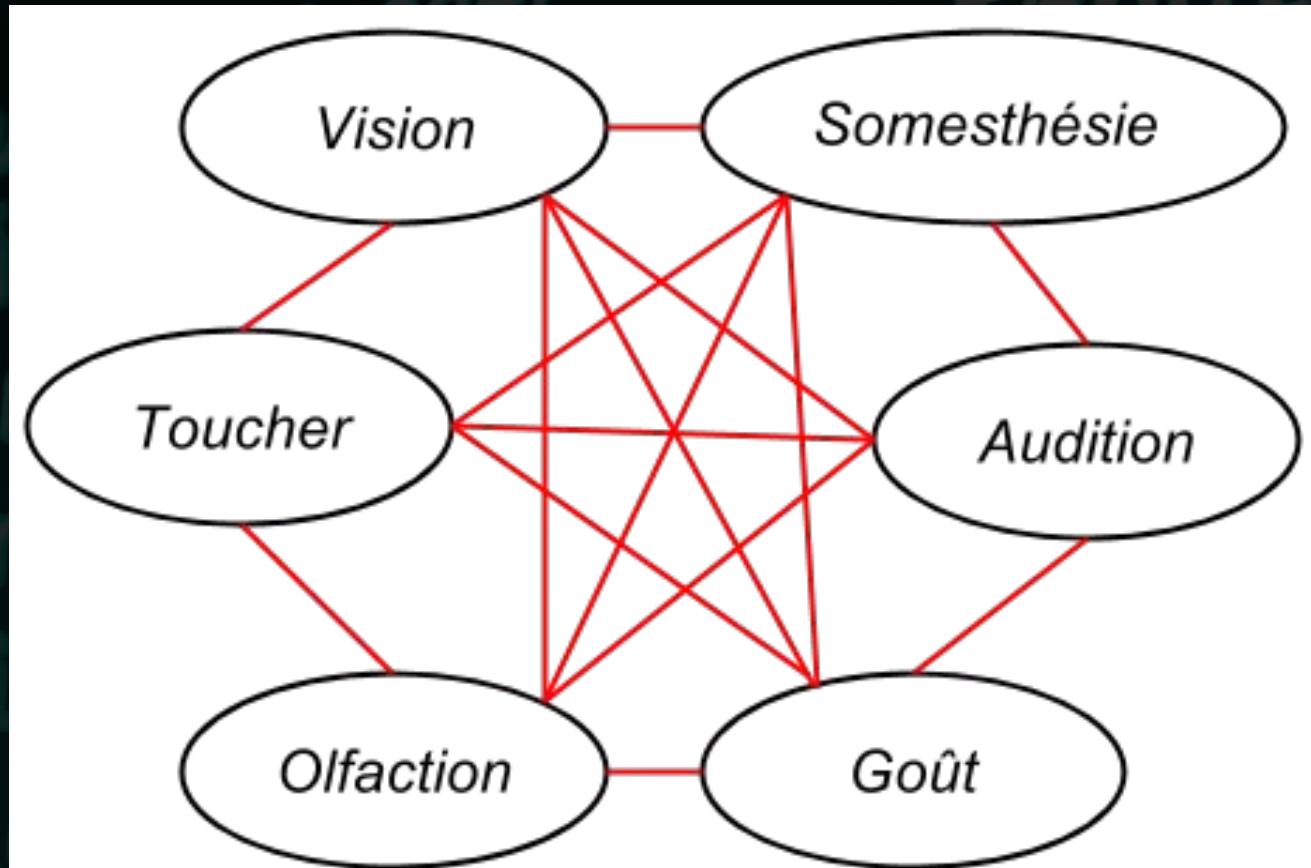
- La personne doit être capable de comprendre intuitivement et d'anticiper l'action qu'elle produit sur le monde virtuel.
- Sinon, problème: la personne n'accepte pas le système.

Modèle théorique des I² (ou I² = Interaction et Immersion)



Le système sensoriel

- Permet d'obtenir des informations de l'environnement



↔ Environnement

Extéroception & Proprioception

➤ Extéroception

- Sens extéroceptifs (“les 5 sens”): vue, ouïe, toucher, odorat, goût
- Vue et ouïe aisément modélisables (phénomènes physiques stimulant à distance)
- Le Toucher est un sens physique de contact → nécessite un équipement ad-hoc
- Les sens “chimiques” difficiles à modéliser

➤ Somesthésie: ensemble de différentes sensations (pression, chaleur, douleur...) qui proviennent de plusieurs régions internes du corps

- Introception (état interne des viscères: cœur, intestin, systèmes respiratoires et génito-urinaires)
- Proprioception: position et mouvements (kinesthésie) du corps par rapport à l'environnement extérieur

Les difficultés en RV

- En RA et RM, l'utilisateur est en immersion extéroceptive, le monde réel est toujours visible, les éléments virtuels sont définis relativement au monde réel
 - → sa proprioception n'est pas impactée
- Par contre en RV, l'environnement étant totalement virtuel, la proprioception peut être **fortement perturbée**

Ordre d'importance

- La vision
 - Notamment la stéréoscopie
- La proprioception
- Les notions de perception et motricité
- Les interfaces comportementales

When you take off your VR
after playing for an hour

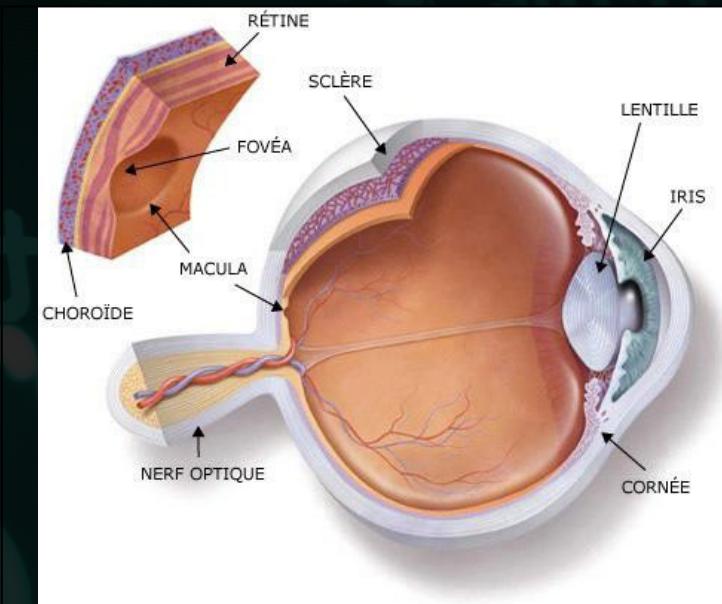
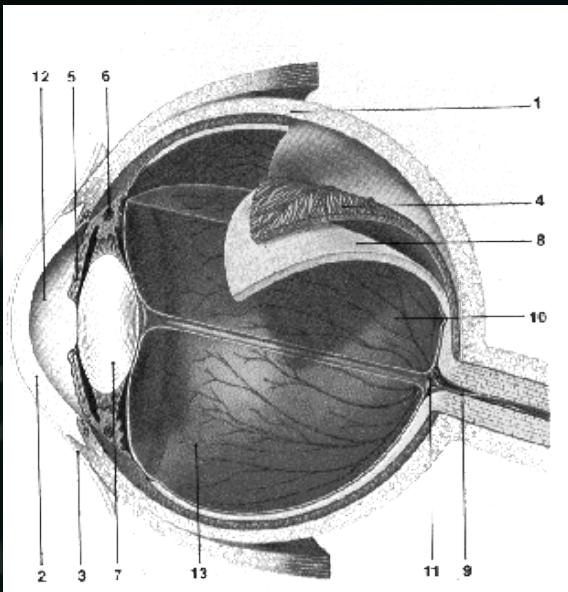


Reality is often disappointing

Comprendre la vision

L'œil humain

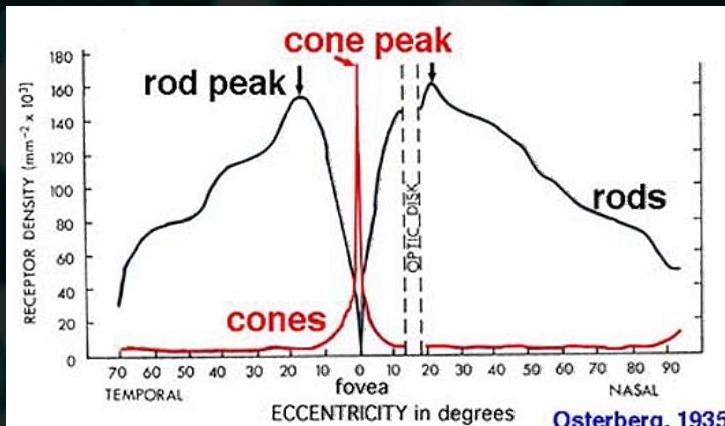
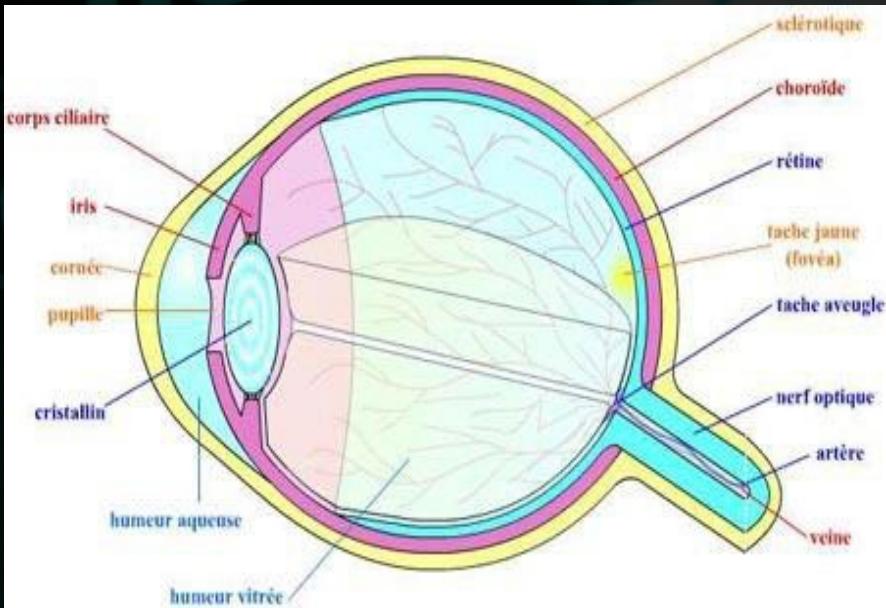
- Canaliser la lumière émise ou réfléchie par un objet pour créer une image nette qui s'imprime sur la rétine (partie de l'œil couverte de récepteurs sensoriels)
- Succession de milieux transparents qui jouent le rôle d'une lentille convergente, dont la focale globale peut varier par modification de la courbure du cristallin



<https://youtu.be/sYLA6U1boF8>

Quelques définitions

- 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 gélantineuse non renouvelée.



Osterberg, 1935

Le système visuel

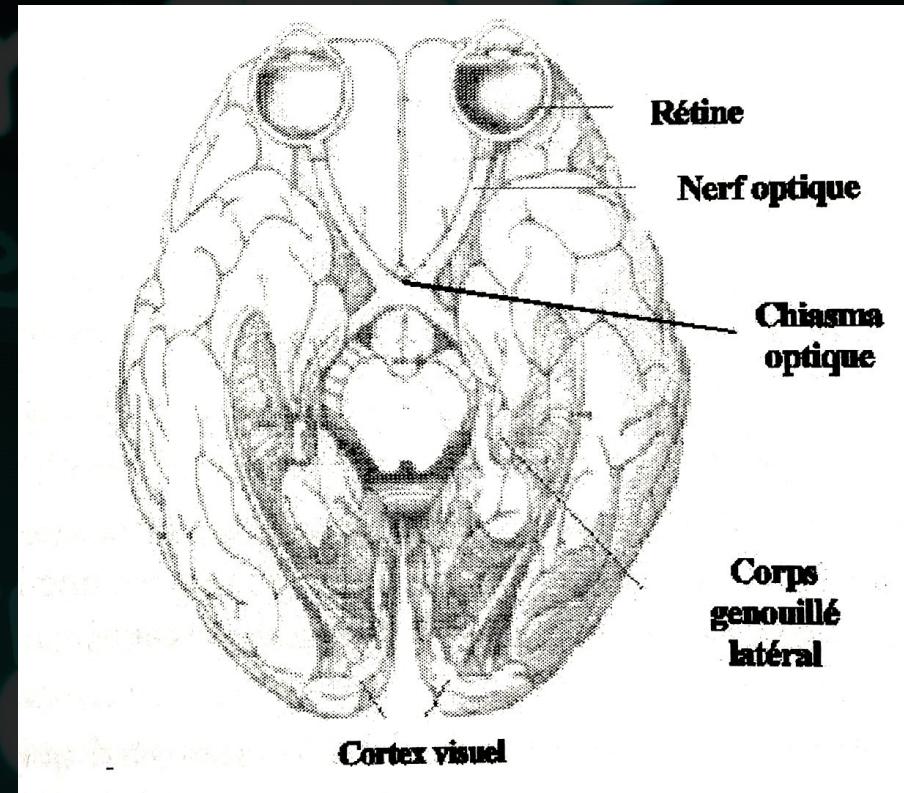
➤ Image nette uniquement au niveau de la Fovéa: 1,5 mm de diamètre, champ visuel de 3 à 5° max

- Les mouvements des yeux, mais surtout de la tête (jusqu'à 800°/s), permettent d'amener et stabiliser l'image d'un objet intéressant sur la fovéa
- Le mouvement de la tête permet de pallier le faible champ de vision des visiocasques

➤ Vision centrale pour la détection des couleurs

➤ La vision périphérique est importante pour la proprioception et l'appréhension des formes, volumes, mouvements et profondeur,

- c'est le point faible des visiocasques actuels
- Champ de vision Meta Quest 3 : 110° horiz. Oeil humain: 180° horiz



<https://youtu.be/bBrxtXwUdUA>

Caractéristiques de la vision

④ Sens complexe et prépondérant

- 70% des récepteurs sensoriels sont dans les yeux

④ Champ visuel - yeux immobiles :

- un humain a un champ de vision horizontal de l'ordre de 180° environ.

↔ • Toutefois, l'œil a, à la base, un champ de vision de 60° du côté nasal et de 90° du côté temporal (soit 150°).

↔ • 45° haut - 70° bas

④ Champ visuel - tête mobile :

↔ • 200° tempe - 130° nez

↔ • 140° haut - 170° bas

④ Acuité visuelle

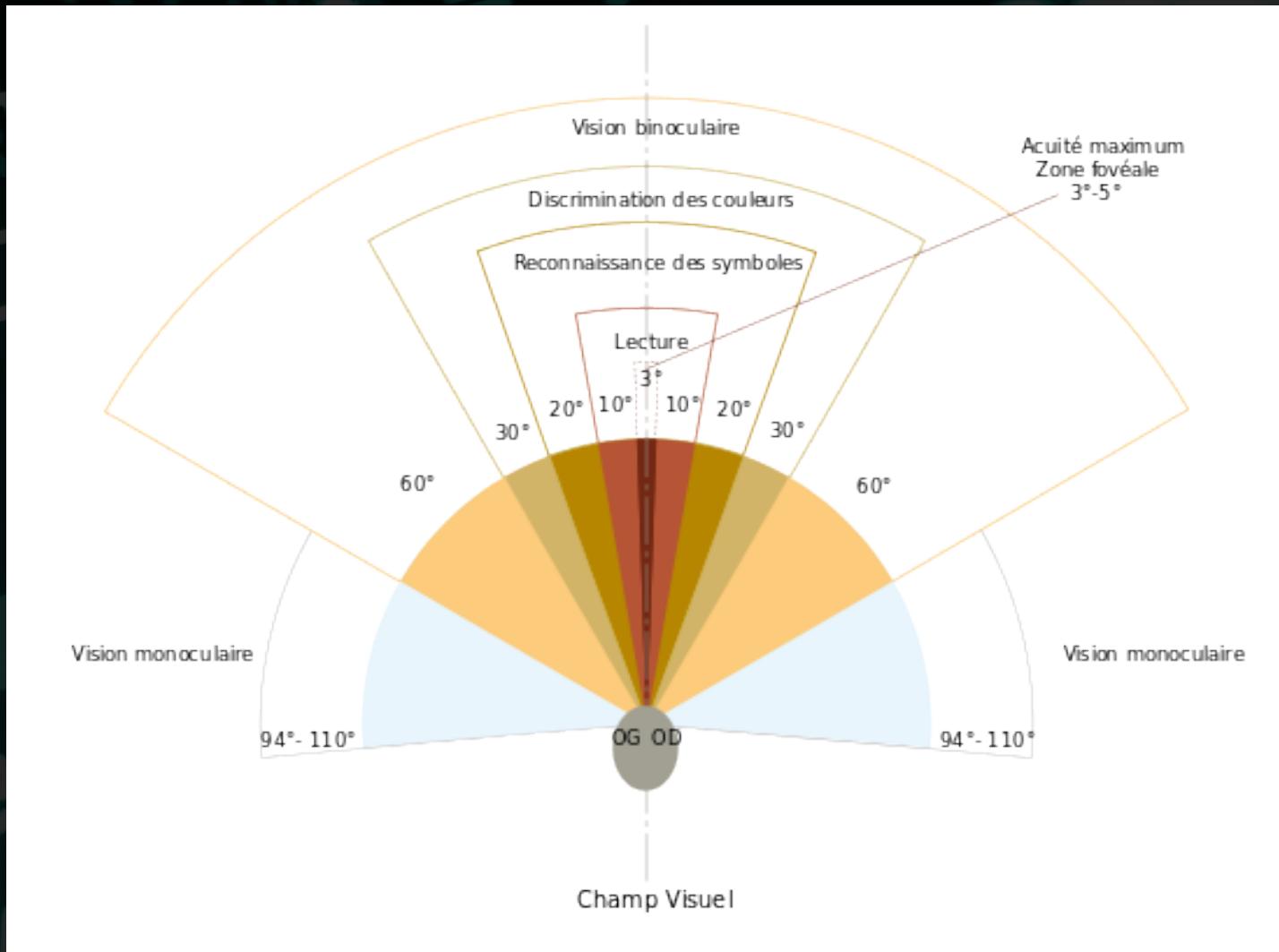
- Fente éclairée sur fond noir : 30'' d'arc
- 2 points clairs sur fond noir : 1' d'arc
- 2 points noirs sur fond clair : 2' d'arc

④ Couleurs

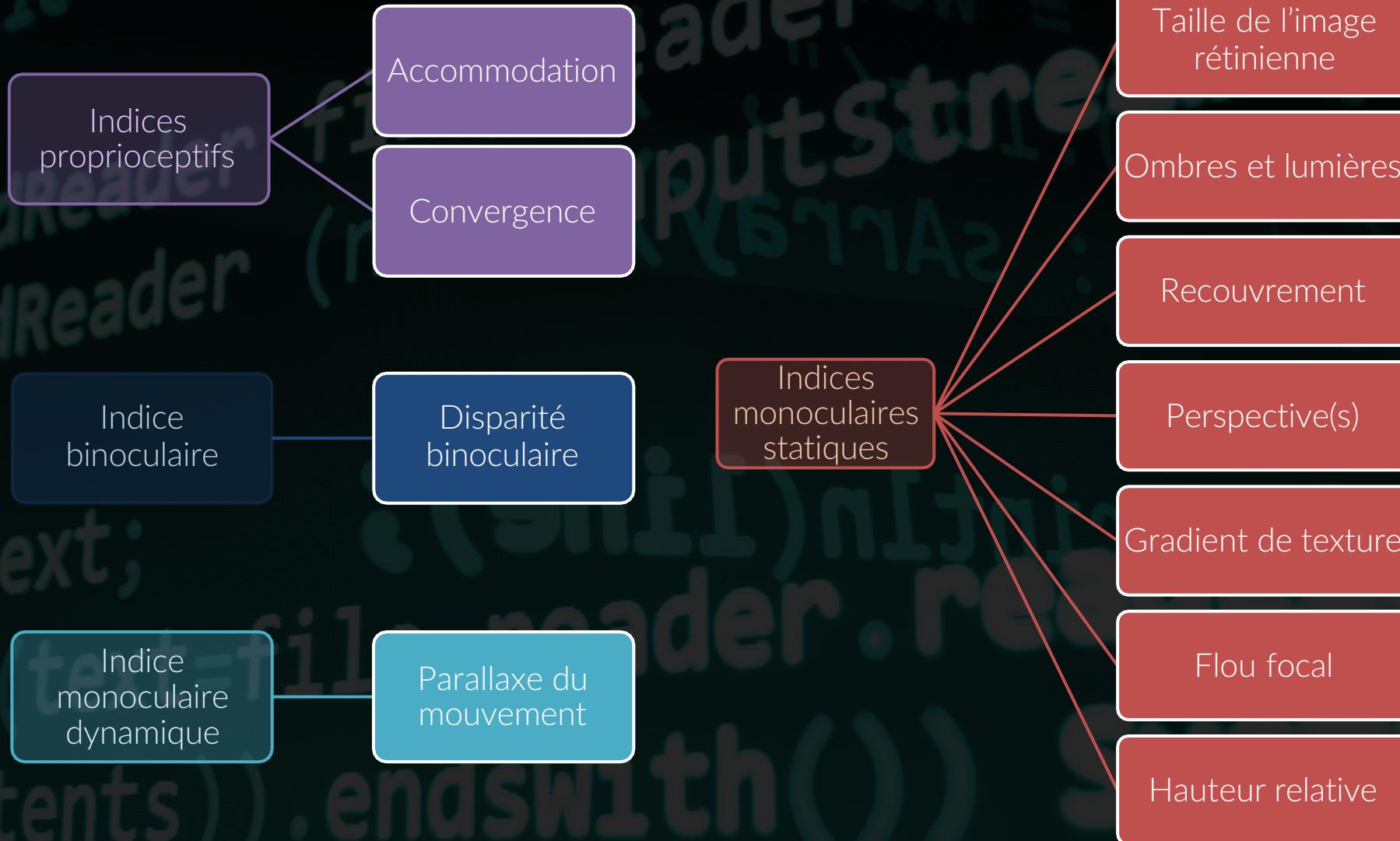
- Entre 2 et 8 millions

④ Persistance rétinienne

- 1/30ème à 1/50ème de seconde

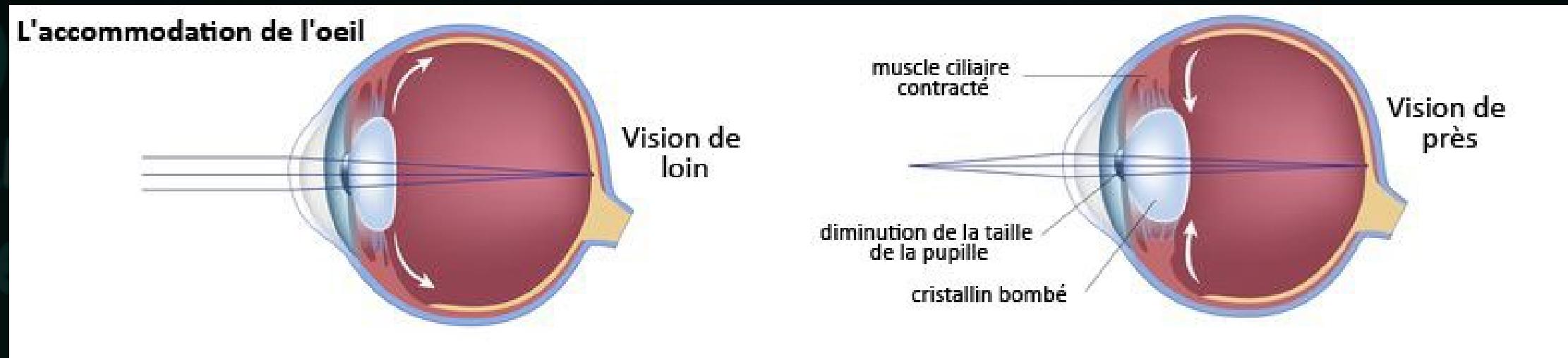


Perception de la profondeur



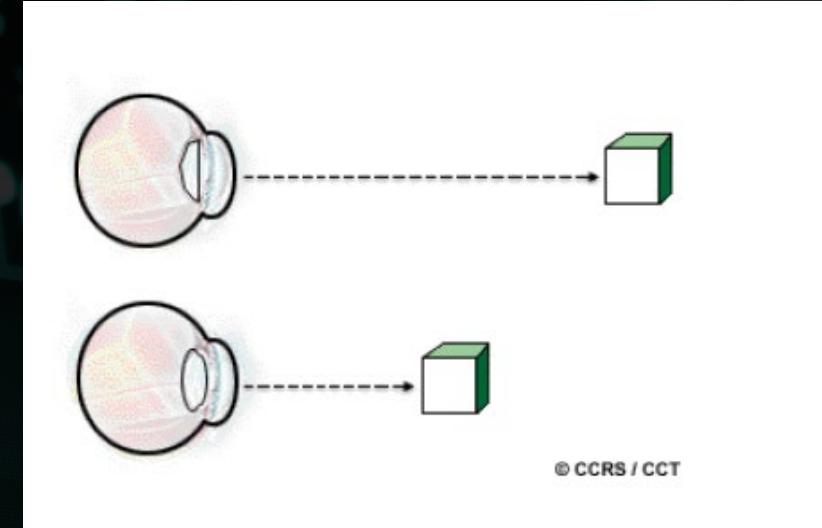
Indices proprioceptifs

- Indices retournés par les muscles oculomoteurs et le cristallin sans prendre en compte les images projetées sur les rétines
- Accommodation et convergence sont fortement couplés et fiables à faible distance (< 0,5 m)

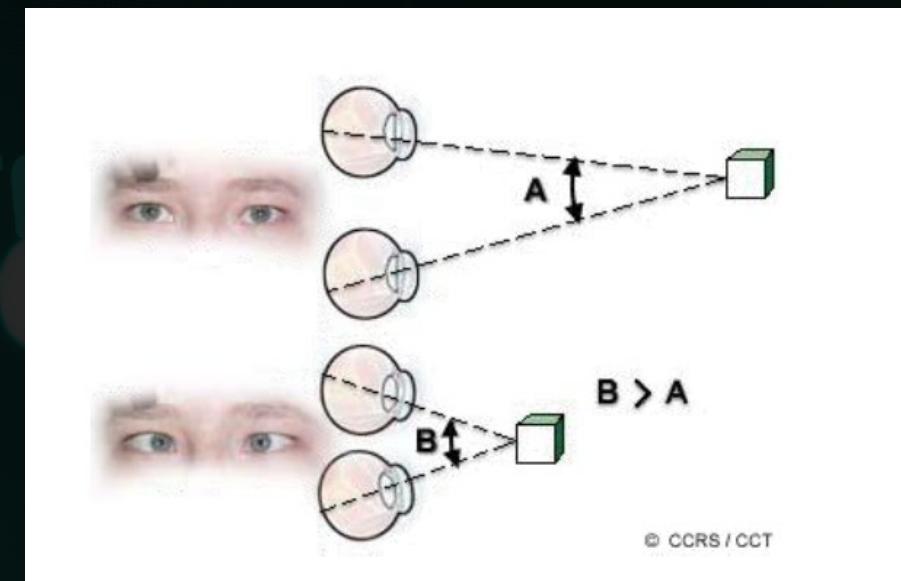


Accommodation et vergence

- Accommodation: déformation du cristallin pour faire converger les rayons lumineux issu d'un même point de l'espace sur un point de la rétine
 - 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



- Vergence: changement d'orientation des globes oculaires pour les faire converger vers le point de l'espace observé.
 - Angle parallactique 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 parallactique diminue et la perception de profondeur devient de plus en plus difficile.



Indices monoculaires

- Perceptibles avec 1 seul œil
- Qualitatifs : permettent de positionner les objets d'une même scène les uns par rapport aux autres
- Sont de 2 types
 - Indices dynamiques
 - Accessibles sur une séquence temporelle d'images
 - Indices statiques
 - Accessibles sur une image fixe

Parallaxe de mouvement

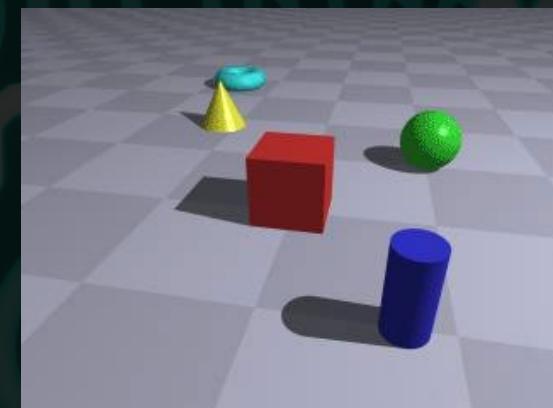
Indice monoculaire dynamique

➤ 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

Indices monoculaires statiques

- 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

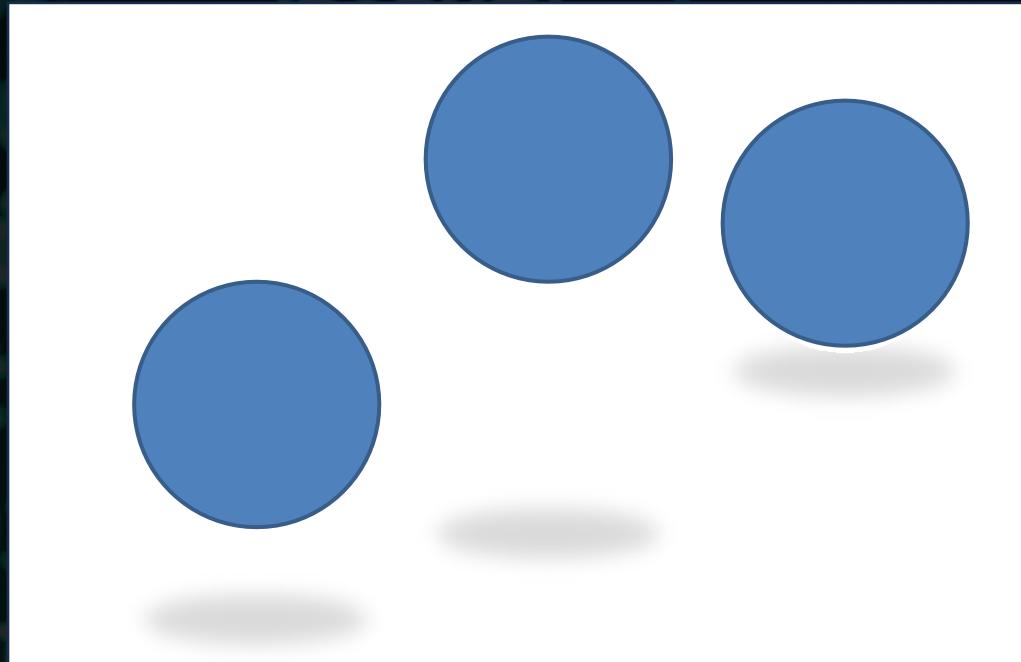


Ombres et lumières

Indices monoculaires statiques

➤ 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



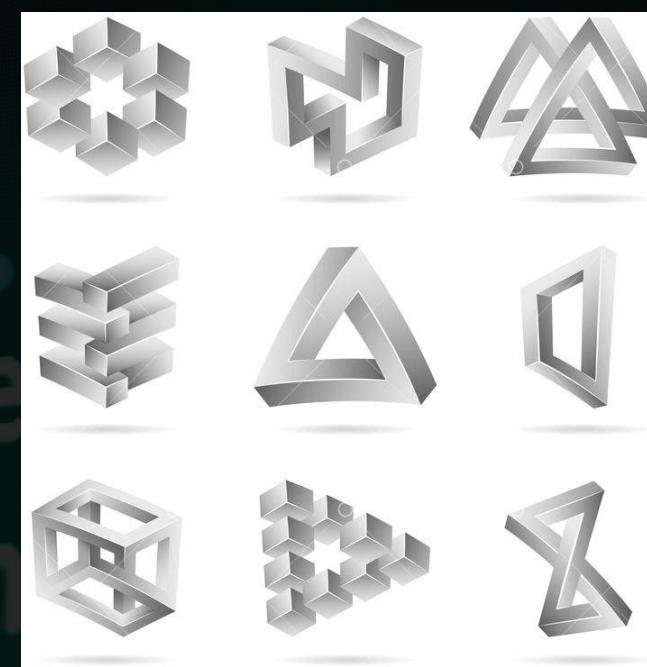
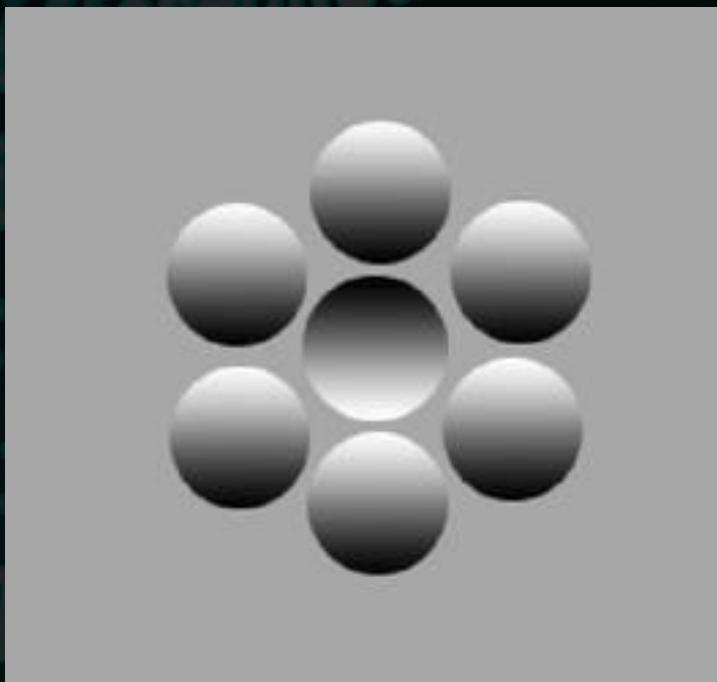
Ombres et lumières

Indices monoculaires statiques

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

- Meilleure perception de la forme

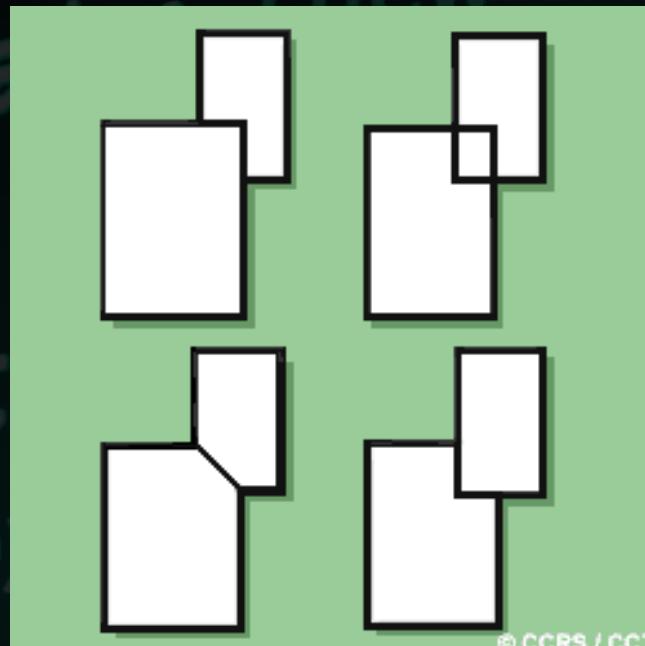
- Impression de convexité ou de concavité due au fait que la majeure partie de l'éclairage provient du haut



Recouvrement

Indices monoculaires statiques

- 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)

Indices monoculaires statiques

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



Perspective linéaire (ou conique)

Indices monoculaires statiques

➤ Utilisée par la vision naturelle

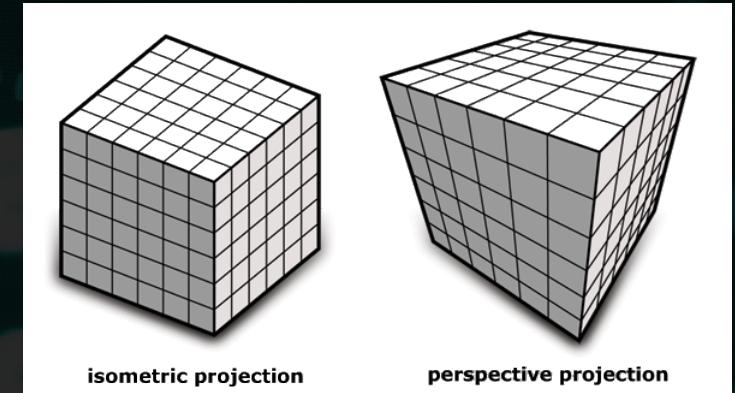
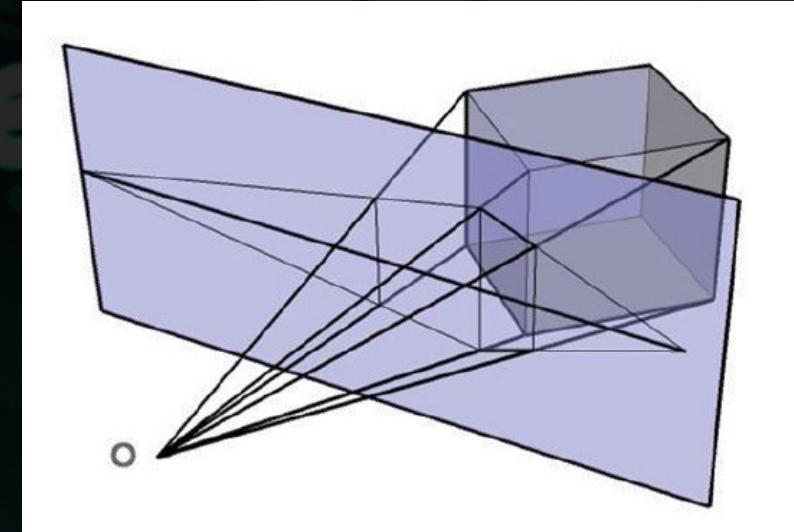
- Projection selon un faisceau de droites passant par un même point (l'observateur) sur la surface d'affichage

➤ 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



Perspective linéaire (ou conique)

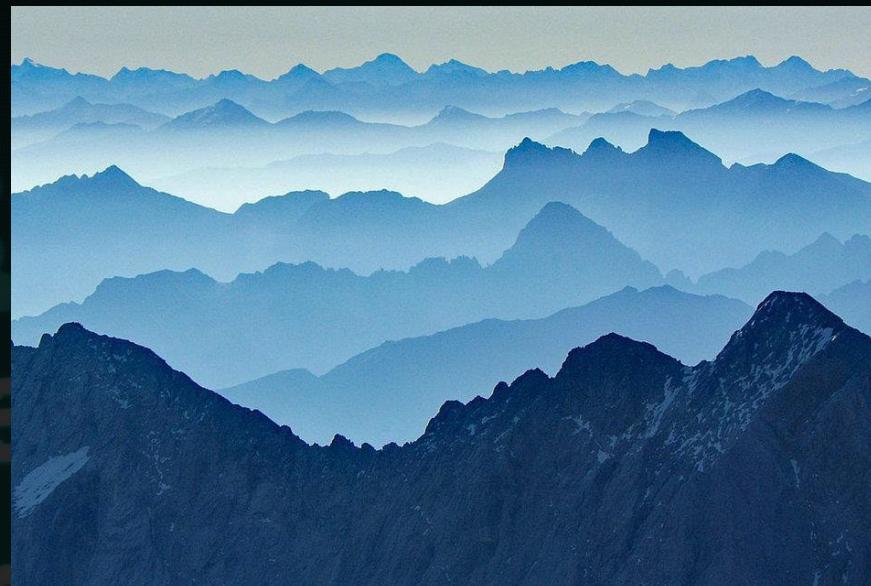
Indices monoculaires statiques



Perspective aérienne

Indices monoculaires statiques

- Variation de visibilité selon la distance (diffusion atmosphérique)



Copyright 2000 Gilles Tran

Gradient de texture

Indices monoculaires statiques

- 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

Indices monoculaires statiques

- 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.



Fiabilité selon la distance

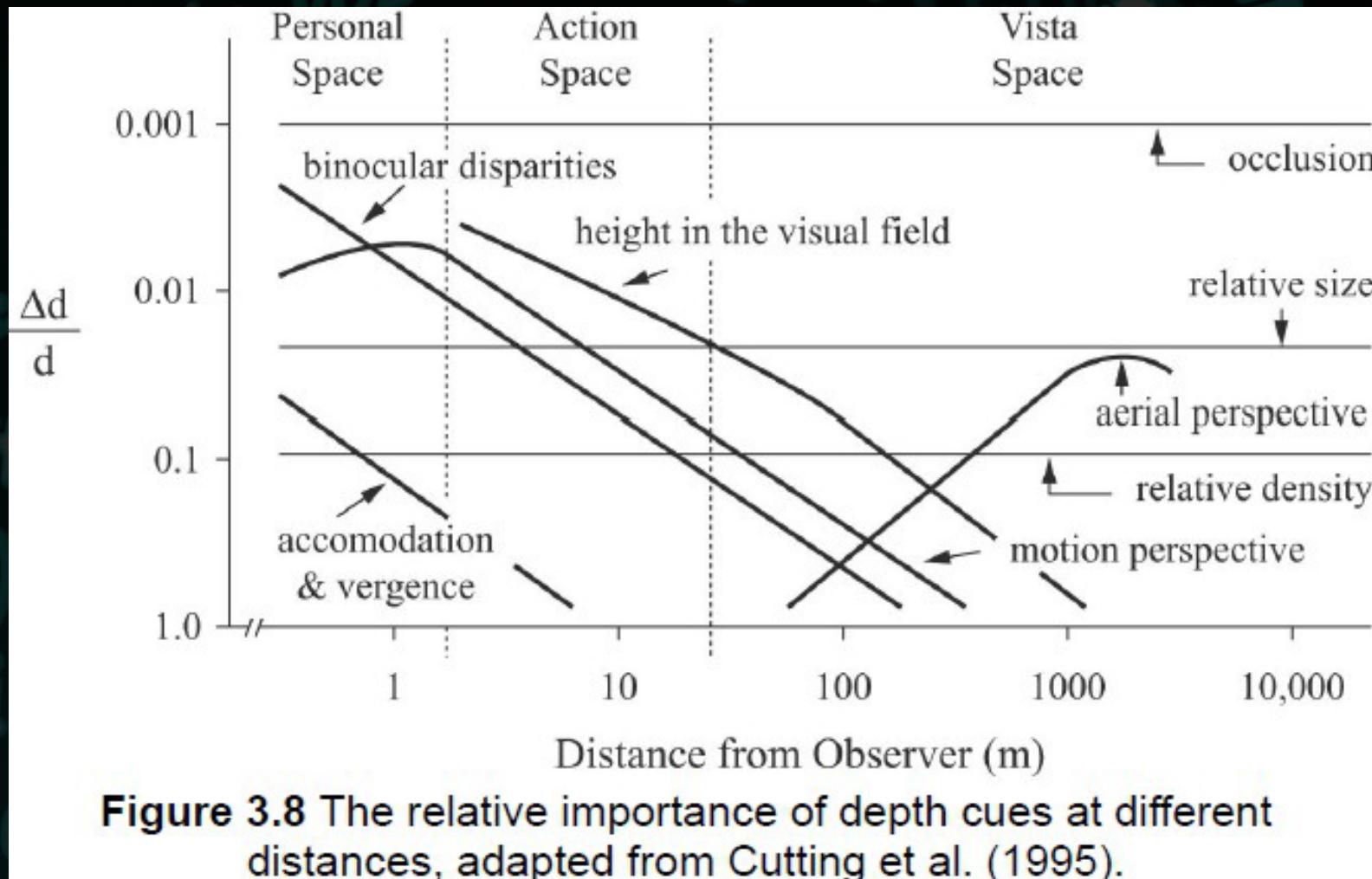


Figure 3.8 The relative importance of depth cues at different distances, adapted from Cutting et al. (1995).

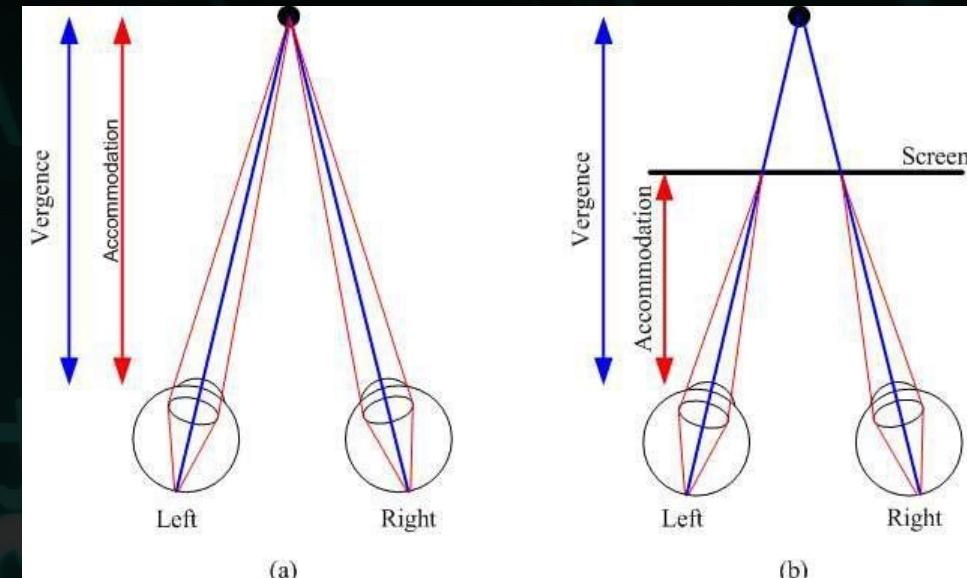
Source: J. J. Laviola, E. Kruifff, R. P. McMahan, D. A. Bowman, and I. Poupyrev, *3D User Interfaces, Theory and Practice* (2nd edition). Addison-Wesley, 2017.



La Stéréoscopie en VR

Relation avec les casques de RV

- Actions involontaires, sauf lors du louchement
- L'accommodation entraîne la vergence, et réciproquement (n'est pas inné chez l'Homme).
- La vision stéréoscopique au travers d'un visiocasque perturbe la relation accommodation-vergence (réflexe oculomoteur) et entraîne
 - Incohérence sensorimotrice
 - fatigue



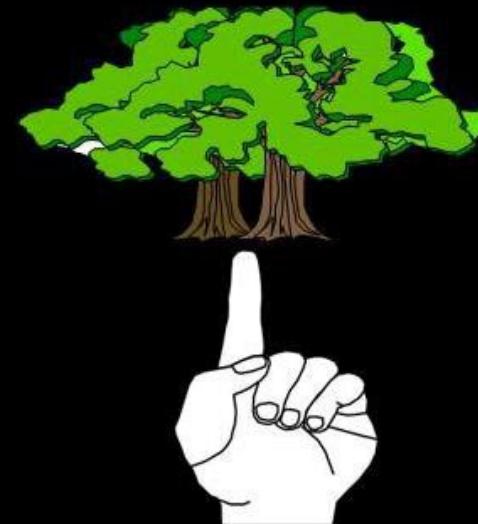
Principe général de la stéréoscopie

➤ Accommodation

- Point de fixation proche
- Point de fixation lointain

➤ Je **FIXE** mon doigt proche de mes yeux tout en regardant un arbre lointain

➤ Je **FIXE** un arbre lointain tout en regardant mon doigt proche de mes yeux



Point de fixation
sur le doigt



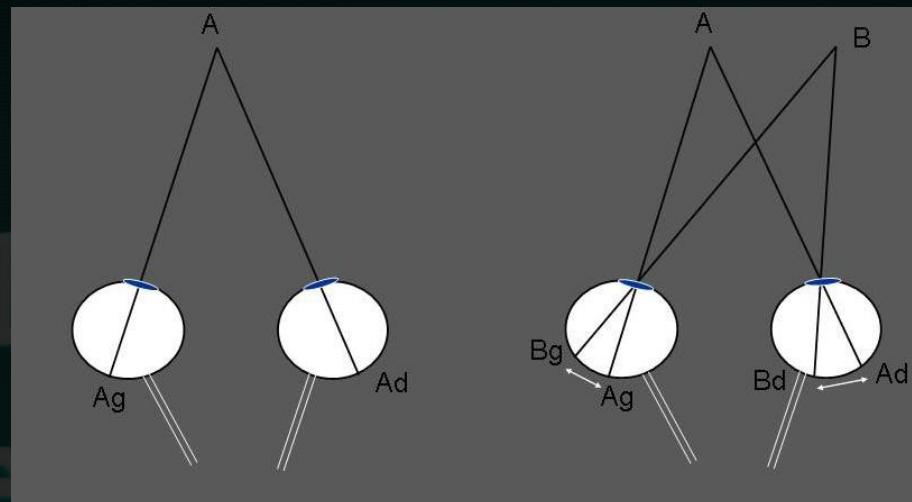
Point de fixation
sur l'arbre

Stéréoscopie - Principe général

➤ Disparité rétinienne

- Les deux yeux perçoivent des scènes légèrement décalées horizontalement (dû à l'écart inter-pupillaire)

➤ La perception de la profondeur à partir de la disparité rétinienne et de l'accommodation s'appelle la stéréoscopie



Vision stéréoscopique

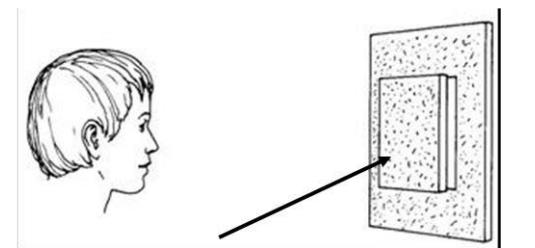
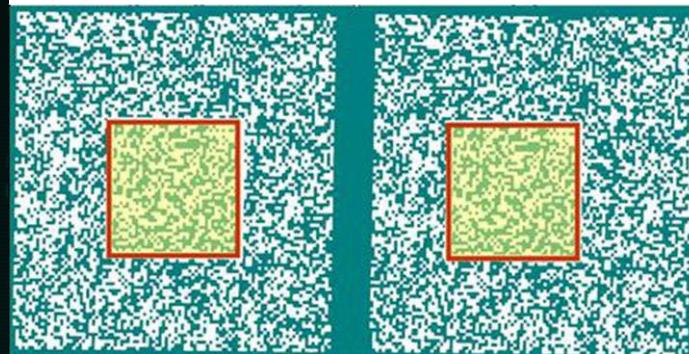
- Disparité (ou parallaxe) binoculaire entre les images droite et gauche d'un même objet formées sur chaque rétine
- Indicateur le plus important pour la vision sur des distances moyennes
- Quantitatifs : permettent une évaluation métrique de la distance entre les objets
- Inconvénient en RV : contraintes techniques et fatigue oculaire



PASSAGE DU RÉEL AU VIRTUEL

- La stéréoscopie est issue d'un processus neurologique autonome.
- La construction d'une image en relief n'est pas liée à la perception d'un contenu signifiant en monoculaire
 - Exemple de stéréogrammes :
<http://lectorinfabulas.canalblog.com/archives/2008/11/17/11400806.html>

[Julesz, 1971]: Possibilité de perception du relief sans Information monoculaire.



Impression de profondeur

Étapes de création d'une image stéréoscopique grâce à l'ordinateur

➤Création de 2 images,

- une pour le point de vue de l'œil gauche,
- l'autre pour le point de vue de l'œil droit, légèrement décalées
- (restitution de l'écart inter-pupillaire)

➤Mécanisme permettant que

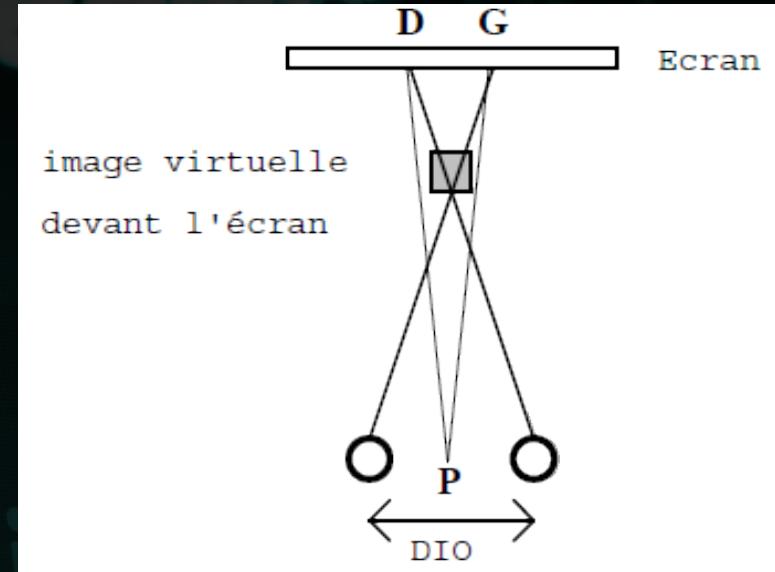
- l'image pour l'œil gauche ne soit perçue que par l'œil gauche
- l'image pour l'œil droit ne soit perçue que par l'œil droit.

➤Grâce au mécanisme d'accommodation des yeux de la personne, vision d'une seule image avec de la profondeur.



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



Calcul du point image

➤ Modélisation

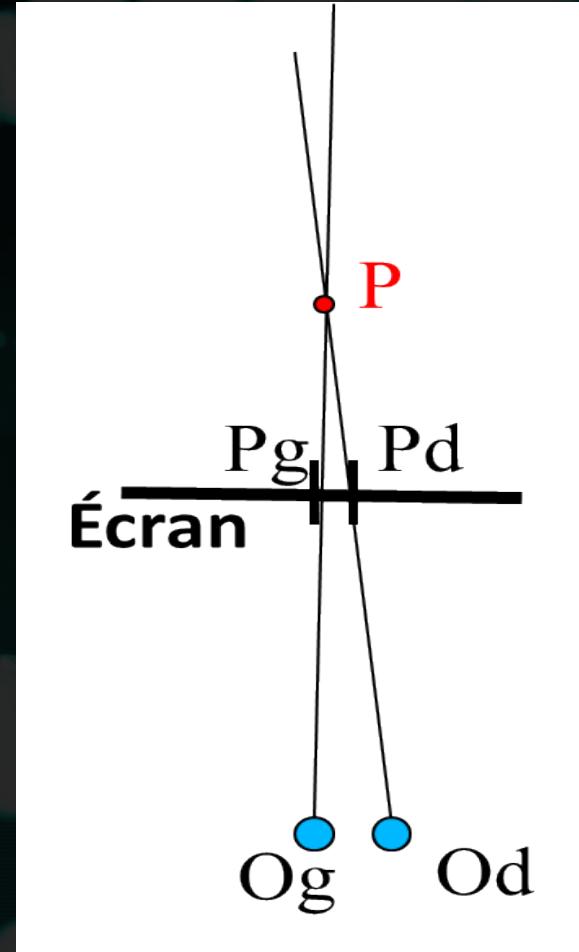
- On assimile l'image pour l'œil gauche à un point ponctuel P_g et l'image pour l'œil droit à un point ponctuel P_d , sur l'écran.
- On assimile l'œil gauche de la personne regardant l'écran à O_g et l'œil droit de la personne regardant l'écran à O_d

➤ Si on trouve un mécanisme pour que

- O_g ne perçoive que P_g
- O_d ne perçoive que P_d (étape 2),

➤ Alors le point Image P perçu après accommodation (étape 3) se trouve à l'intersection entre

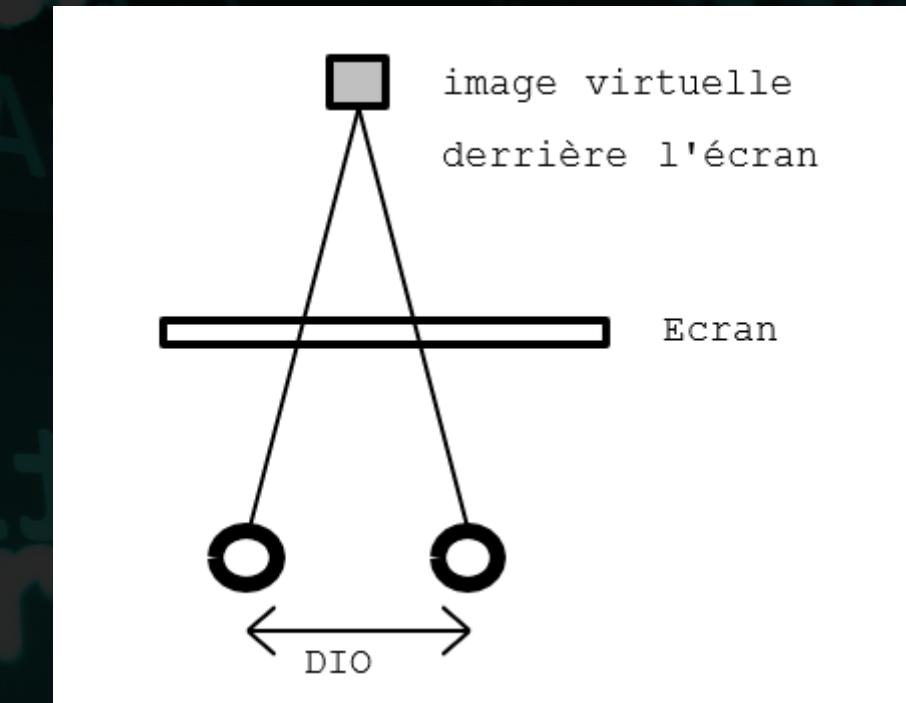
- la demi-droite $O_g P_g$
- la demi-droite $O_d P_d$



Parallaxe stéréoscopique

- La Parallaxe stéréoscopique dépend de la distance entre l'objet virtuel et l'écran

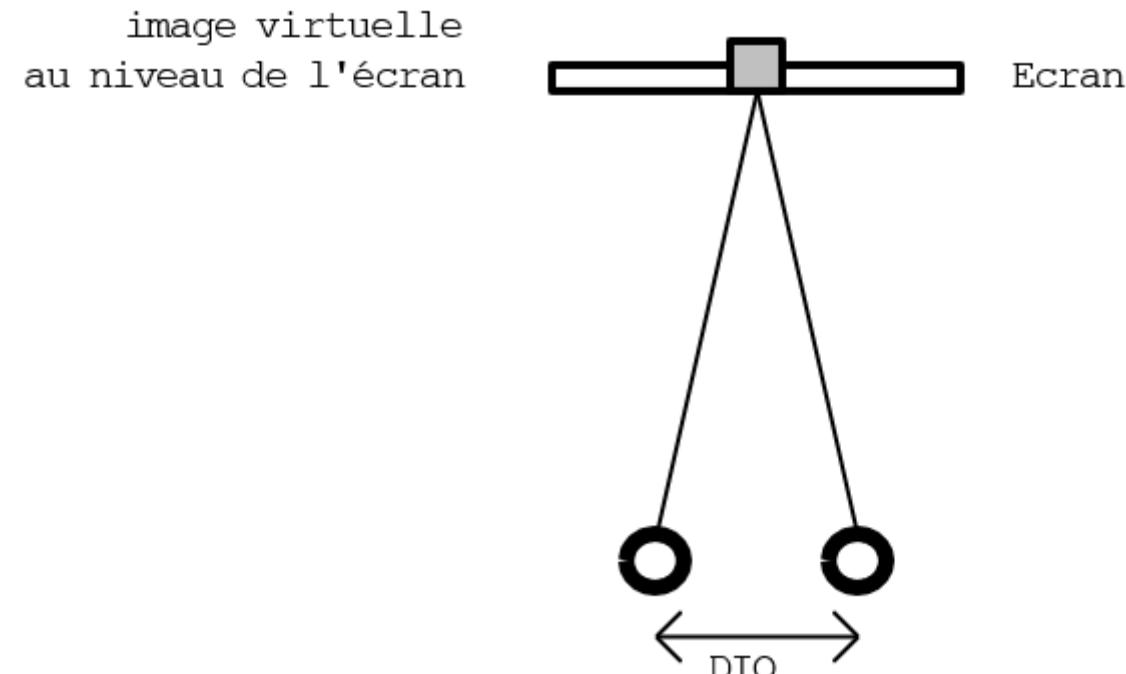
- Lorsqu'elle est positive
 - P est perçu derrière l'écran.
 - Points homologues D et G affichés à D et à G



Parallaxe stéréoscopique

➤ Lorsqu'elle est Nulle

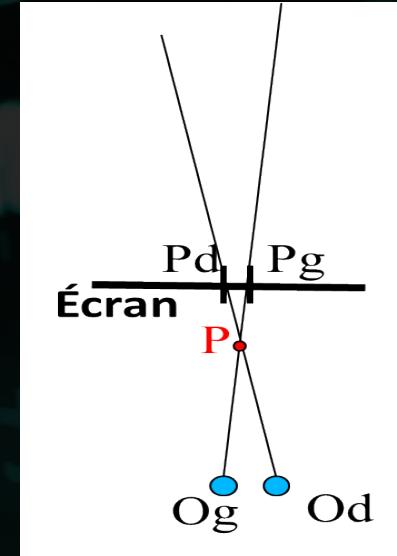
- Objet au niveau de l'écran
- Points homologues affichés au même endroit



Parallaxe stéréoscopique négative

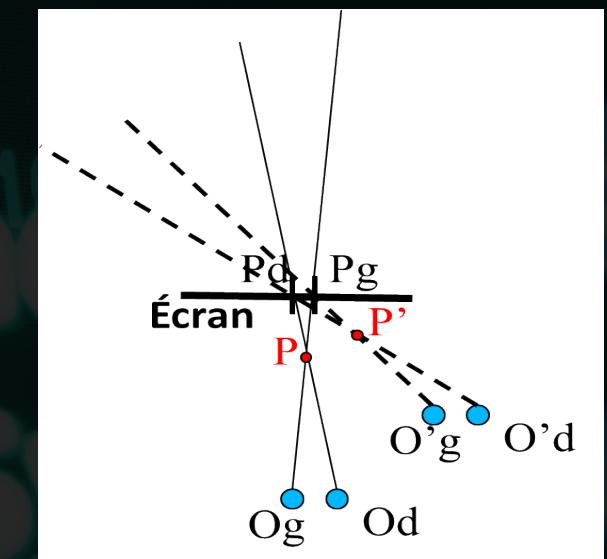
➤ Négative

- Objet devant l'écran
- Points homologues D et G affichés à G et à D



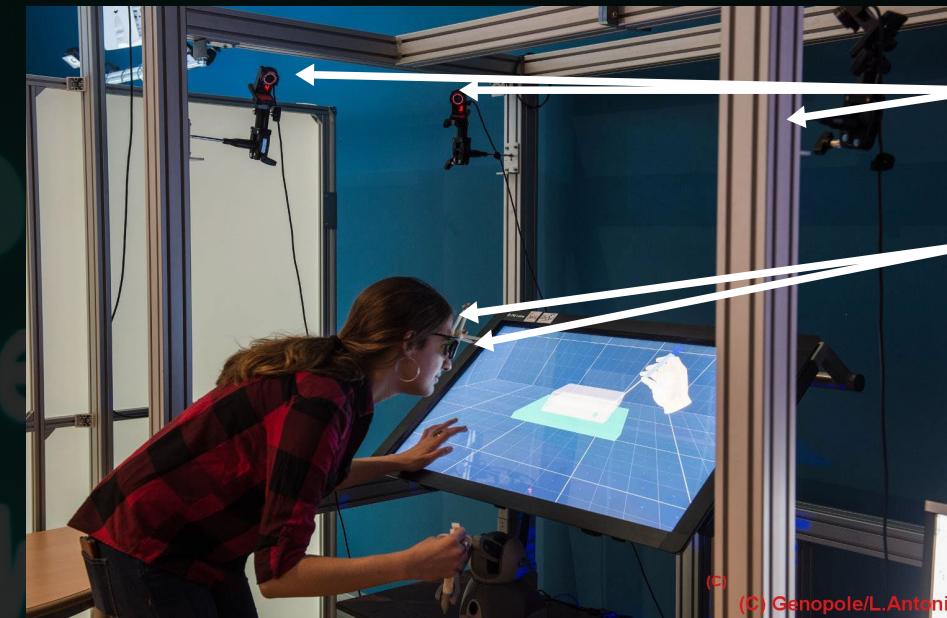
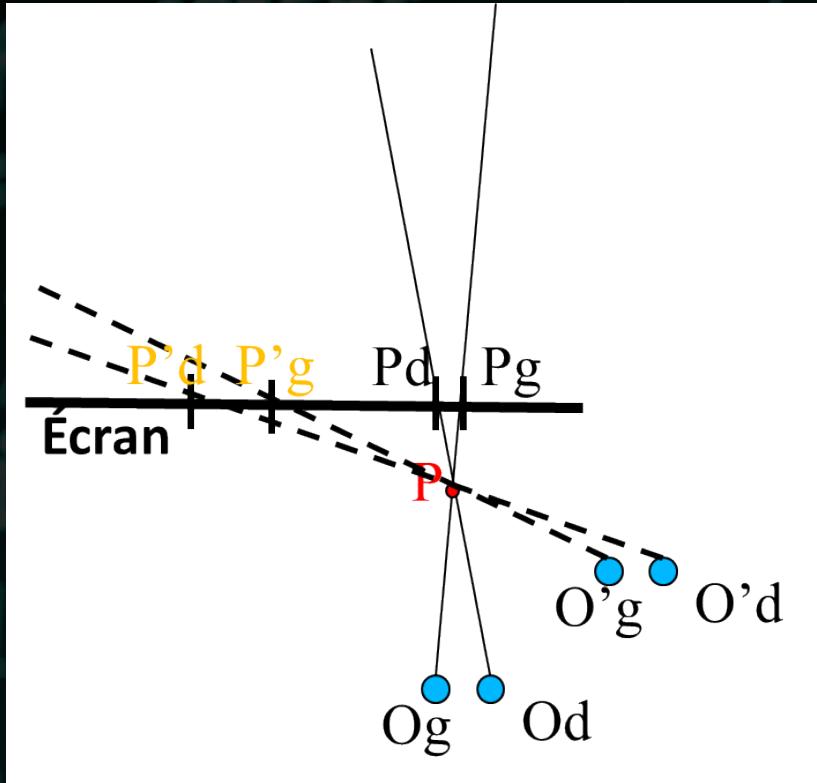
➤ Et si la personne bouge devant l'écran ?

- P bouge aussi



Problèmes et solution

- Pourtant, P doit rester immobile, donc ...
 - Pg et Pd doivent bouger lorsque la personne bouge !



Caméras IR

Lunettes 3d munies de boîtes réfléchissantes

[[Video](#)]

Contraintes stéréoscopiques

- Perturber le moins possible la relation entre convergence et accommodation
- Il faut donc créer des images en relief avec un faible parallaxe tout en gardant un effet de profondeur
- Il faut également positionner l'objet principal observé proche du plan de l'écran

Techniques de séparation

➤ Au niveau de l'écran

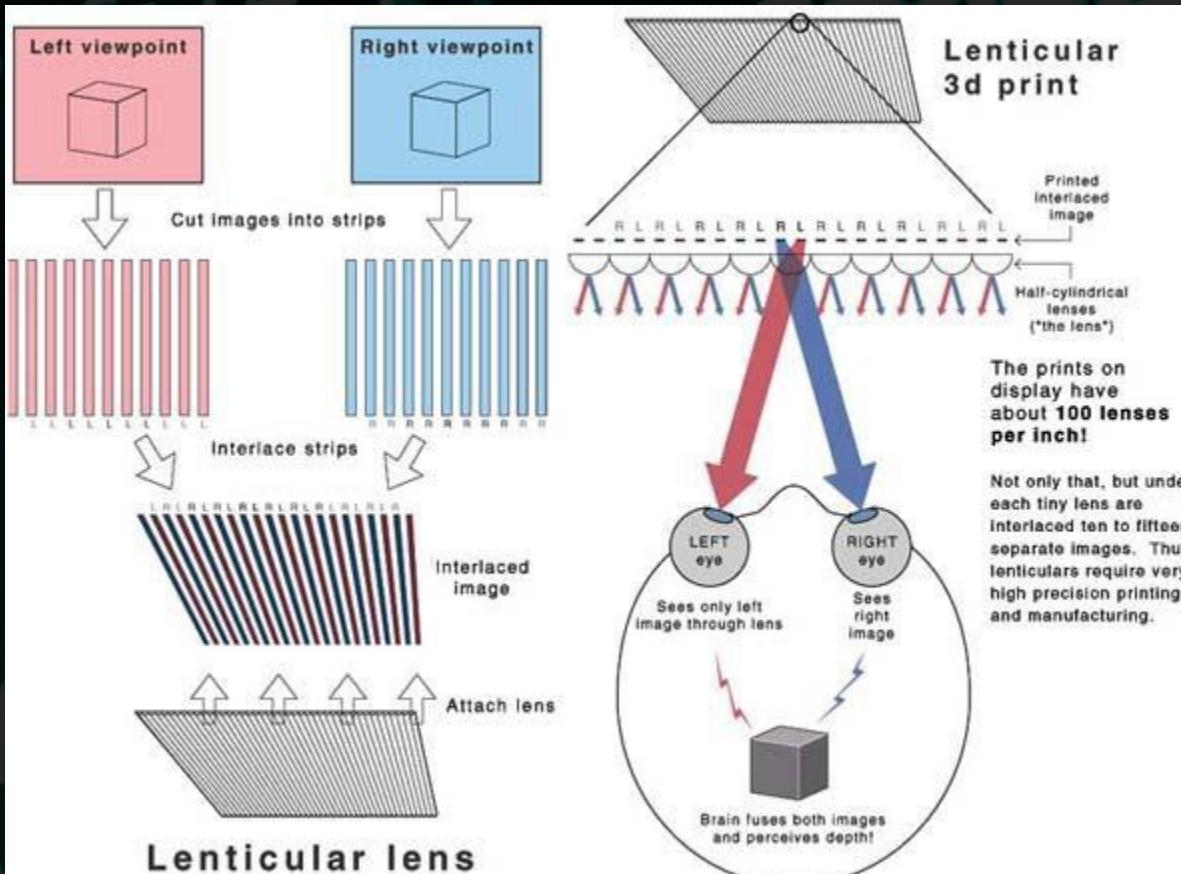
➤ Au niveau de l'observateur

- Séparation passive
 - Différenciation colorimétrique
 - Polarisation
- Séparation active

➤ Casques

Séparation au niveau de l'écran

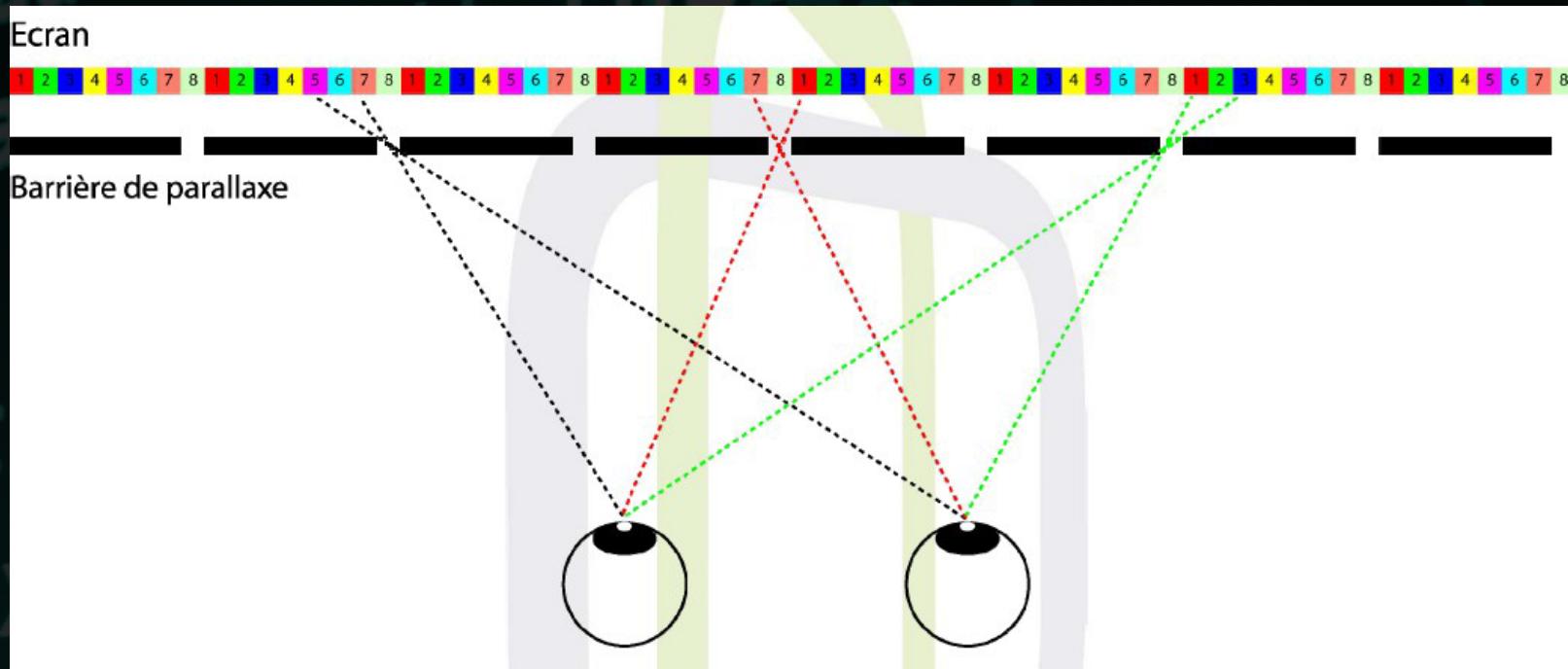
- ## ► Ecran auto-stéréoscopique à réseau lenticulaire



[Vidéo 1]

Séparation au niveau de l'écran

- Ecran auto-stéréoscopique à barrière de parallaxe
 - Technologie utilisée par la Nintendo 3DS



https://youtu.be/Wyed_5bBvfY

Séparation au niveau de l'écran

- Ecran auto-stéréoscopique à illumination

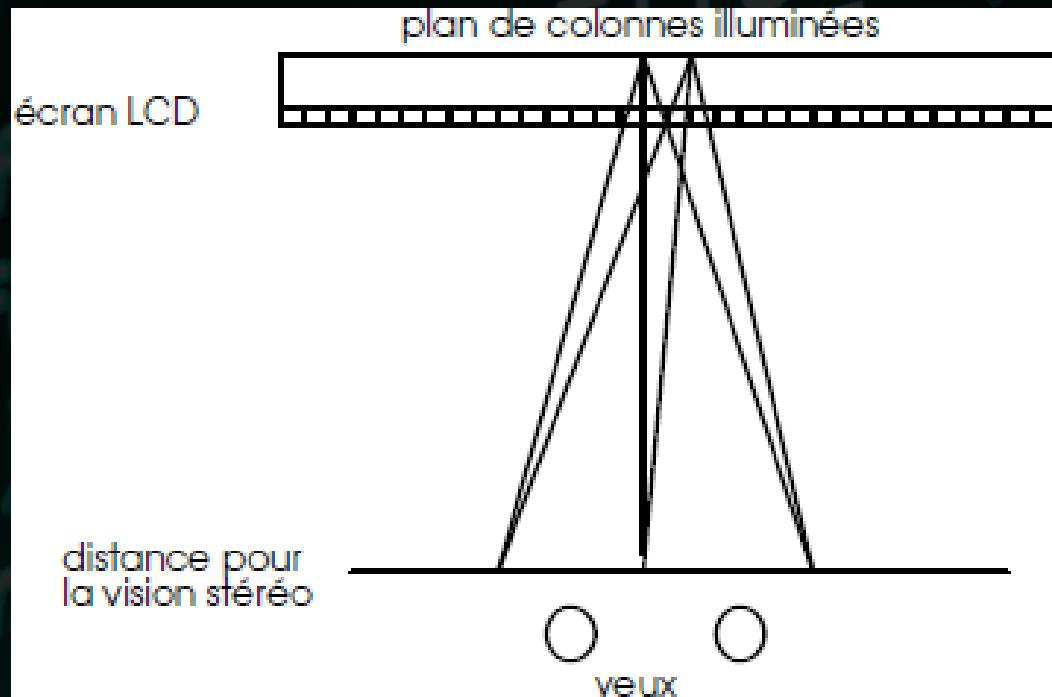
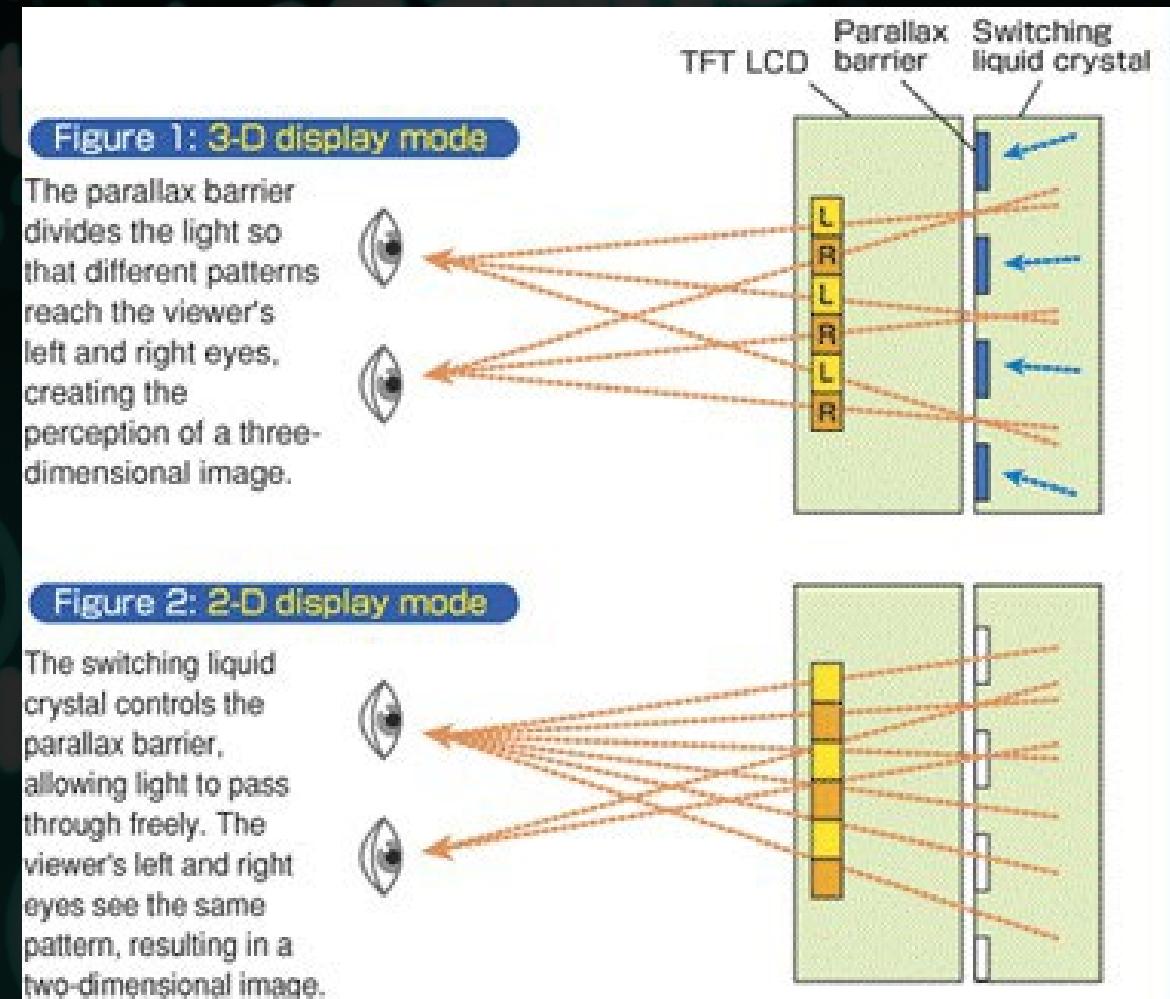


Figure 1: 3-D display mode

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

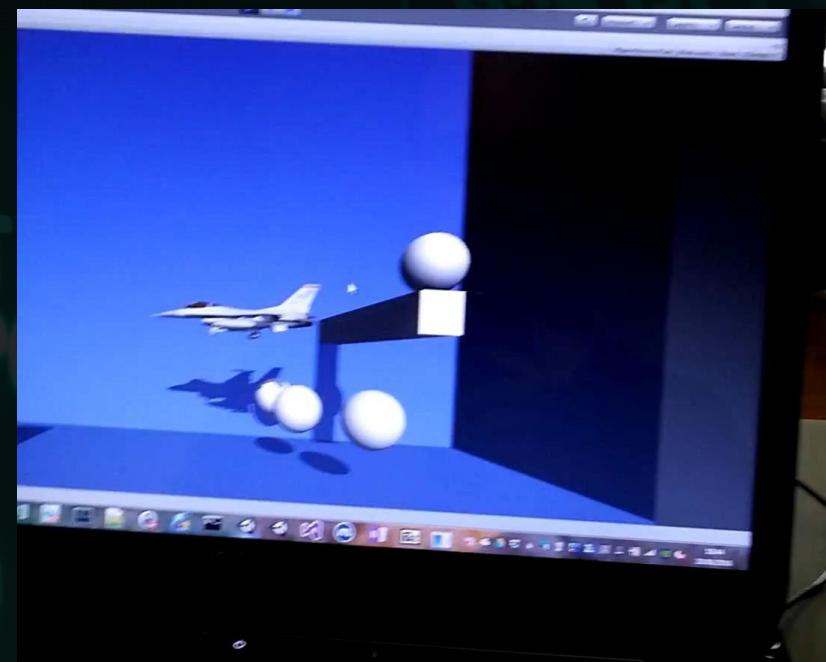
The switching liquid crystal controls the parallax barrier, allowing light to pass through freely. The viewer's left and right eyes see the same pattern, resulting in a two-dimensional image.



Perspective et mouvement

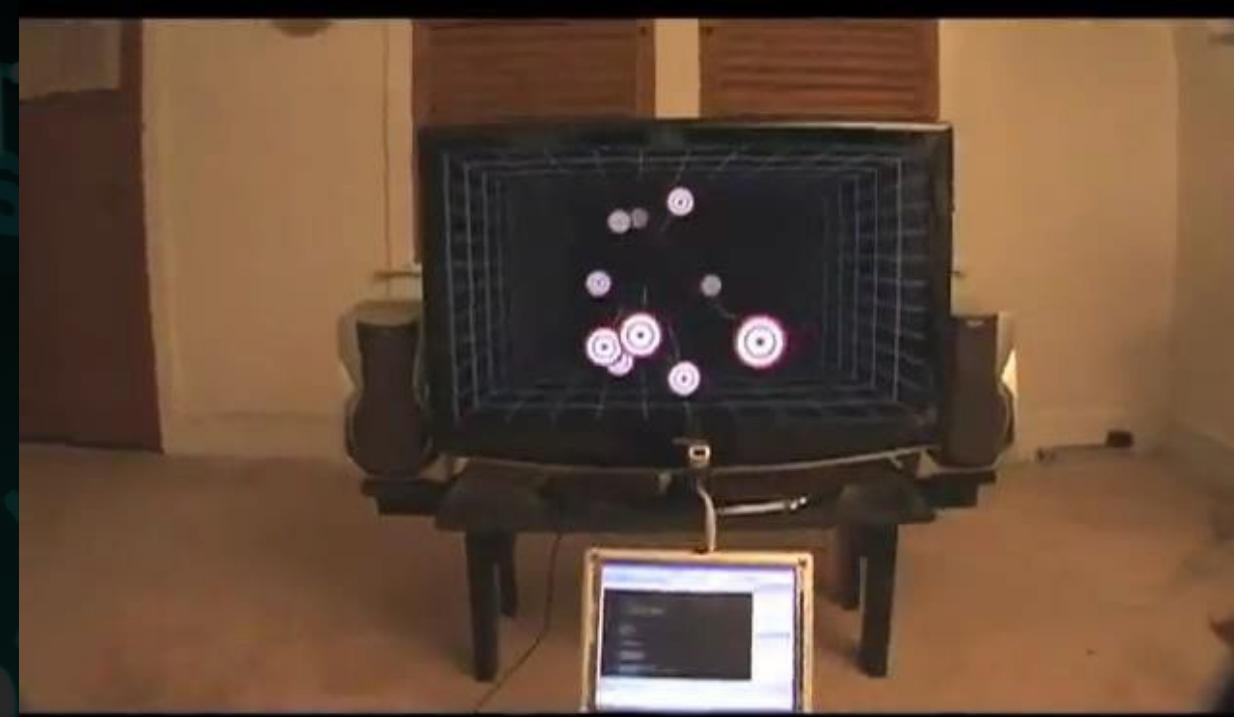
➤ Tenir compte du point de vue

- Head-tracking



Impression de 3D par suivi de point de vue

- Système de tracking de la personne, basé sur Wimote (John Lee, 2007)
- Le mouvement de la personne devant l'écran fait ressortir la profondeur des objets virtuels
 - 3D from Motion.
 - Fonctionne très bien car les objets sont très texturisés.



VR Display (with head tracking)

[Video](#)

Impression de 3D par suivi de point de vue

- Système de tracking de la personne, basé sur une Kinect + une TV 3D
- Le mouvement de la personne devant l'écran fait ressortir la profondeur des objets virtuels
 - 3D from Motion.
 - Fonctionne moins bien que l'exemple précédent car les objets sont moins texturés.



[\[Vidéo\]](#)



Quelques dispositifs

Séparation au niveau de l'observateur : anaglyphe (passive)

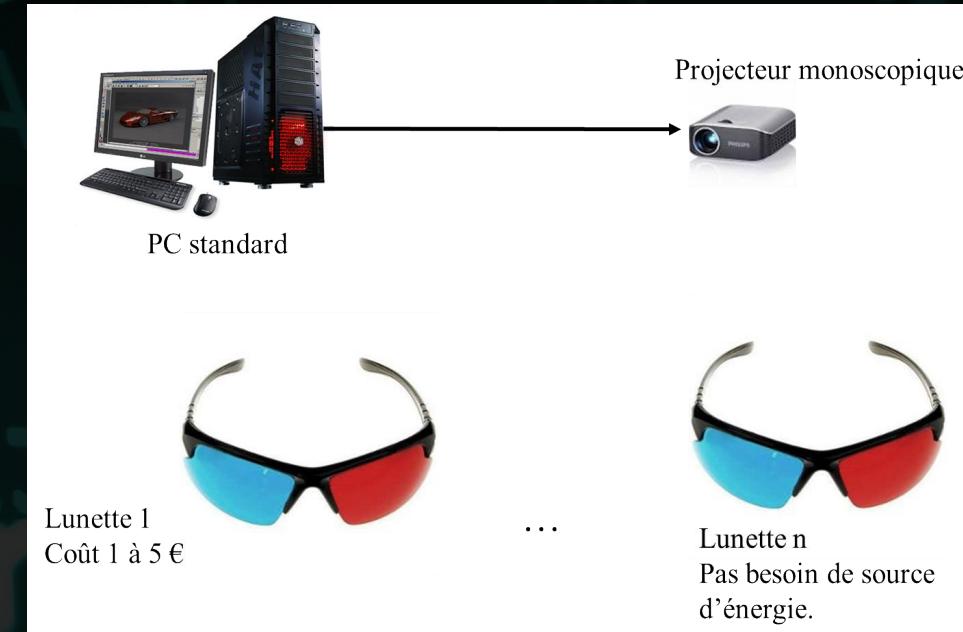
➤ Séparation par différenciation colorimétrique

- Procédé "anaglyphe"
- Format 3D à 60 Hz

➤ Affichage

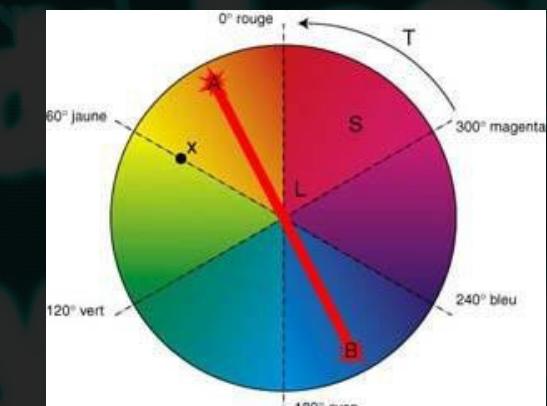
- Les deux types d'images (pour l'oeil gauche et Droit) sont **projétées en même temps.**
 - Des images uniques pour chaque oeil.
 - Images colorisées en rouge pour l'oeil gauche
 - Images colorisées en cyan pour l'oeil droit

➤ Pas de source d'énergie



Principe de visualisation stéréoscopique par anaglyphe

- Utilisation de **deux couleurs complémentaires** (ici rouge et cyan=vert+bleu).
- Deux images légèrement décalées.
 - Séparation : lunettes équipées de 2 filtres colorés
 - Le filtre rouge de la lunette gauche permet de filtrer les images destinées à l'oeil gauche
 - Le filtre cyan (vert+bleu) permet de filtrer les images destinées à l'oeil droit
 - Donc, en théorie, l'oeil gauche ne perçoit que l'image pour l'oeil gauche et l'oeil droit ne perçoit que l'image pour l'oeil droit
- Faible coût
- Mais Interdit certaines couleurs dans l'image



Séparation au niveau de l'observateur: polarisation (passive)

➤ Utilisation de deux filtres complémentaires

- les polarisations des deux filtres sont mutuellement exclusives
- Dans ce cas, si on met les deux filtres l'un après l'autre, la lumière ne passe pas: c'est noir (voir photo ci-contre)
- => lunettes équipées des filtres droit et gauche correspondants



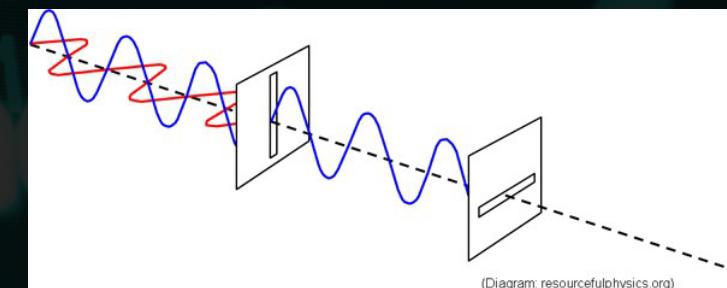
and the left picture only with the left eye.

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

- Simultanément (2 projecteurs)
- Multiplexage temporel (1 projecteur, 1 image sur 2)
- Multiplexage spatial (1 projecteur, 1 ligne sur 2 pour chaque image)

➤ Le filtre polarisé horizontalement de la lunette gauche

- permet de filtrer les images du projecteur dont le filtre est identique
- ne laisse pas passer la lumière de l'autre projecteur avec filtre complémentaire.



Dispositifs de visualisation stéréoscopique passive polarisation

➤ Format 3D à 60 Hz

➤ Les deux types d'images (pour l'œil gauche et l'œil droit) sont projetées en même temps.

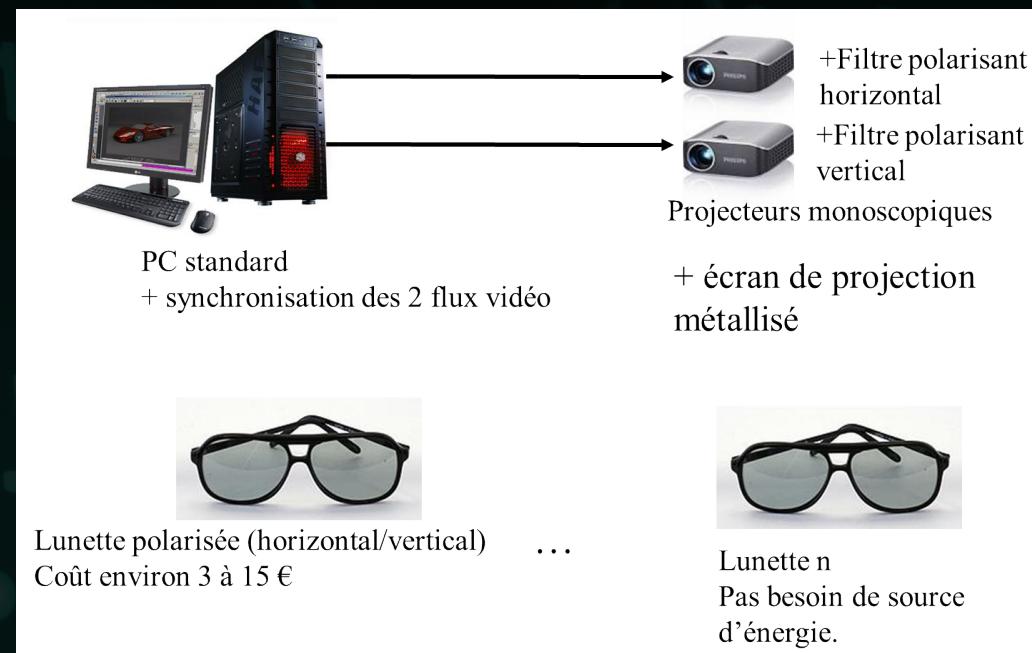
- Des images uniques pour chaque œil.

➤ Verre de Lunette

- droit: filtre polarisé verticalement
- gauche: filtre polarisé horizontalement

➤ Pro & cons

- + Pas de source d'énergie pour les lunettes
- + Peut regarder hors de l'écran
- - Risque de chevauchement des images (fantômes)
- - Ne peut pas pencher la tête en polarisation h/v



Séparation **active** au niveau de l'observateur

➤ À l'instant t:

- L'ordinateur envoie l'image gauche au projecteur et un signal à l'émetteur pour obturer l'œil droit des lunettes (cristaux liquides)
- Les lunettes reçoivent l'information et l'interprètent via un circuit électrique interne et une source d'énergie.

➤ À l'instant $t+1/2$:

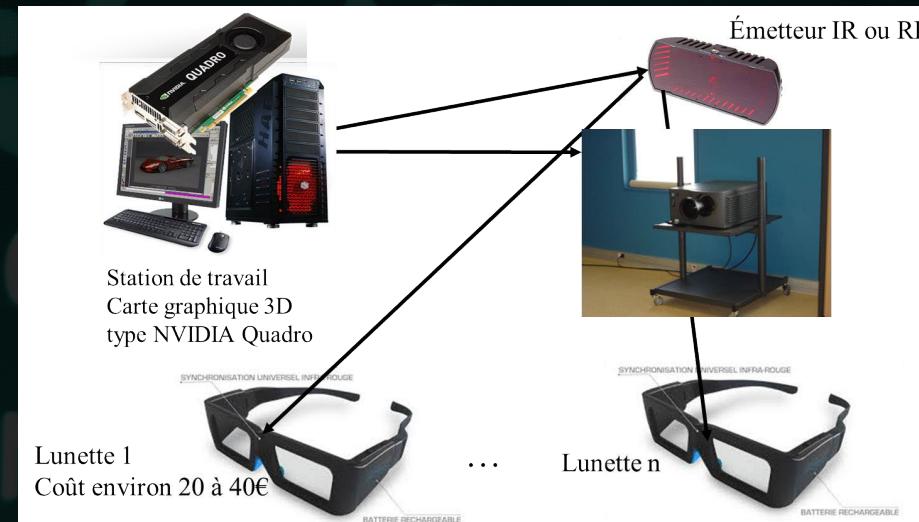
- L'ordinateur envoie l'image droite au projecteur et un signal à l'émetteur pour obturer l'œil gauche des lunettes (cristaux liquides).

➤ À chaque instant, le cerveau ne perçoit qu'une image pour chaque œil.

- Grâce à l'accommodation et au fait que les deux images sont légèrement décalées, les deux images se transforment en une image avec la profondeur (stéréoscopie)

Dispositifs de la visualisation par stéréoscopique actif

- Format 3D à 120 Hz (60 Hz pour chaque œil)
- Les lunettes sont munies d'une source d'énergie
 - Elles sont pilotées par le PC, via l'émetteur
 - Composées de 2 écrans à cristaux liquides, elles possèdent un système permettant d'obturer alternativement (60 ou 50 fois par seconde) la lunette gauche ou la lunette droite
- Synchronisation : généralement par liaison infrarouge
- Risque de chevauchement des images (fantômes)



Dispositif CAVE

- CAVE : (Cave Automatic Virtual Environment)
 - Système immersif : la personne est entourée par l'environnement virtuel.
 - Plusieurs écrans de projection
 - Vision stéréoscopique
 - La personne est en immersion et voit son propre corps.
 - Selon le système une ou plusieurs personnes peuvent partager naturellement le même environnement virtuel et collaborer.
- [\[Vidéo\]](#)



[Vidéo \(ancienne\)](#)

Casque de Réalité Virtuelle

➤ Dispositif immersif

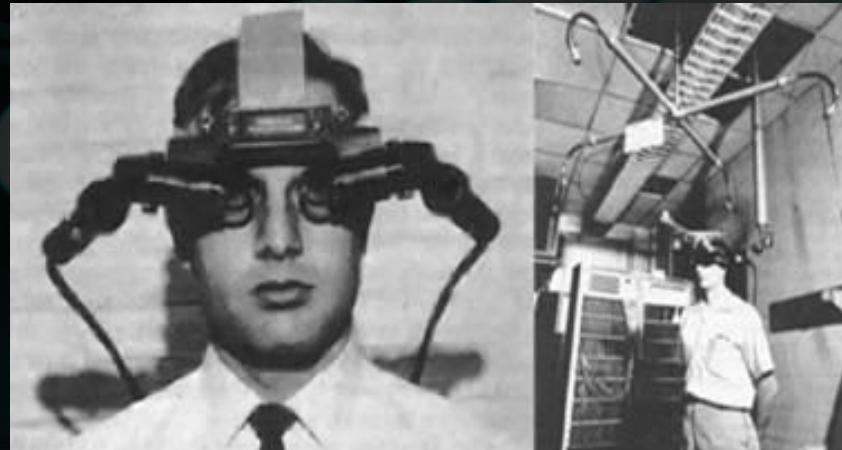
- Format 3D au moins 60 Hz
- 1 à 2 écrans intégrés.
- 2 images affichées «en même temps»

➤ Séparation naturelle (physique) entre

- l'image destinée à l'œil gauche
- l'image destinée à l'œil droit.

➤ Images légèrement décalées entre l'œil gauche et l'œil droit.

➤ Capteur(s) afin de repérer la position et l'orientation de la tête de l'utilisateur (gyroscopes, accéléromètres, caméras IR, caméras RGB, Laser, etc.)



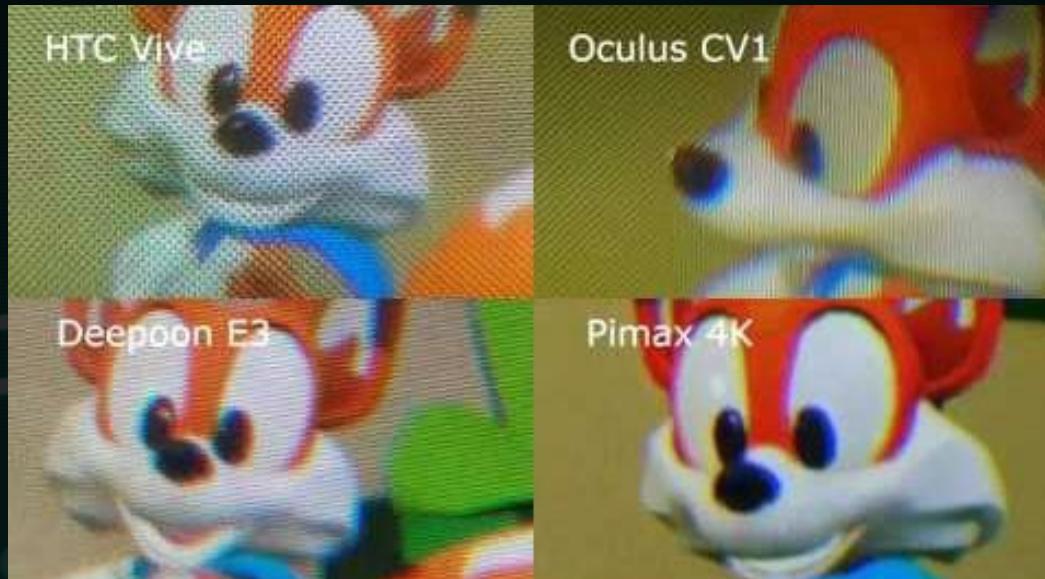
Ultimate Display, 1968



Oculus Quest 2, 2020

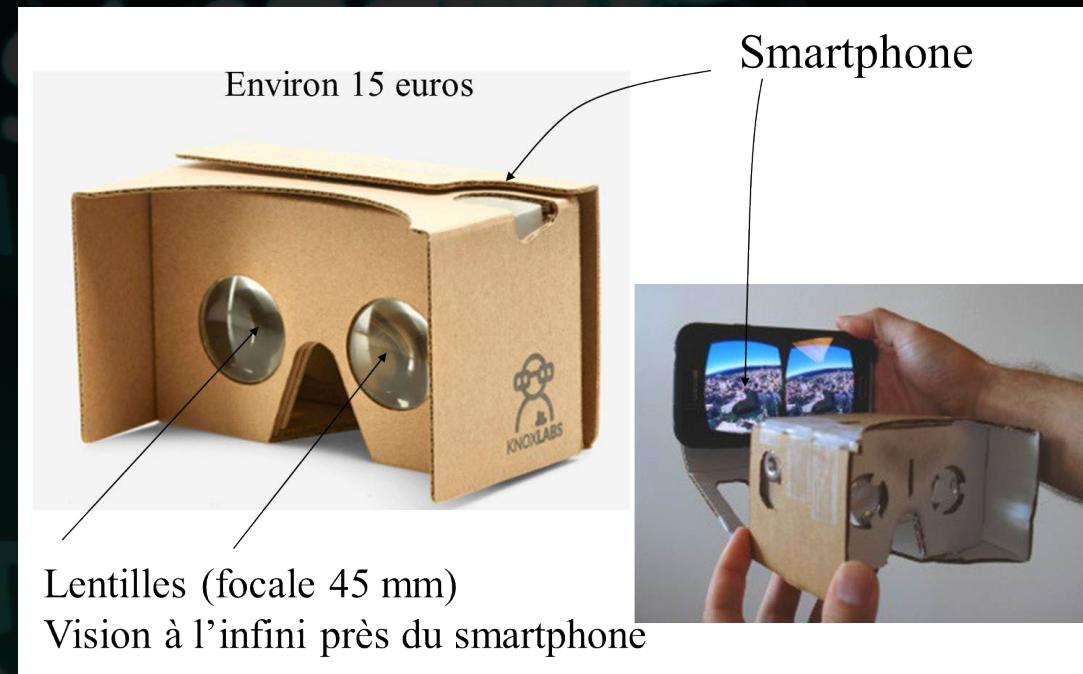
Casques - Pros & Cons

- + DOI réglable
- - Screen-door effect
 - l'apparition de lignes fines et sombres ou d'un aspect de maillage causée par les espaces entre les pixels d'un écran ou d'une image projetée.



Google CardBoard

- Capteurs: capteurs du Smartphone (gyroscope, accéléromètre, etc.)
- Pas de contrôleur associé.
- La personne portant le casque ne perçoit pas le monde réel



Oculus Rift DK2 (2015)

➤ Config minimum

- Carte graphique : Nvidia GTX 970
- 1 port HDMI (casque)
- 1 ports USB 2 (caméra IR)
- 1 port USB 3 (casque)

➤ Pas de contrôleur associé!

- La personne portant le casque ne perçoit pas le monde réel

Caméra IR de positionnement

Résolution	1920 × 1080
Poids	440g
FOV	100°
Capteurs positionnels	Caméra infrarouge
Capteurs	Gyroscope, accéléromètre, magnétomètre
Date de sortie	Juillet 2015
Résolution par oeil	960 × 1080
OS	Windows / Linux / OSX
Type d'écran	AMOLED
Prix recommandé	350.00\$
Connectiques	USB 2.0 / HDMI 1.4b
Coloris	Noir
Audio	Aucun
Fabriquant	Oculus
Fréquence	75Hz



Caméra IR de positionnement

Oculus Rift (2016)

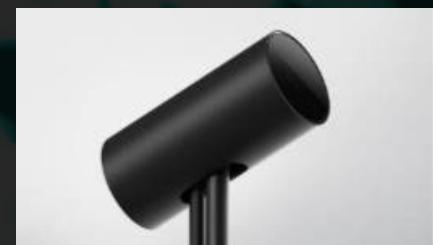
➤ Config minimum

- Carte graphique : Nvidia GTX 1050Ti
- 1 port HDMI 1.3 (casque)
- 1 port USB 3 (casque)
- 2 ports USB2 (caméras IR)

➤ Contrôleur associé: Oculus touch

- La personne portant le casque ne perçoit pas le monde réel

Résolution	2160 x 1200
Poids	470g
FOV	110° (non confirmé)
Capteurs positionnels	Caméra infrarouge "Constellation"
Capteurs	Gyroscope, accéléromètre, magnétomètre
Date de sortie	28 mars 2016
Résolution par oeil	1080 × 1200
OS	Windows 7 ou supérieur
Type d'écran	OLED
Prix recommandé	699€
Connectiques	HDMI / USB
Coloris	Noir
Audio	Casque audio intégré détachable
Fabriquant	Oculus
Fréquence	90 Hz



2 ou 3 Caméras IR de positionnement

Oculus Rift-S (2019)

➤ Config minimum

- Carte graphique : Nvidia GTX 1050Ti
- port DisplayPort (casque)
- 1 port USB 3 (casque)

➤ Contrôleur associé: Oculus touch

➤ Utilisation de 5 caméras intégrées dans le casque : évite les caméras IR extérieures

- permet de visualiser les obstacles dans le monde réel

➤ Détection d'obstacles dans le monde réel grâce à la fonction Passthrough

- La personne portant le casque perçoit le monde réel si nécessaire
- Gestion des obstacles dans le monde réel

Résolution	2560 x 1440
Poids	563g
FOV	110°
Capteurs positionnels	5 caméras intégrées au casque
Détection d'obstacles dans le monde réel	Fonction passthrough
Capteurs	Gyroscope, accéléromètre
Date de sortie	18/05/2019
Résolution par œil	1280 x 1440
OS	Windows 10
Type d'écran	dalle LCD unique
Prix recommandé	449 €
Connectiques	DisplayPort / USB 3
Coloris	Noir
Audio	Casque audio intégré détachable
Fabriquant	Oculus
Fréquence	80 Hz



Oculus Quest (2019)

- 1 port Oculus Link Beta (relie le casque à un PC)
- 1 port USB-C pour la recharge du casque
- Contrôle grâce à Oculus Touch et grâce à la reconnaissance des mains
- Utilisation de 4 caméras intégrées dans le casque :
 - évite les caméras IR extérieures
 - permet de visualiser les obstacles dans le monde réel
- Casque autonome, avec calculateur intégré
 - Autonomie : 2 heures
 - Interaction possible avec les mains
 - La personne portant le casque perçoit le monde réel si nécessaire
 - Détection d'obstacles dans le monde réel grâce à la fonction Oculus guardian

Résolution	3200 x 1440
Poids	571g
FOV	110°
Processeur	Qualcomm Snapdragon 835
Temps de recharge	2 heures
Capteurs positionnels	4 caméras intégrées au casque en façade (vision à 180°)
Détection d'obstacles dans le monde réel	Oculus Guardian
Capteurs	Gyroscope, accéléromètre
Date de sortie	21/05/2019
Résolution par œil	1600 x 1440
OS	Ios, Android
Type d'écran	dalle OLED
Prix recommandé version 65Go	449 €
Connectiques	Wifi, Bluetooth, Oculus Link Beta
Coloris	Noir, Blanc
Audio	2 prises jack intégrées
Fabriquant	Oculus
Fréquence	72 Hz



Sources

- Cours inspiré des travaux de Guillaume Bouvier (Université Paris Saclay RSVI)
 - <https://web4.ensiie.fr/~bouyer/rvsi.html>
- https://www.researchgate.net/figure/Presence-et-autonomie-en-realite-virtuelle-Extrait-de-Tisseau-2001_fig2_29607586
- https://www.pressesdesmines.com/wp-content/uploads/2016/03/Visio_Extr.pdf