

## **M4202Cin - Connaissances Complémentaires en Imagerie Numérique**

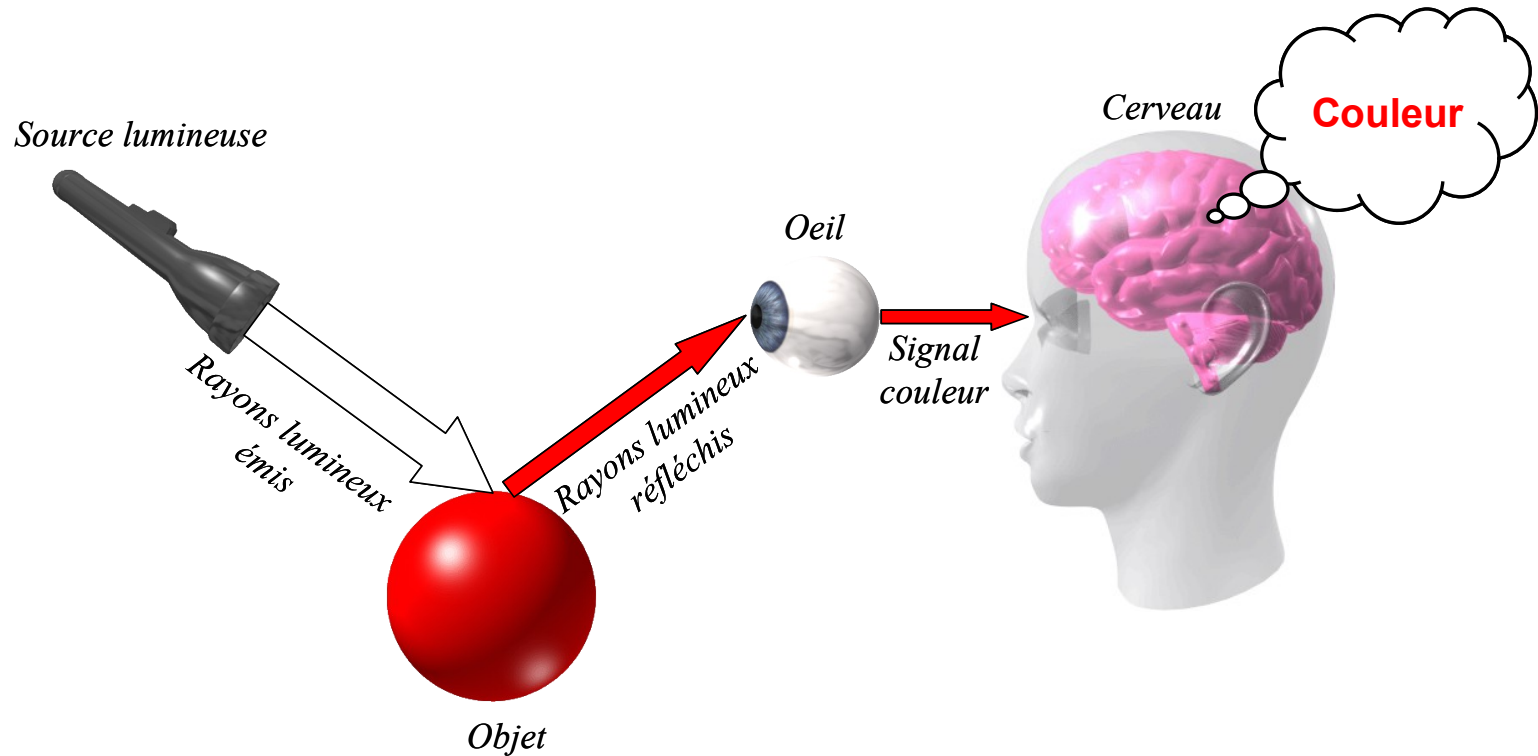
# **3. Le système visuel humain**

2ème année 2019-2020

Sébastien THON

IUT d'Aix-Marseille Université, site d'Arles  
Département Informatique

# 1. Introduction

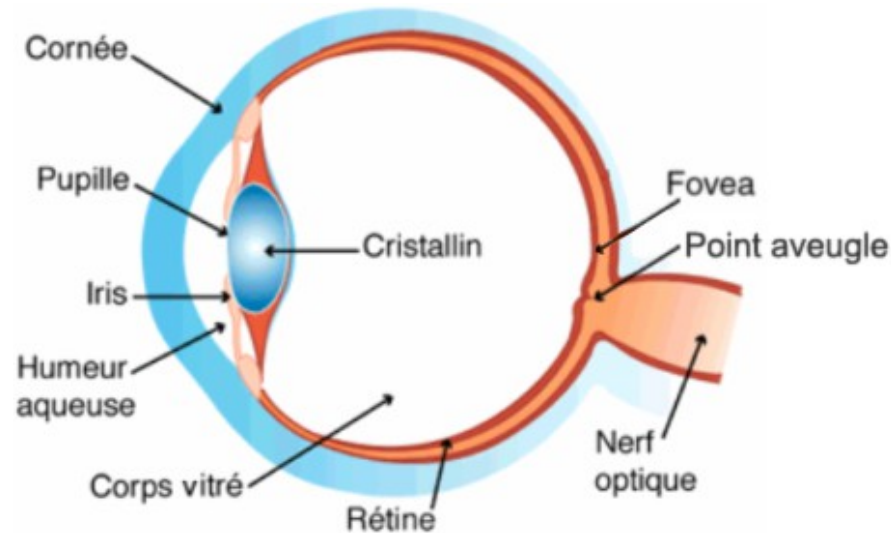


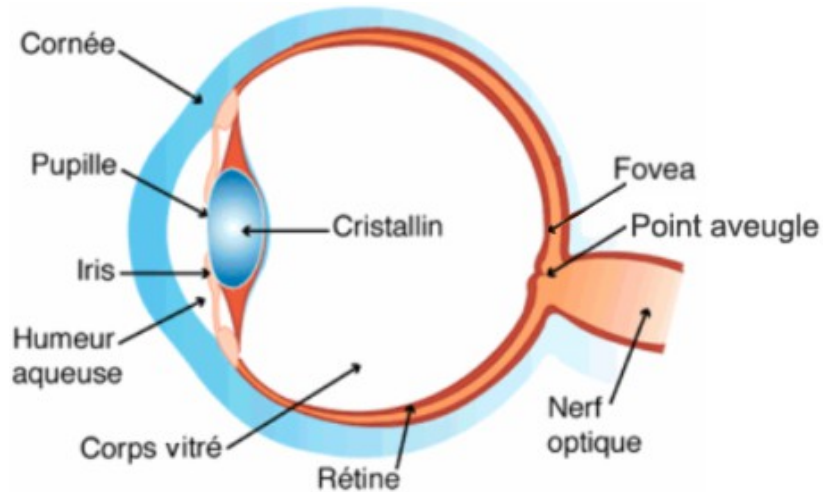
La lumière est réfléchiée sur les objets dans toutes les directions. Nous ne voyons des objets que la lumière qui y est réfléchiée vers l'œil.

## 2. L'œil

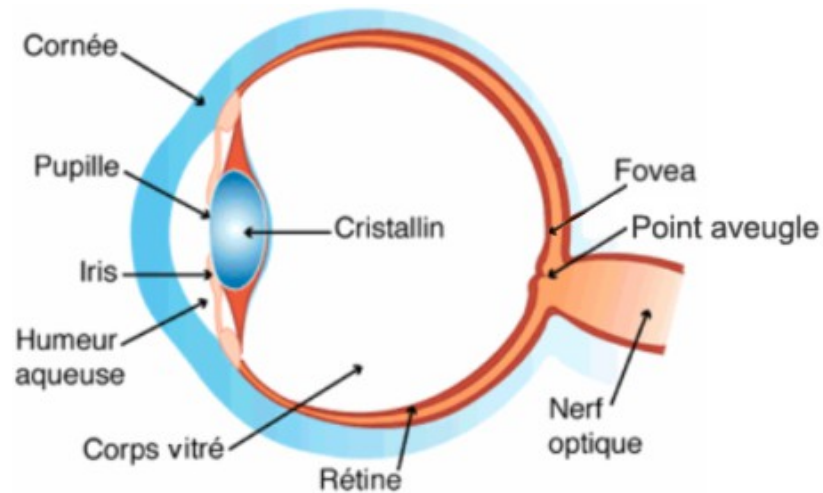
### 2.1 Anatomie

L'œil est composé de plusieurs éléments qui ont chacun une influence dans le cheminement de la lumière et la compréhension du signal optique par le cerveau.

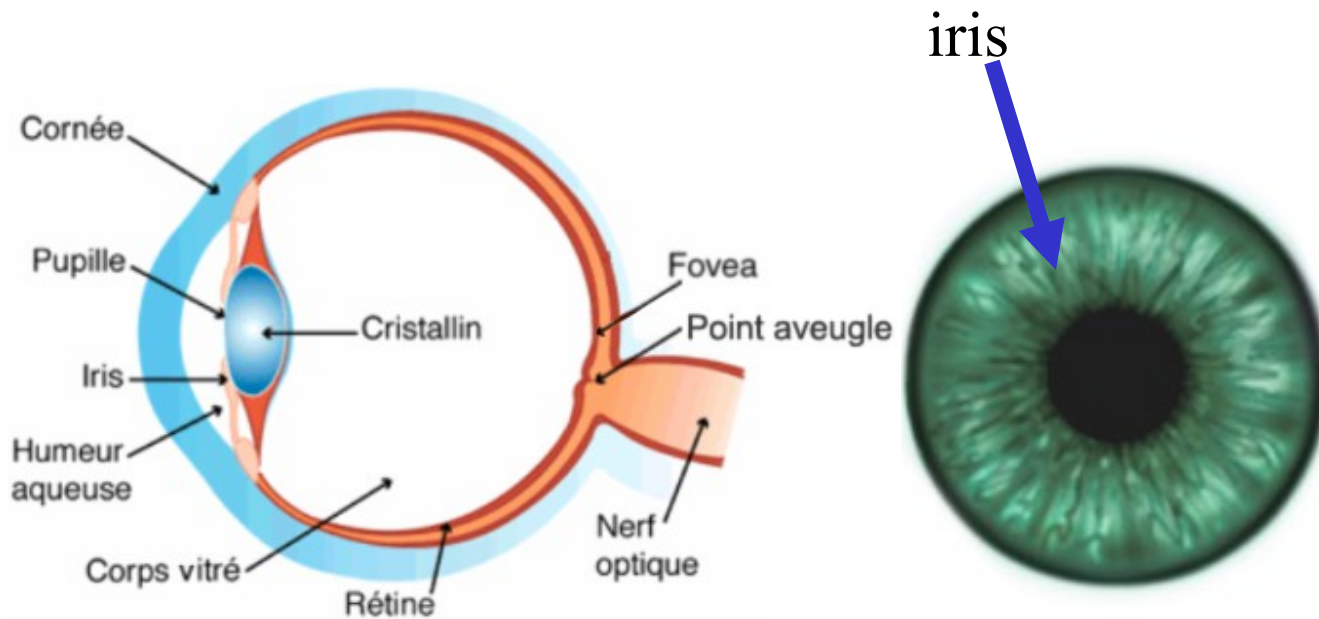




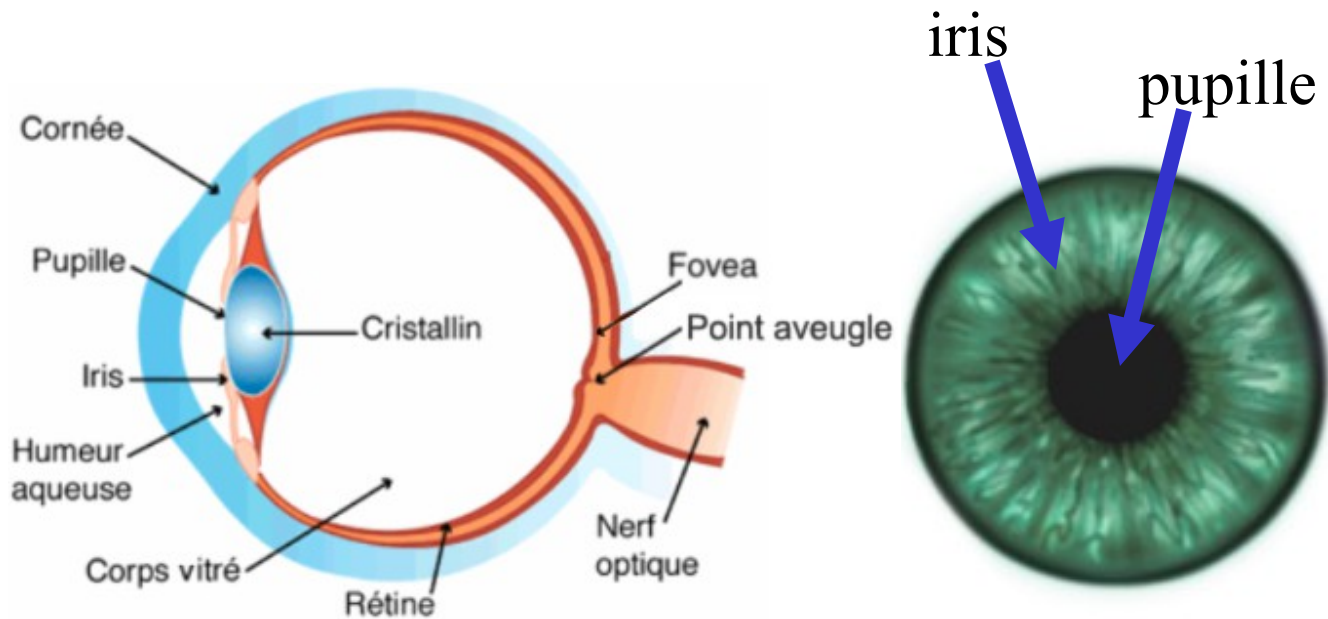
- **La cornée** : couche transparente et résistante placée sur la face avant de l'œil. Son rôle est de protéger l'avant du globe oculaire. Sa courbure dépend des individus et varie aussi avec l'âge.



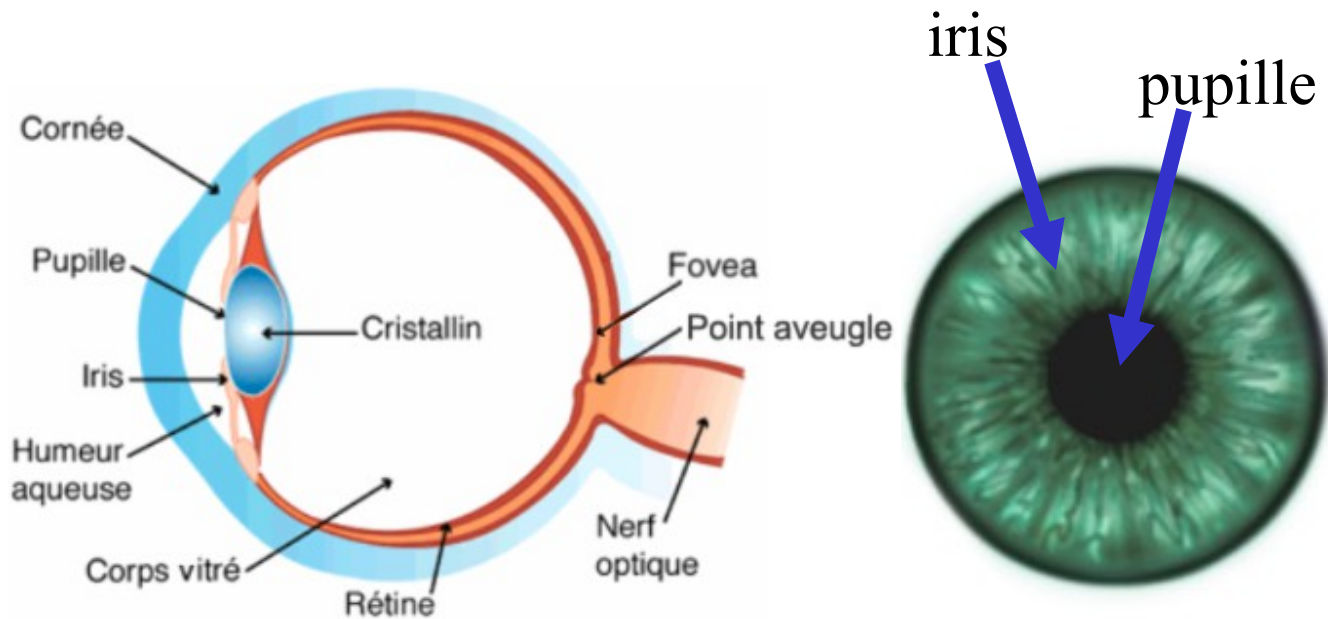
- **L'humeur aqueuse** : liquide salin et alcalin sous pression qui maintient ainsi la rigidité du globe oculaire.



- **L'iris** : membrane colorée qui fonctionne comme un diaphragme en contrôlant la quantité de lumière qui pénètre dans l'œil. Couleur donnée par un pigment, la mélanine.

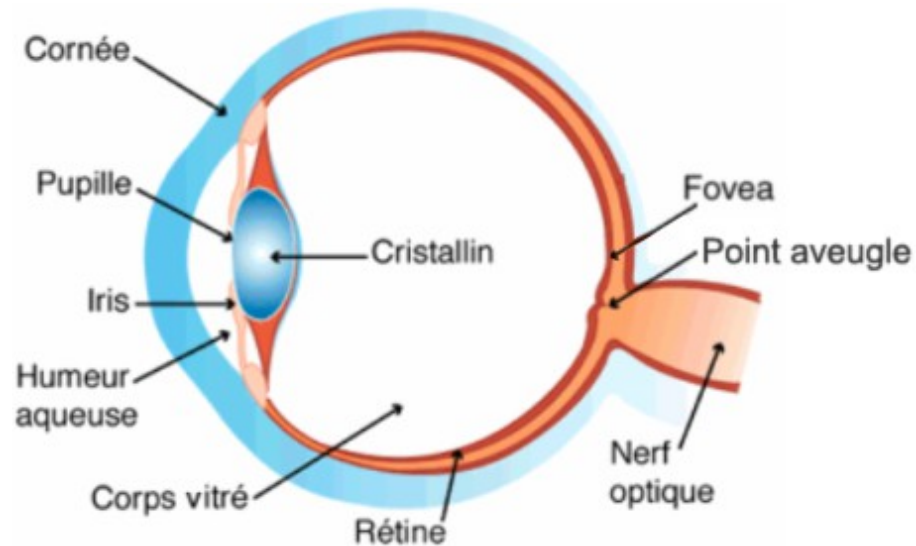


- La **pupille**, qui a une apparence de disque noir, est l'ouverture centrale de l'iris. Sa taille varie pour laisser passer plus ou moins de lumière (diamètre=2mm en pleine lumière, 8mm dans l'obscurité).

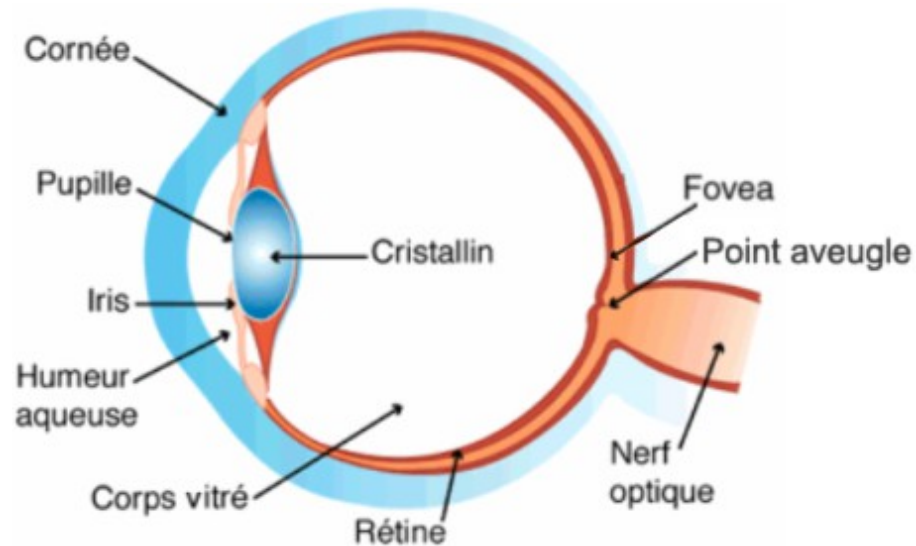


La dimension maximale de la pupille est affectée par le vieillissement. Les pupilles d'une personne âgée s'ouvrent moins que celles d'un jeune (→ en vieillissant on a besoin d'un éclairage plus intense pour être à l'aise).



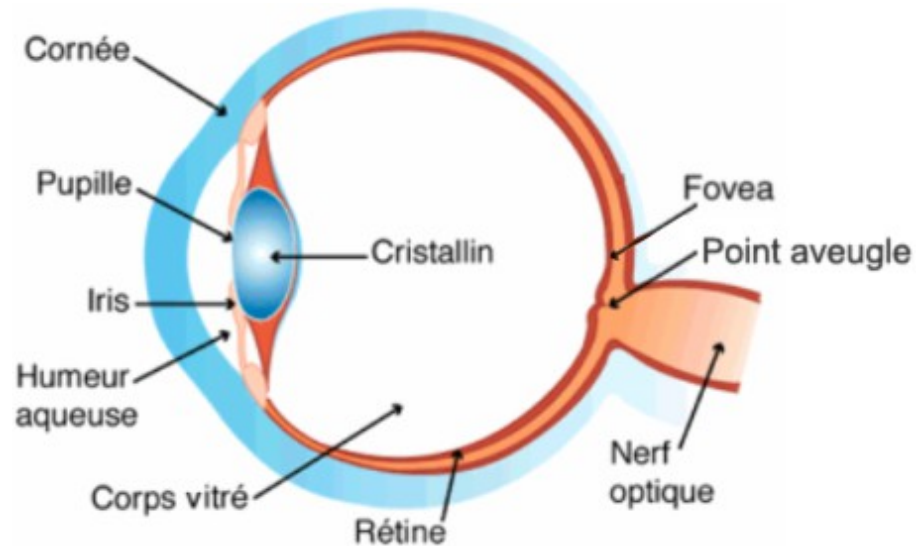


- **Le cristallin** : lentille transparente convergente placée derrière l'iris. Il permet d'avoir une vision nette de ce que nous observons grâce à sa capacité à modifier sa courbure (→ mise au point).

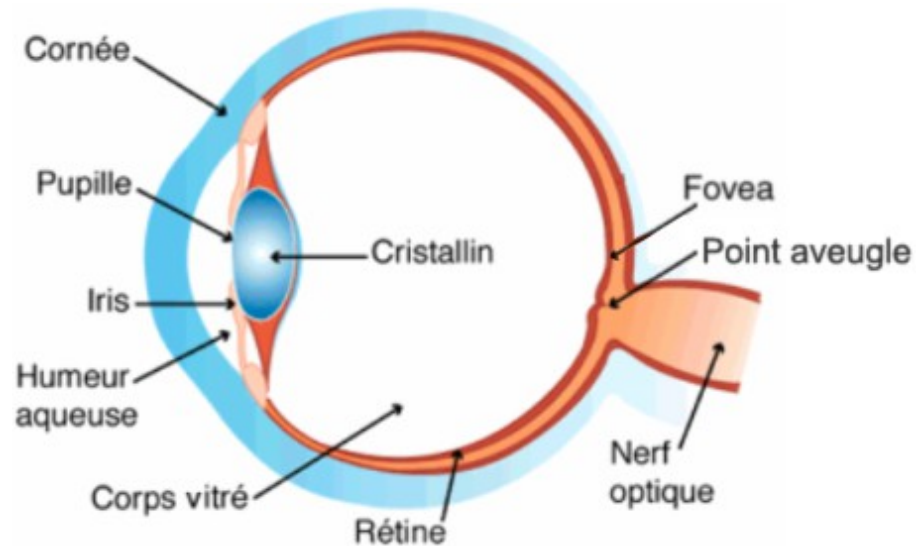


La cornée et le cristallin font converger la lumière qui entre dans l'œil en la focalisant sur la **rétine** (membrane recouverte de photorécepteurs).

La perte de transparence des cellules cristallines, entraînant leur mort, s'appelle la *cataracte*.



- **Le corps vitré** : constitue les 4/5 du volume de l'œil. Il est composé d'un liquide parfaitement transparent continuellement sécrété et absorbé, dont le rôle est d'assurer la structure autonome de l'œil.



- **Le point aveugle** (ou « tache aveugle ») : endroit où le nerf optique vient se raccorder à la rétine → trou dans la vision appelé scotome.

<http://blindpoint.ca/>



## 2.2 Accommodation

L'œil ne sait pas voir net simultanément de près et de loin.

**L'accommodation** est la faculté d'adapter l'œil en fonction de la distance aux objets observés, de manière à en avoir une vision nette.

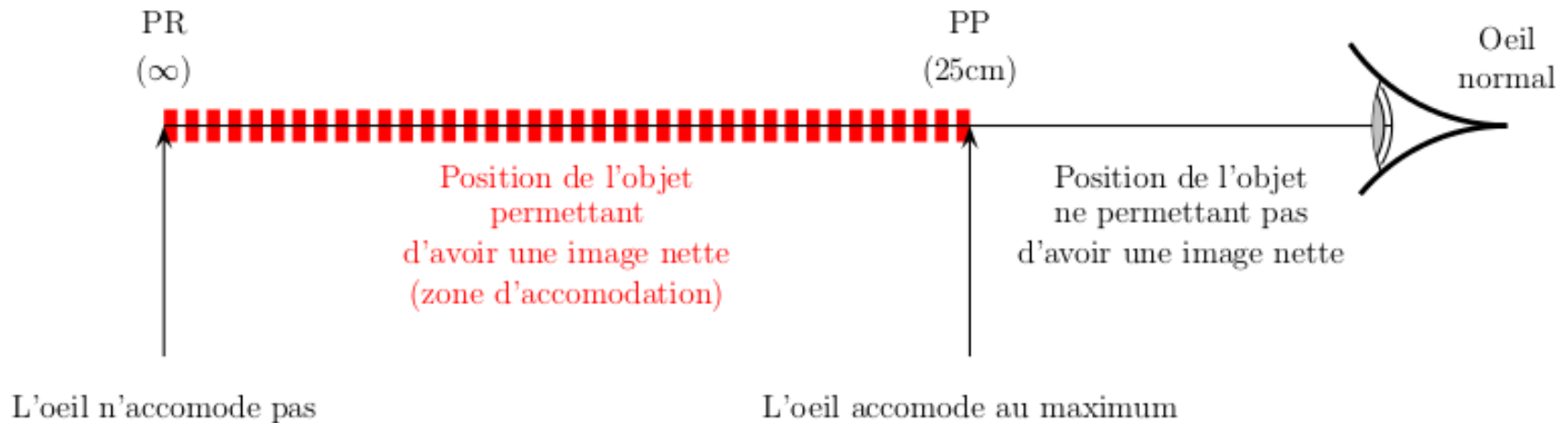


C'est le rôle du cristallin qui, en se déformant, ajuste l'image projetée sur la rétine.

Pour un œil normal, lorsque le cristallin est au repos, les images des objets situés à l'infini se forment sur la rétine : on dit alors que l'œil n'accommode pas.

En revanche, lorsque l'œil regarde un objet proche, son cristallin se contracte, ce qui change la distance focale et permet aux images de se former sur la rétine : on dit alors que l'œil accommode.

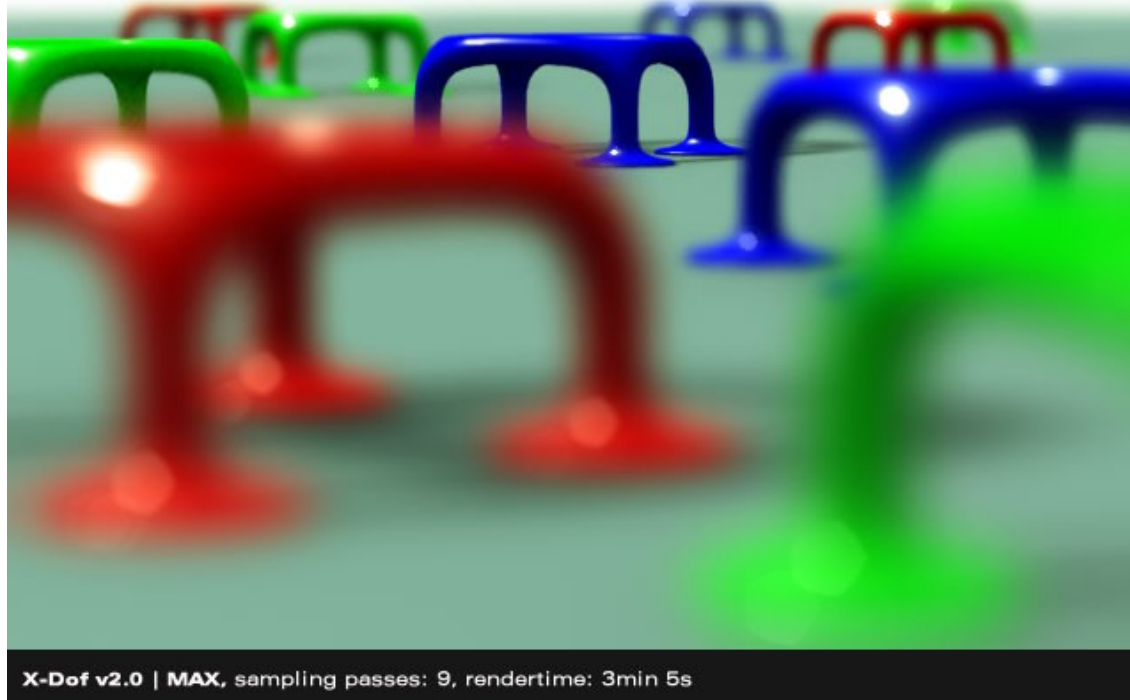
Notre cerveau analyse les images fournies par l'œil et dirige en permanence l'accommodation du cristallin. Ce processus est inconscient.



- **Punctum remotum** : c'est le point le plus éloigné que l'œil peut voir net sans accommoder (point à l'infini) ;
- **Punctum proximum** : c'est le point le plus proche que l'on peut voir net en accommodant au maximum.
- Distance minimale de vision distincte : c'est la distance entre l'œil et le punctum proximum. Cette distance augmente avec l'âge (10 cm pour un enfant, 25 pour un jeune adulte, 100 cm aux environs de 60 ans) ;



**Profondeur de champ** (« *Depth of field* ») : espace de la prise de vue qui va apparaître avec netteté, c'est-à-dire la partie du champ qui se trouve nette et située entre la zone rapprochée et la zone éloignée avec ces deux dernières considérées floues.



Ce « flou » de profondeur de champ peut être simulé en synthèse d'images. C'est utilisé dans les films ou dans les jeux pour guider l'attention du spectateur sur certaines parties de l'image.

## 2.3 L'adaptation à la lumière

Du fait des fortes variations d'intensité lumineuse rencontrées dans les scènes naturelles, l'œil possède une forte capacité d'**adaptation**.

### Exemples d'intensités lumineuses :

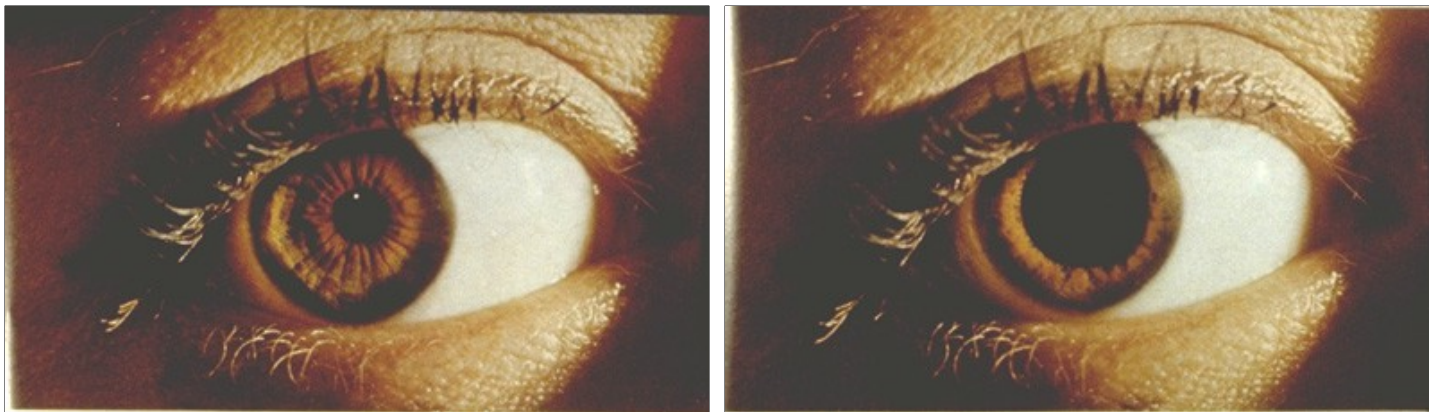
Soleil à 50° au dessus de l'horizon par ciel clair	: $10^5$ Lux
Éclairage artificiel intense	: $10^3$ à $10^4$ Lux
Éclairage de bureau	: 500 Lux
Pleine lune	: 0,2 Lux
Limite d'appréciation des formes	: $10^{-2}$ à $10^{-3}$ Lux

L'œil doit être capable de capter les photons dans l'obscurité mais aussi de se protéger d'une lumière trop vive, ceci grâce à un système d'adaptation à la lumière.

Ce phénomène s'illustre facilement. Lorsque nous quittons un endroit fortement éclairé pour un autre plus sombre, nous sommes temporairement aveugles. Après quelques secondes, notre vision se rétablit. C'est également le cas dans la situation inverse.

L'œil s'adapte à la luminance moyenne présente dans son champ de vision grâce à deux processus :

- Modification de la **taille de la pupille** pour laisser passer plus ou moins de lumière.



- Variation de la **sensibilité moyenne de la rétine**.

## Remarque

Dans l'obscurité, les pupilles sont largement dilatées.

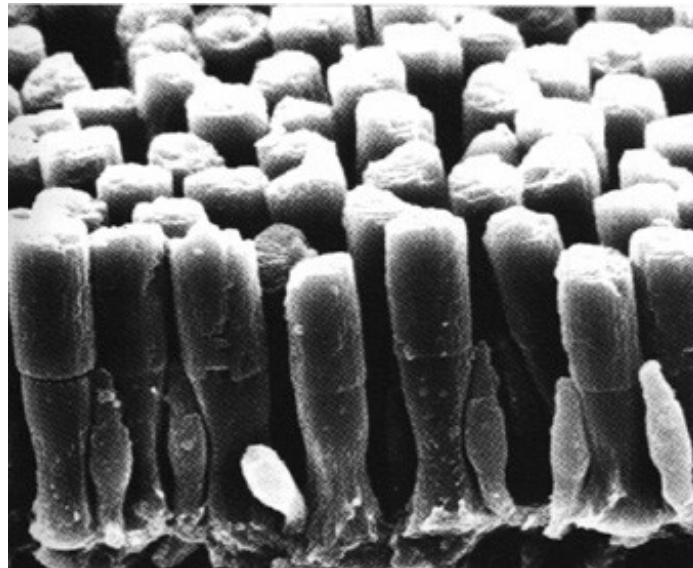
Si on prend une photo au flash → éclaircissement de la rétine (très irriguée en sang) par la lumière du flash qui pénètre par la pupille.

→ Phénomène des « yeux rouges ».

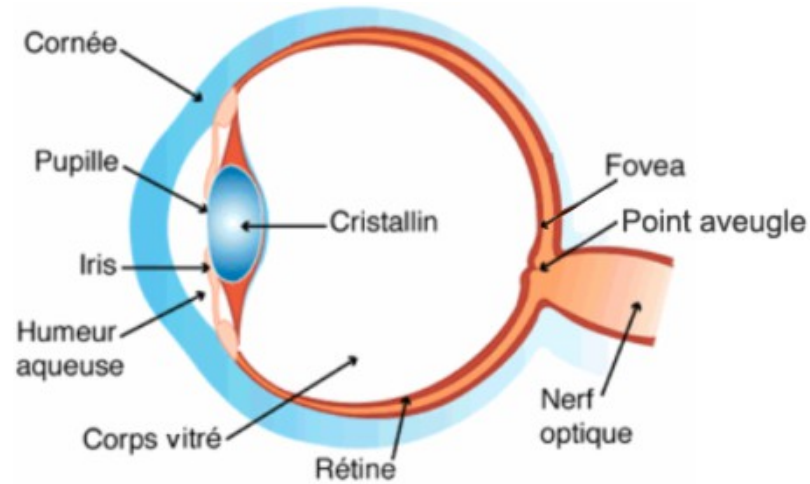


### 3. La rétine

C'est une membrane qui tapisse le fond de l'œil. Elle reçoit les signaux lumineux, et assure leur transmission au cerveau par l'intermédiaire du nerf optique.



*Vue au microscope électronique  
d'une portion de la rétine*



L'épaisseur de la rétine est d'environ  $250\mu\text{m}$  sauf dans la zone centrale appelée **fovéa** (diamètre = 1,5 mm) où elle s'amincit pour atteindre une centaine de microns.

La rétine contient deux types de photo-récepteurs dont la répartition spatiale est très différente :

- Les **cônes** sont seuls présents dans la fovéa et leur densité diminue en allant vers la périphérie.
- Les **bâtonnets** au contraire sont absents de la zone centrale mais répartis sur tout le reste de la rétine.



## 3.1 Les cônes



- En petit nombre (~5 millions par œil).
- De sensibilité moyenne.
- Grande vitesse de réponse.
- Sensibles à la couleur.

Il existe trois types de cônes : **S**, **M** et **L** (pour *short*, *medium* et *long* wavelength : ondes de longueurs courtes, moyennes et longues). Leurs sensibilités maximales sont respectivement de : 420nm, 530nm et 560nm ce qui correspond à une sensibilité au bleu, au vert et au rouge.

La perception des couleurs se limite à la synthèse de ces trois stimulus de couleur.

## 3.2 Les bâtonnets



- Très nombreux (~110 millions par œil).
- Très sensibles.
- Insensibles à la couleur.
- Lents à l'adaptation.

Ces photo-récepteurs, cônes et bâtonnets, fonctionnent selon trois modes :

- **Photopique** : vision nette et colorée, due aux cônes.
- **Scotopique** : vision achromatique et moins nette, due aux bâtonnets.
- **Mésopique**, vision mixte où tous les photo-récepteurs sont actifs.

Les deux types de cellules de la rétine ont une fonction différente : les bâtonnets donnent la vision à faible intensité, tandis que les cônes sont sensibles aux couleurs, sous forte lumière.

→ « La nuit, tous les chats sont gris ».

## Persistance rétinienne

Les cellules de la rétine conservent une image pendant environ 1/10ème de seconde après son apparition → **persistance rétinienne**

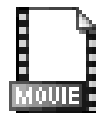




La persistance rétinienne est mise à profit par le cinéma : en faisant défiler une séquence d'images au rythme de 24 par seconde, le cerveau a l'impression d'un mouvement continu.



**Emile Reynaud** invente en 1876 le praxinoscope, jouet optique donnant l'illusion du mouvement.





**Etienne-Jules Marey** (1830-1904), physiologiste français, s'intéresse au mouvement des êtres vivants.



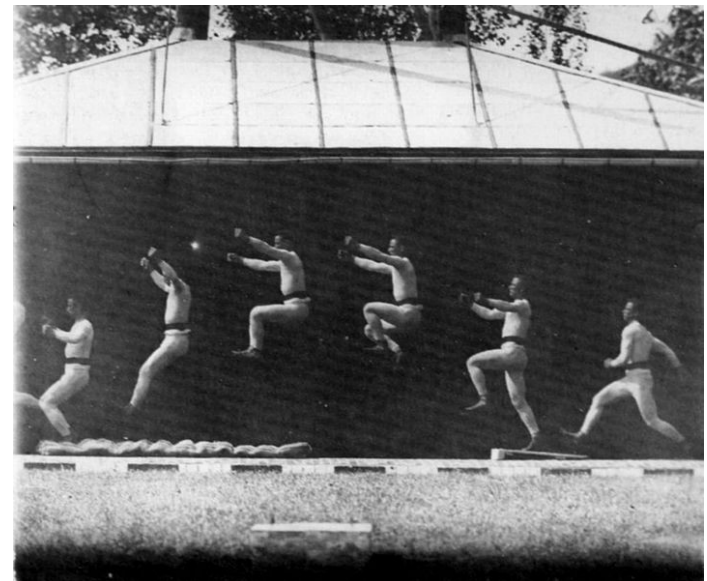
*Fusil  
photographique*



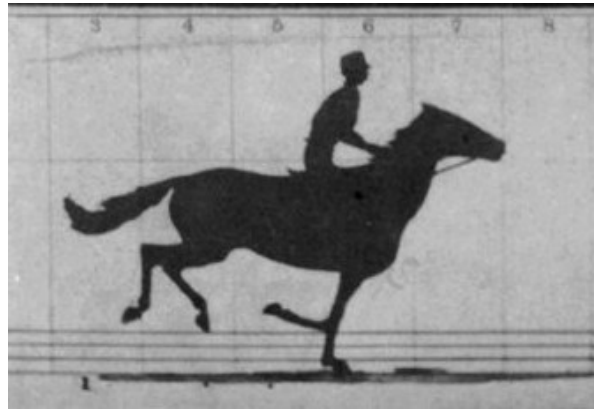
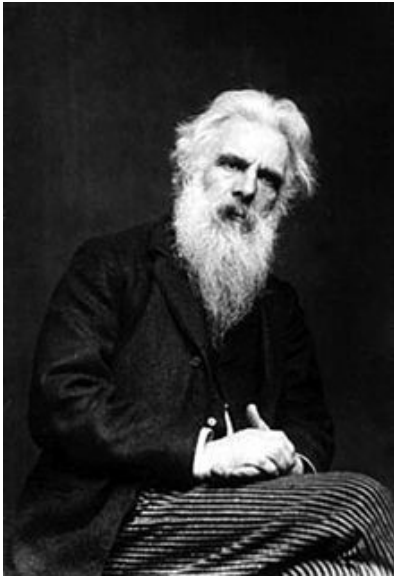
*Saisie de plusieurs mouvements en une  
seule photographie*

### ***Chronophotographie :***

Technique photographique qui permet de prendre une succession de photos à intervalles réguliers permettant d'étudier le mouvement en décomposé de l'objet photographié.



**Eadweard Muybridge** (1830-1904), photographe, s'intéresse à la décomposition photographique du mouvement.

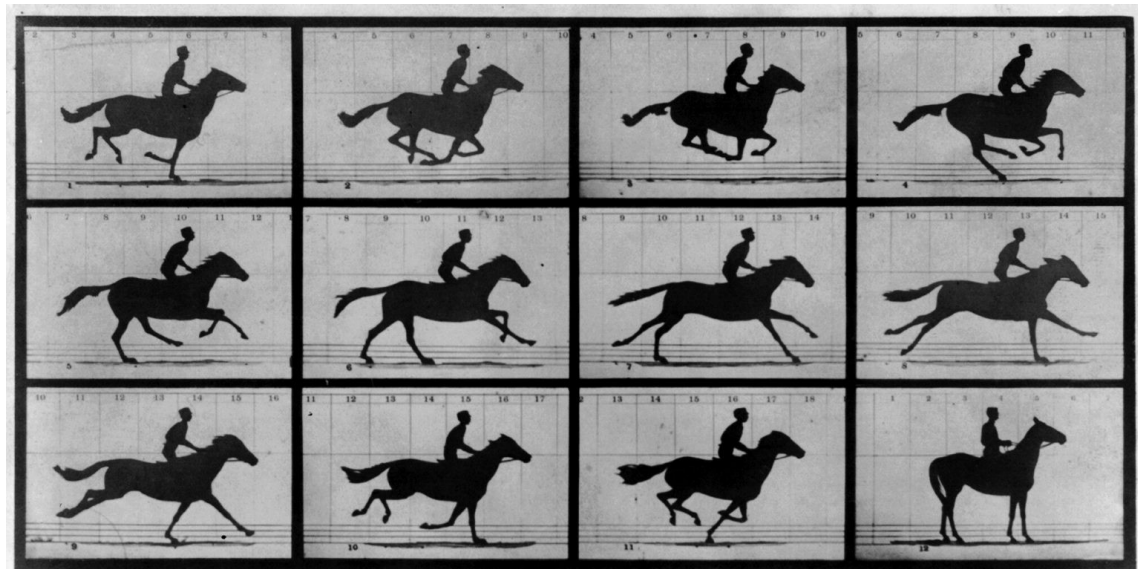


Prix offert par le milliardaire Leland Stanford en 1878 :

*« le cheval au galop n'a jamais les quatre fers en l'air au cours des phases d'extension »*



*Zoopraxiscope*



Copyright, 1878, by MUYBRIDGE.

MORSE'S Gallery, 417 Montgomery St., San Francisco.

THE HORSE IN MOTION.

Illustrated by MUYBRIDGE.

AUTOMATIC ELECTRO-PHOTOGRAPH.

"SALLIE GARDNER," owned by LELAND STANFORD; running at a 1.40 gait over the Palo Alto track, 19th June, 1878.

The negatives of these photographs were made at intervals of twenty-seven inches of distance, and about the twenty-fifth part of a second of time; they illustrate consecutive positions assumed in each twenty-seven inches of progress during a single stride of the mare. The vertical lines were twenty-seven inches apart; the horizontal lines represent elevations of four inches each. The exposure of each negative was less than the two-thousandth part of a second.



Le principe de Muybridge d'une animation créée à partir d'images prises par plusieurs appareils photos a été reprise pour l'effet "*Bullet Time*" dans le film **Matrix**.





## Motion blur

Si on filme un objet en mouvement, il pourra apparaître flou  
→ « flou de bouger » ou « motion blur ».

En synthèse d'images, on peut simuler cet effet de flou pour lisser l'aliassage temporel et réduire le nombre d'images par seconde nécessaire pour un effet fluide.



Les frères **Louis** et **Auguste Lumière** inventent le cinématographe (1895).

1ère projection publique : « *Arrivée d'un train en gare de la Ciotat* »



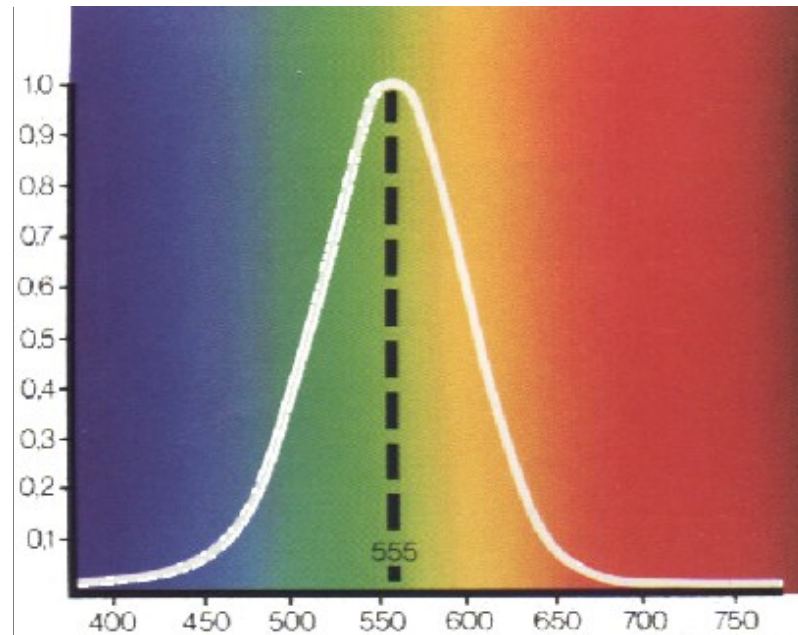
Le caricaturiste américain **Stuart Blackton** réalise le premier dessin animé en 1906 : *Humorous Phases of Funny Faces*.



### 3.3 Sensibilité spectrale de l'œil

L'œil présente un maximum de sensibilité vers 555 nm (vert/jaune) dans les conditions de vision photopique.

Autour de cette longueur d'onde la sensibilité décroît et s'annule vers 380nm et 760nm.

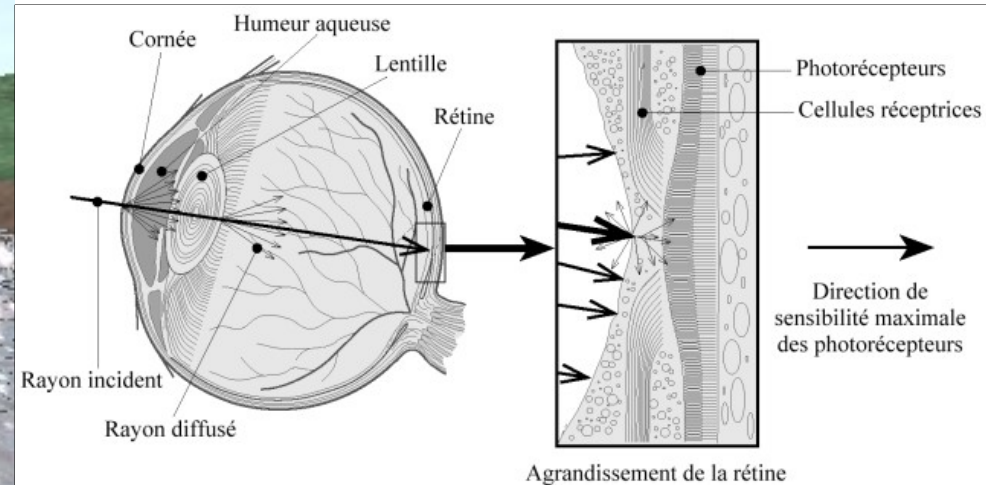
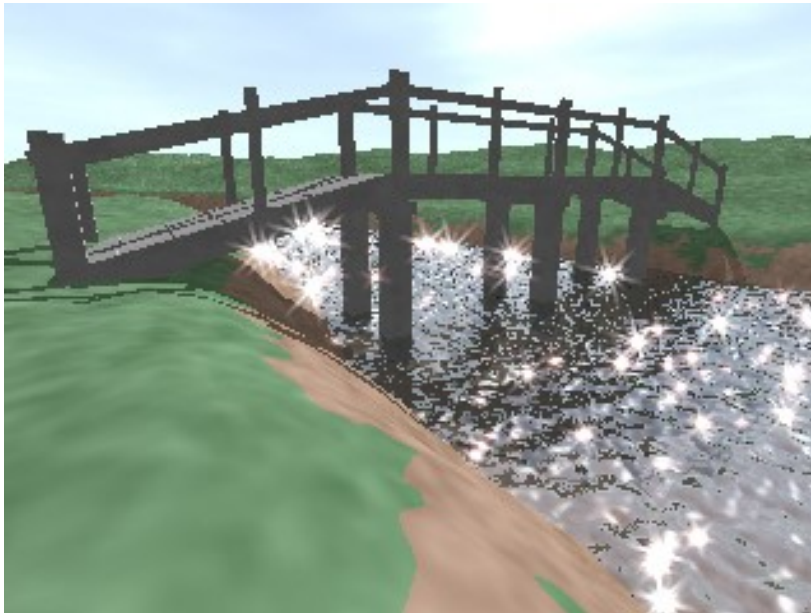


→ Sensibilité prise en compte par des algorithmes de compression (JPEG, DV), qui compressent moins le vert que le rouge et le bleu.

## 3.4 Défauts optiques

### De l'œil

Un éblouissement se produit lorsqu'une forte lumière est directement dirigée vers l'œil, par diffusion de la lumière dans l'œil, au niveau de l'humeur aqueuse et du corps vitré.



## D'un film

Un éblouissement se produit sur un film par diffraction de la lumière sur les lentilles de l'appareil de prise de vue → « *Lens flares* »



C'est un effet parasite, mais qu'on trouve dans de nombreux logiciels 3D ou jeux pour ajouter du réalisme.



## **3.5 Anomalies de la rétine**

### **Altération**

La rétine est fragile. Un fort éblouissement (par ex: observation directe du soleil, laser) peut l'endommager, avec perte irréversible de cellules de la rétine → dégradation des performances de la vue.

### **Défauts génétiques**

Certains individus n'ont pas une vision colorée normale car il manque à leur rétine une ou plusieurs sortes de cônes :

- **Achromates** : ne différencient pas les couleurs.
- **Daltoniens** : confondent certaines couleurs.

## Daltonisme

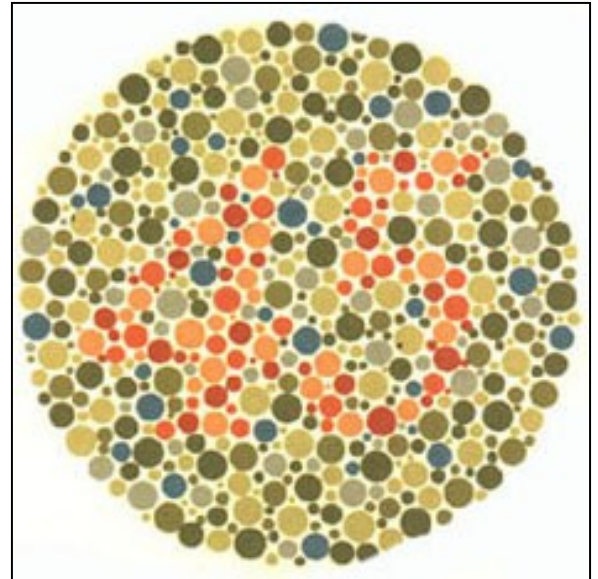
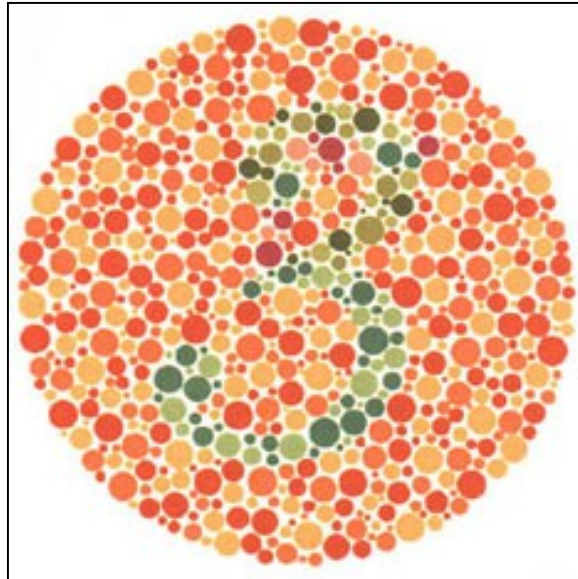
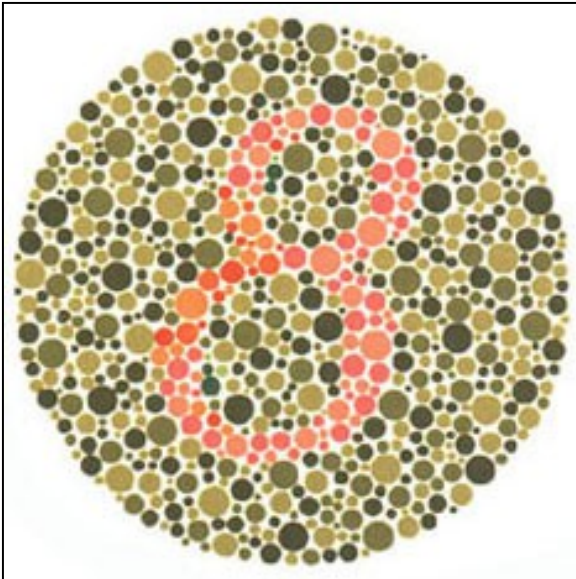
- ❑ Anomalie génétique sur le chromosome X
- ❑ En France : affecte 8% des hommes, 0.6% des femmes
- ❑ Différents types de daltonisme :

	Dichromate (absence du gène, donc du cône)	Trichromate anormal (sensibilité différente du cône)
Cône L Rouge	protanope	protanomal
Cône M Vert	deutéranope	deutéranomal
Cône S Bleu	tritanope	tritanomal

- ❑ Dépistage : test d'Ishihara (1917)

*Exemples tirés du test d'Ishihara (38 planches)*

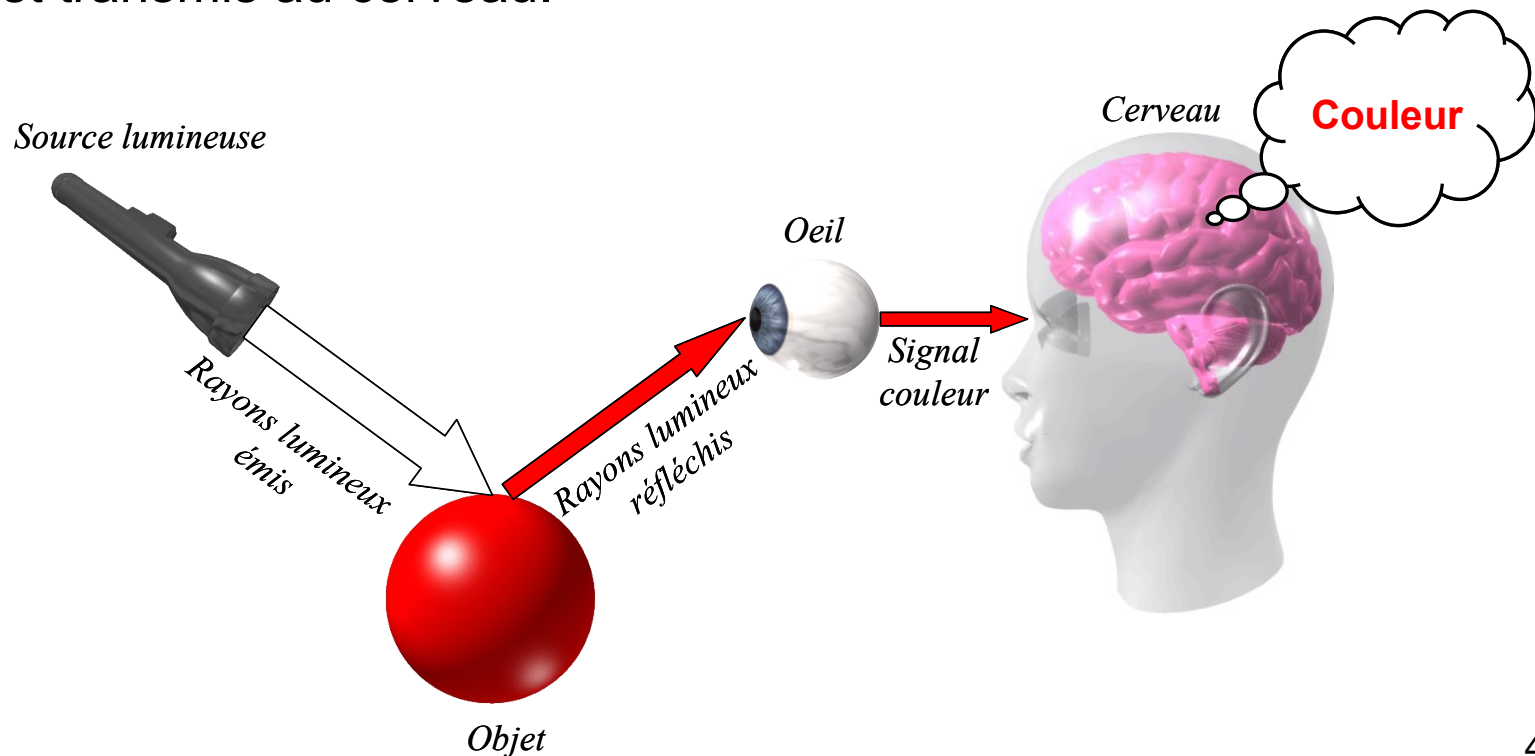
Quels nombres lisez-vous ?



<http://daltonien.free.fr/>

## 4. Transmission de l'information au cerveau

L'œil n'est qu'un ensemble de capteurs photosensibles et n'interprète aucune des images perçues : il détecte un certain nombre de points (un par capteur) et convertit l'information (luminosité, couleur) en un message nerveux codé en fréquence qui est transmis au cerveau.



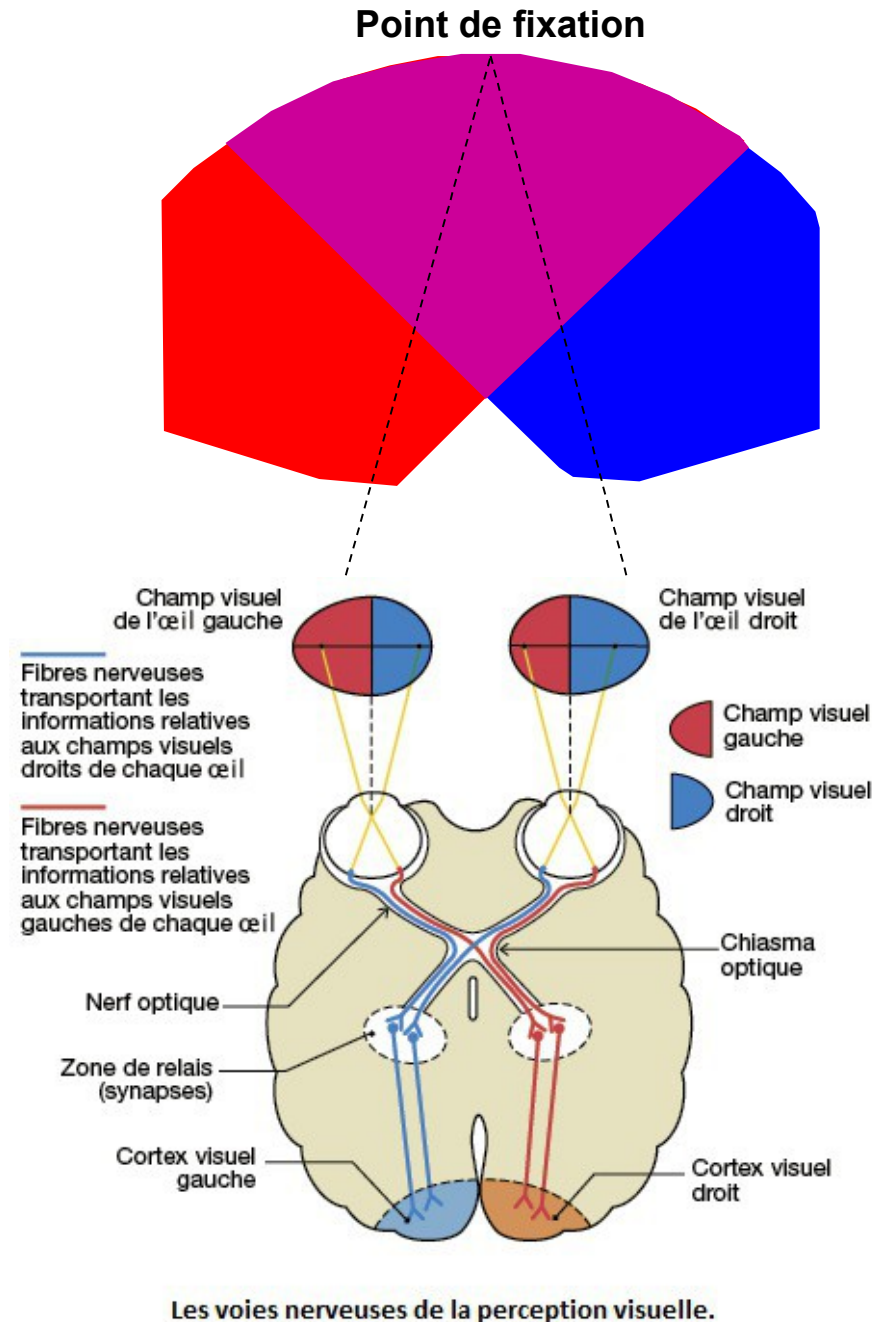
## 4.1 Anatomie

Les deux nerfs optiques se rejoignent au niveau du chiasma. Il y a alors séparation suivant le champ observé.

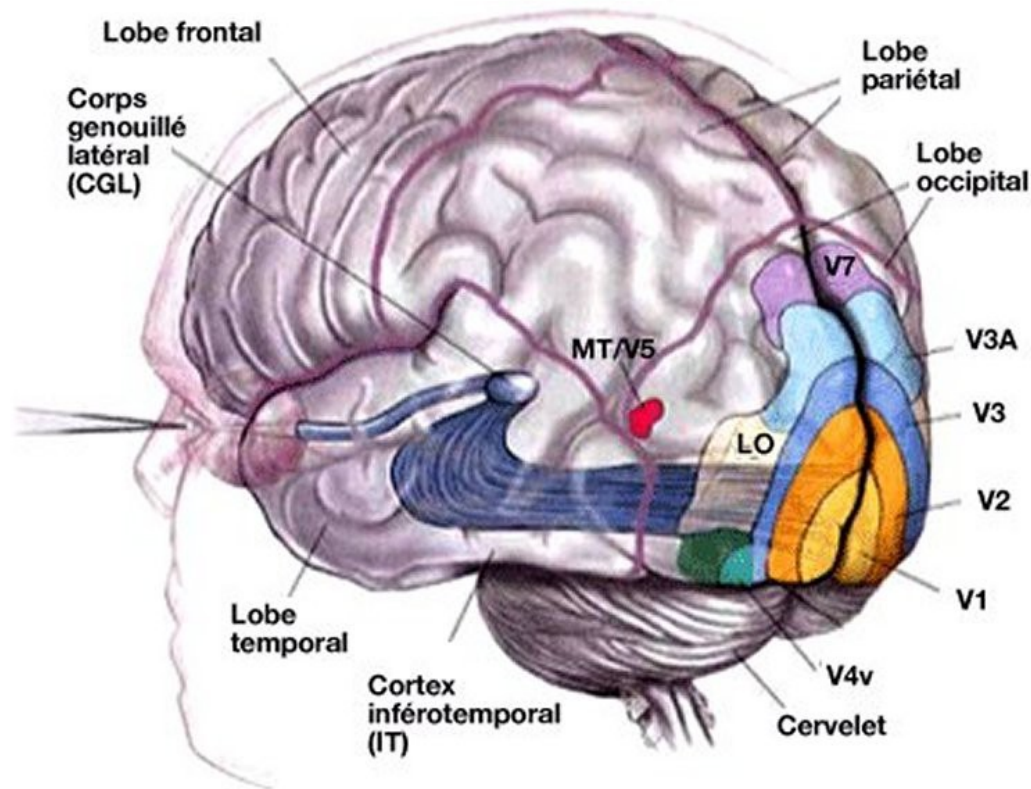
L'information gauche est envoyée vers l'hémisphère droit et inversement.

Le signal optique, transformé en signal électrique par la rétine, arrive au cortex, dans les aires visuelles, où il est analysé.

Des phénomènes complexes entrent en jeu : reconnaissance des formes par confrontation avec les images contenues dans la mémoire visuelle, détermination de la distance et création du relief par fusion des images (différentes) de chaque œil.



L'élaboration de la sensation visuelle est assurée par différentes aires cérébrales dont les aires visuelles primaires situées dans le lobe occipital, subdivisées en plusieurs zones :



V1 : zone primaire. Elle reçoit les images directement issues des rétines des deux yeux.

V2 : détection de textures, complétion de traits

V3 : analyse de formes simples

V4 : analyse des couleurs

V5 : perception du mouvement

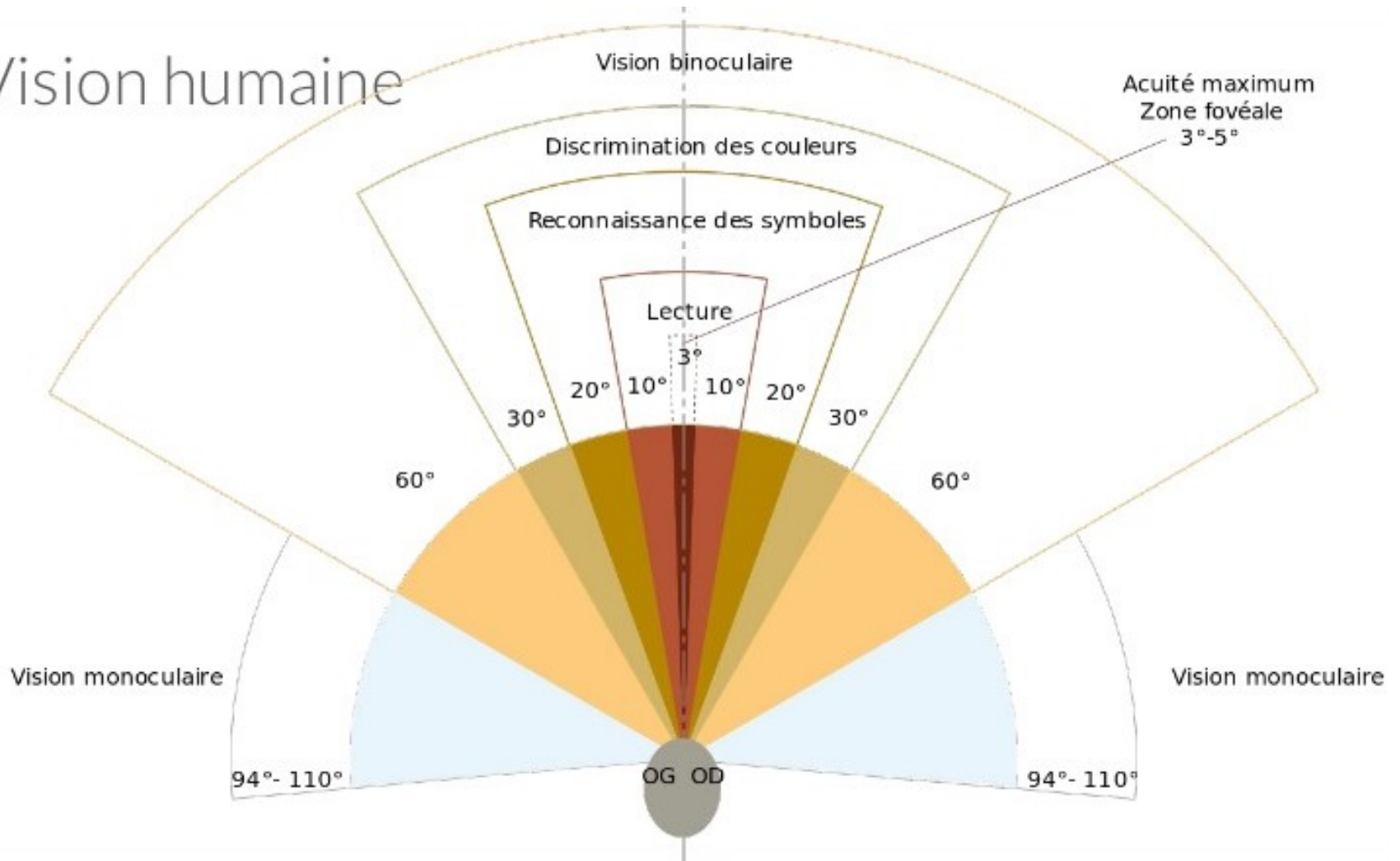
V6 : formes précises (lecture, visages)

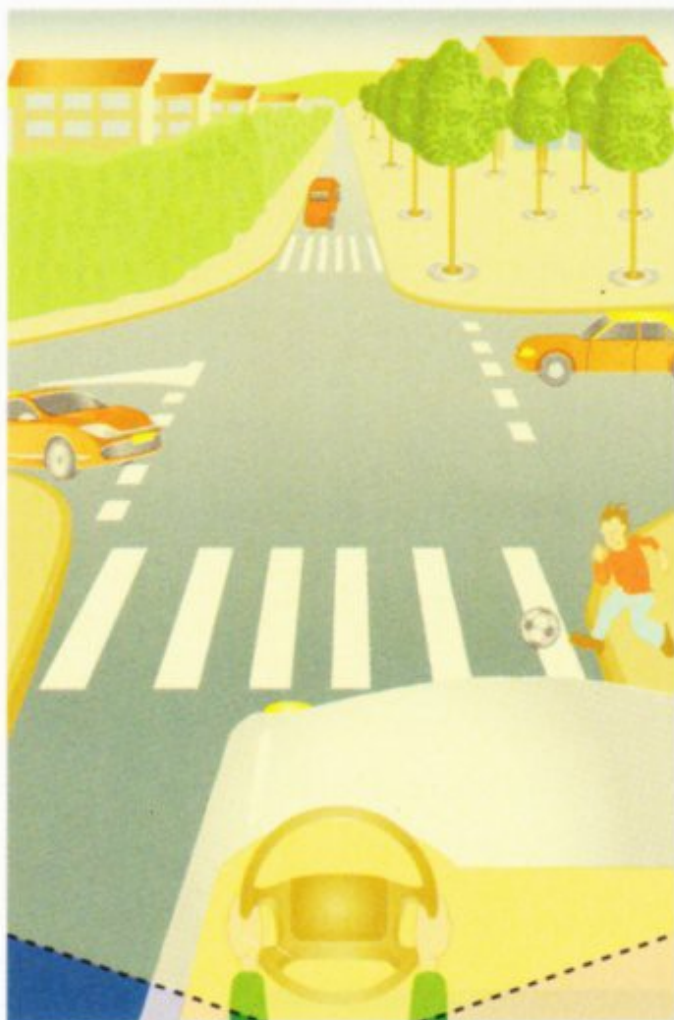
V7 : perception de l'espace



# Champ de vision

Vision humaine





**Sans alcool, champ visuel  
du conducteur : 170°**



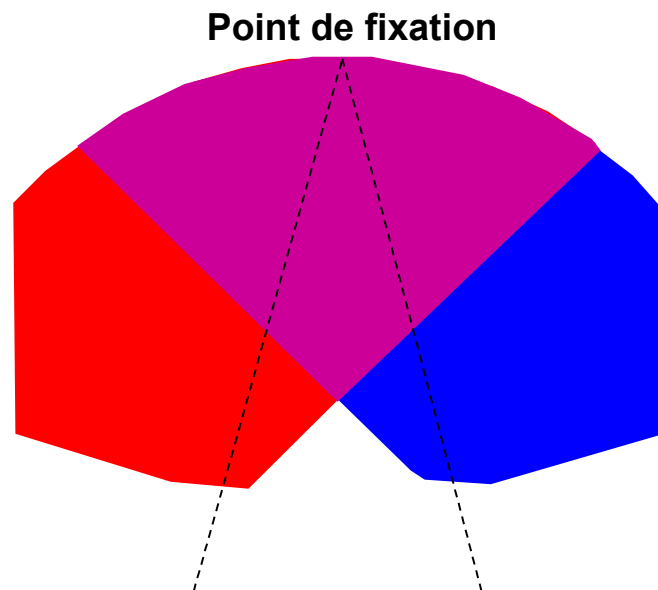
**Effet de l'alcool, champ visuel  
du conducteur : 30°**



Les humains, la plupart des primates, les oiseaux de proie et les félins possèdent une **vision binoculaire**.

Comme les deux yeux sont placés à l'avant du crâne et regardent à peu près dans la même direction, leurs champs visuels (d'environ  $170^\circ$  chacun) se chevauchent considérablement, mais captent les images sous des angles quelque peu différents.

Ceci permet la **vision stéréoscopique** (ou **vision du relief**), un moyen précis d'évaluer les distances et de situer les objets dans l'espace.



## **Remarque**

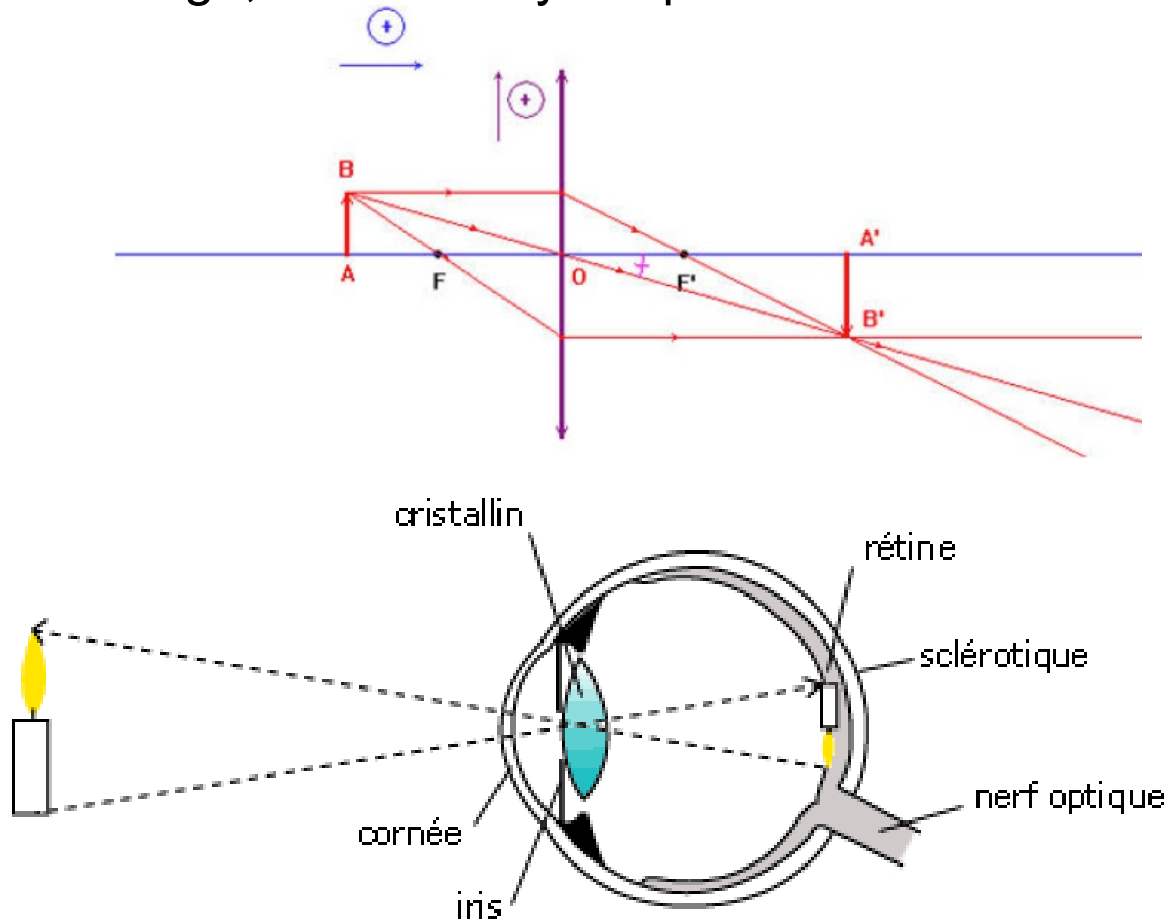
Nous avons d'autres moyens d'appréhender le relief :

- La dimension apparente d'objets de taille connue
- Effet de perspective
- L'occultation relative des objets
- Ombrage
- Atténuation atmosphérique
- etc.

→ Les borgnes ne sont pas complètement dépourvus du sens du relief.

## 4.2 Correction de la vision

L'image obtenue sur la rétine est inversée (c'est l'image d'un objet réel fournie par une lentille convergente) : grâce au cerveau qui redresse l'image, nous ne voyons pas à l'envers.



Expérience du Pr Erismann : il a fait porter à des personnes des lunettes dotées de miroirs qui inversaient les images. Au début, elles voyaient à l'envers, puis, au bout d'une semaine environ, elles ont commencé à voir à l'endroit.

Quand elles ont été habituées à revoir à l'endroit on leur a enlevé les lunettes : elles ont à nouveau vu à l'envers pendant encore environ une semaine, le temps que le cerveau rétablisse la situation.

<http://avignaud.net/retournement.html>

<https://www.youtube.com/watch?v=kPei19odPZU>



## 4.3 Fonctions visuelles et mémoire

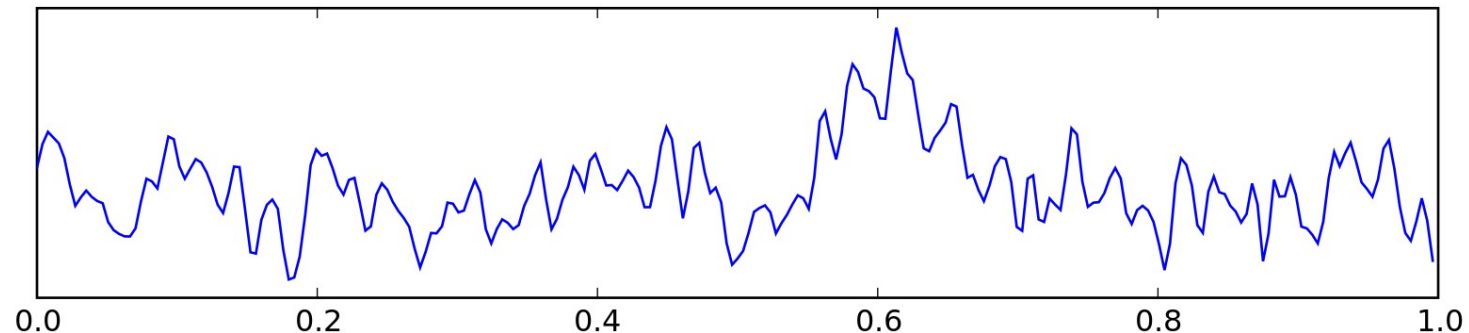
Etude du fonctionnement du cerveau par :

### **Électroencéphalographie (EEG)**

Mesure l'activité électrique du cerveau par des électrodes placées sur le cuir chevelu.

Il est difficile de déterminer quelles sont les structures cérébrales d'où provient le signal EEG qu'il soit normal ou pathologique

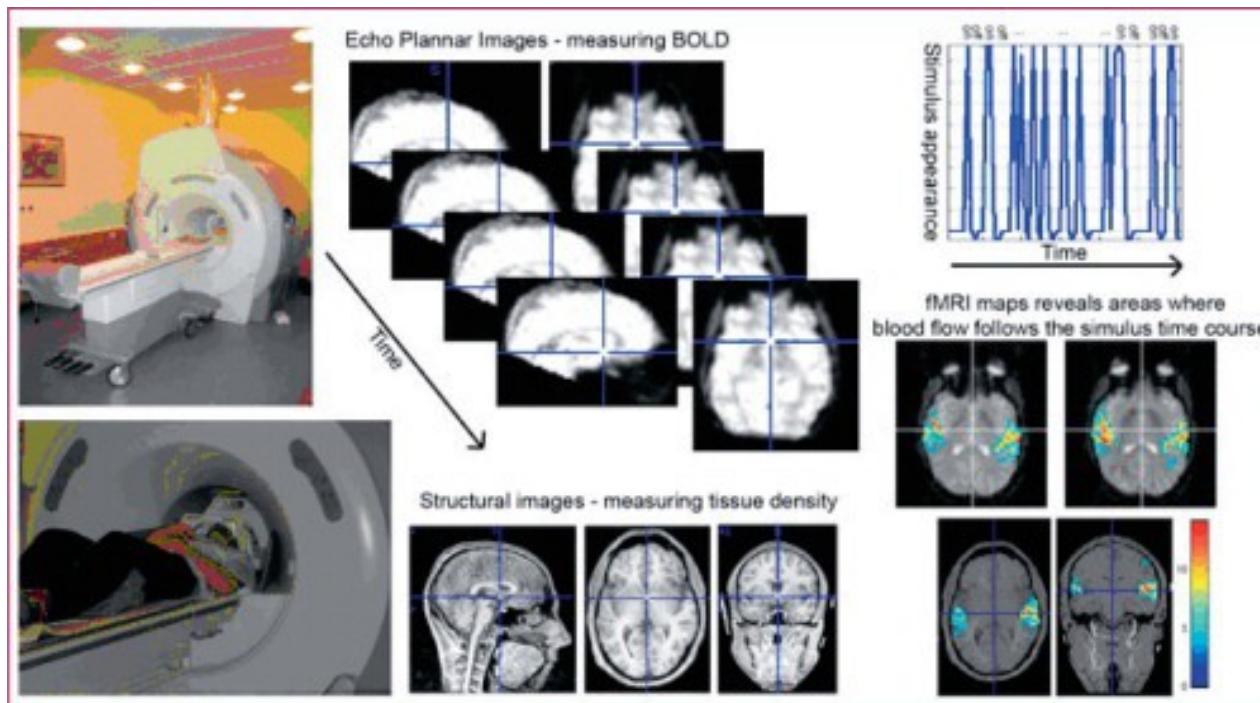
→ l'EEG est souvent utilisé conjointement avec d'autres techniques d'imagerie cérébrale (TEP, scanner, IRM).



## Imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf)

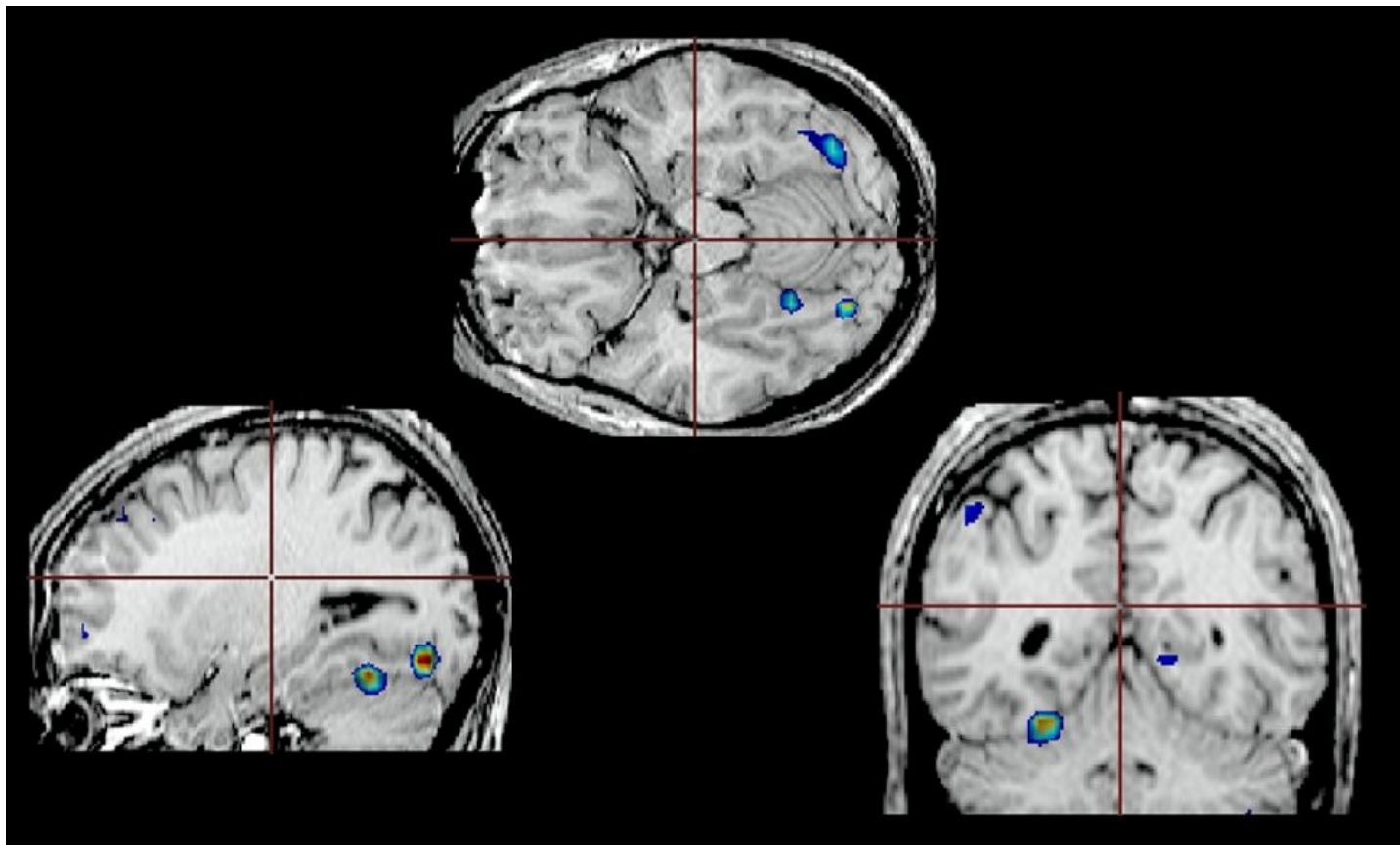
Technique d'imagerie cérébrale mesurant in vivo l'activité des aires du cerveau en détectant les changements locaux de flux sanguin.

En effet, toute activation neuronale va s'accompagner d'une augmentation locale du flux sanguin afin de couvrir les besoins métaboliques liés à cette activation. Ceci va modifier le rapport local entre oxyhémoglobine et désoxyhémoglobine, ce qui entraîne l'apparition d'un signal magnétique mesurable (signal BOLD : blood oxygen level-dependent).



## Aires corticales activées lors de la vision des couleurs

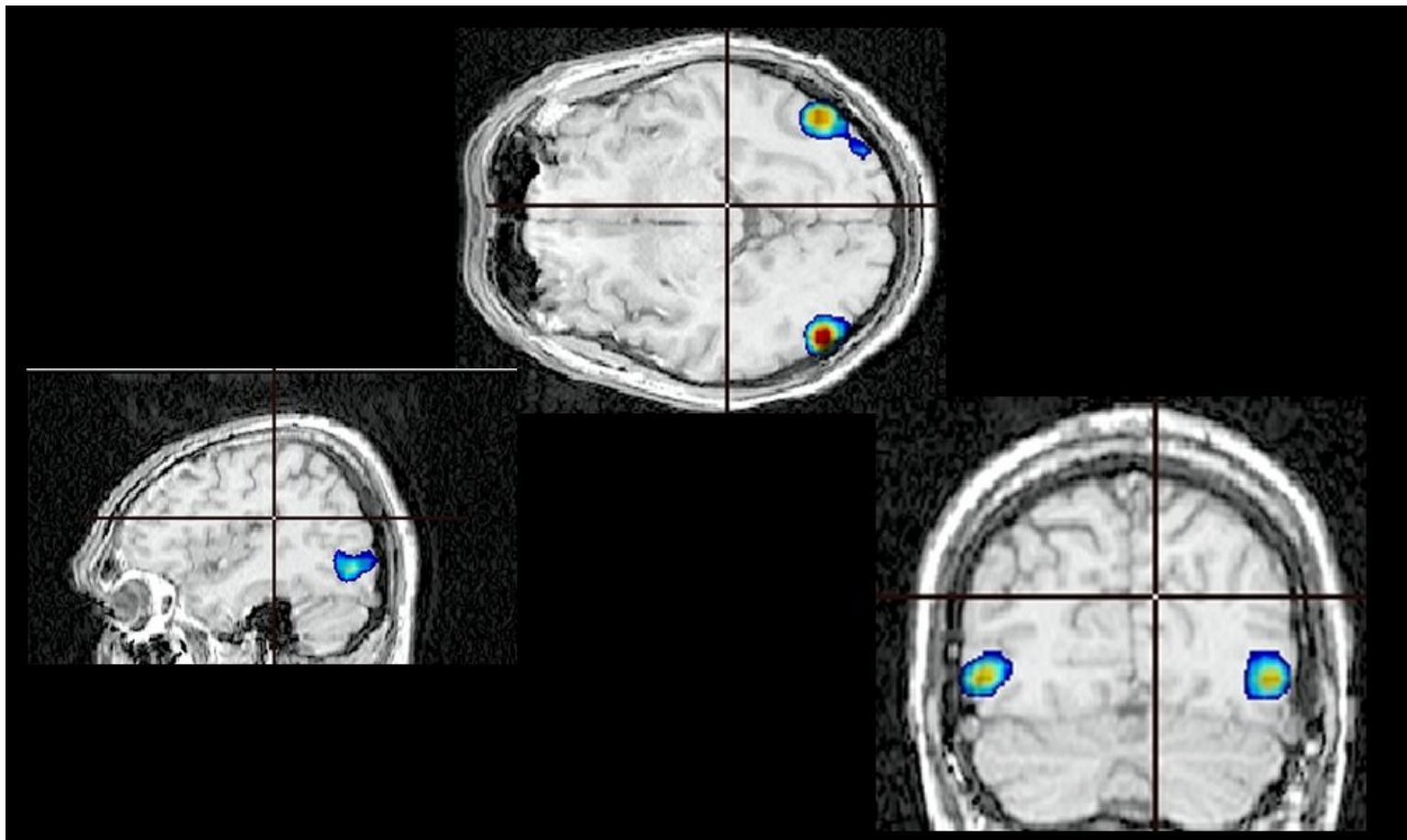
Des stimulus visuels colorés ou non sont présentés au sujet. Une image fonctionnelle des régions davantage activées par les stimulus colorés est ainsi produite puis on la superpose à une image anatomique. On met ici en évidence une aire visuelle spécialisée dans la perception des formes et des couleurs (aire V4) située au niveau du lobe occipital.





## Aires corticales activées lors de la vision des mouvements

On présente à des sujets des stimulus soit en mouvement, soit immobiles. On en déduit les régions davantage activées par les stimulus en mouvement. On met ici en évidence l'aire visuelle spécialisée dans la perception des mouvements (aire V5) située au niveau de la région temporo-occipitale.



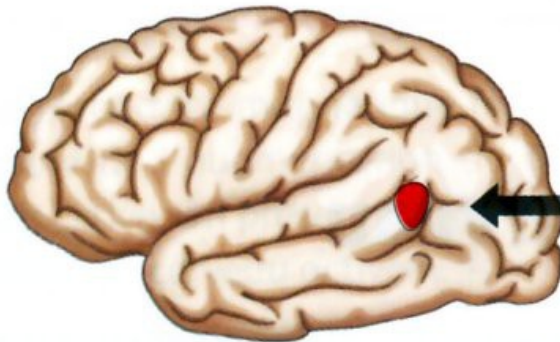


## Activité corticale lors de la reconnaissance d'un texte

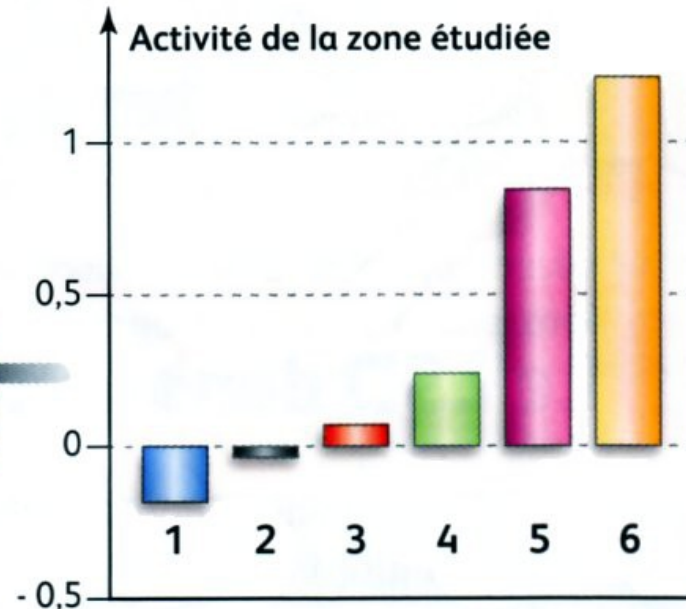
La zone de reconnaissance des mots est d'autant plus activée que les lettres sont connues, fréquentes, associables et correspondent à un mot réel.

1	2	3	4	5	6
Lettres inconnues	Lettres peu fréquentes	Lettres fréquentes	Deux lettres fréquentes	Quatre lettres fréquentes	Mot
ЛПЖґЂЎ	JZWYWK	QOADTQ	QUMBSS	AVONIL	MOUTON

Localisation de la zone étudiée



Activité de la zone étudiée



## Perception visuelle et interprétation

Chez un lecteur entraîné un mot est analysé dans son ensemble, comme une entité, et non syllabe par syllabe ou lettre par lettre. Ce n'est pas le cas chez un enfant qui apprend à lire.

Norte cervaeu ne tardiut pas excatenmt ce que viot norte oiel. Influencé par son aqucis, il reocnniat globaelmnet les mnots, sans se perocucper de l'odrre des letters. Les permèire et dernèire letetrs lui sufifsnet. Si l'oiel viot une sucssessoins de lettrtes, le crevaeu prned le mot cmome un tuot et le comprae à un mot qu'il conanît.

## Perception visuelle et interprétation

Regarder l'image et dire rapidement à haute voix la couleur et non pas le mot :

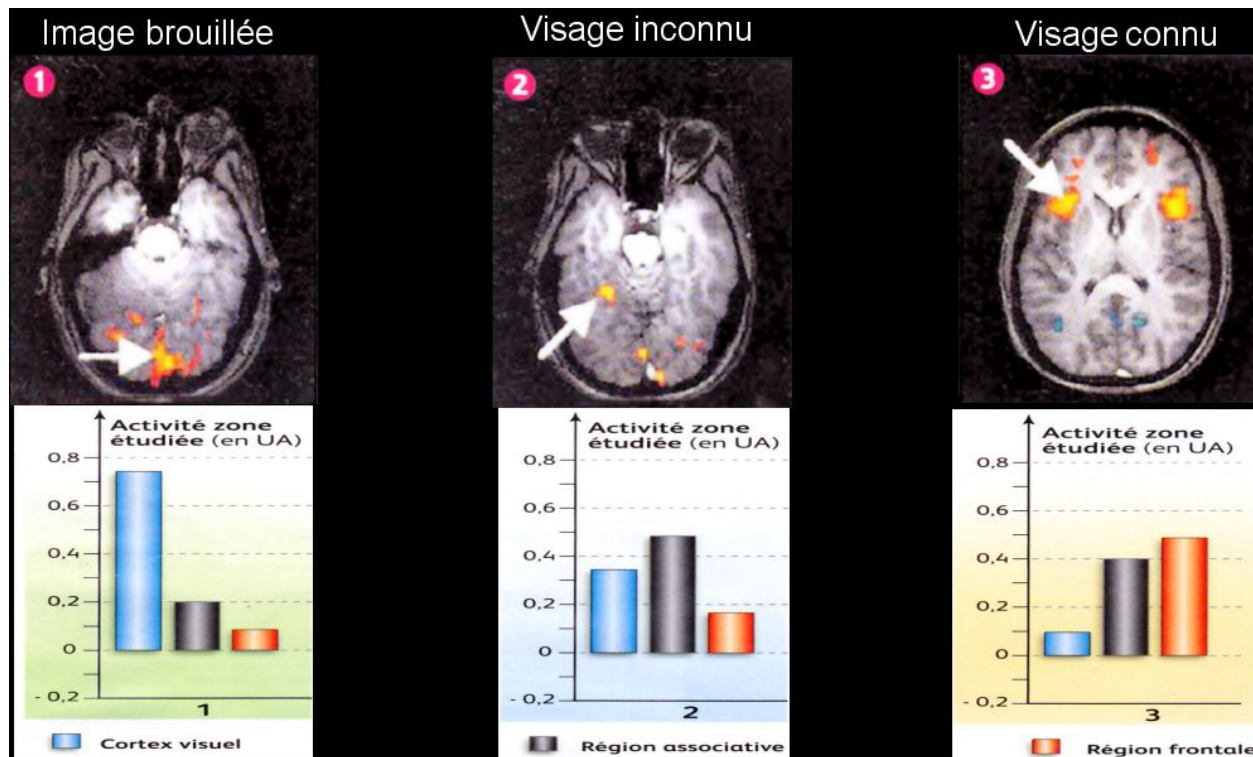


Le temps nécessaire à l'identification de la couleur est beaucoup plus long lorsque le mot est incongruent (le mot "bleu" écrit en "rouge") que lorsque le mot est congruent (le mot "rouge" écrit en rouge) ou neutre (le mot "lion" écrit en rouge). Il existe un effet d'interférence, ou effet Stroop, provoqué par la lecture automatique du mot.

## Reconnaissance d'un visage (IRMf)

Si on présente des images à un sujet :

- 1) Une image brouillée : tentative de reconnaissance par le cortex occipital, la mémoire ne peut pas intervenir.
- 2) Un visage inconnu : activation d'une aire associative.
- 3) Un visage connu : une aire frontale intervient dans sa reconnaissance.



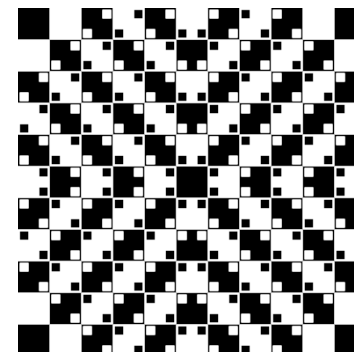
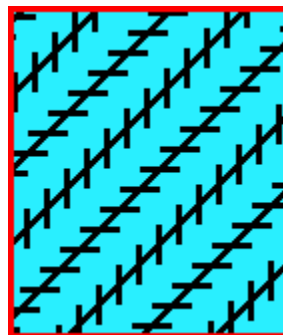
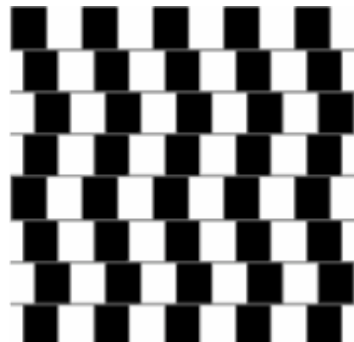
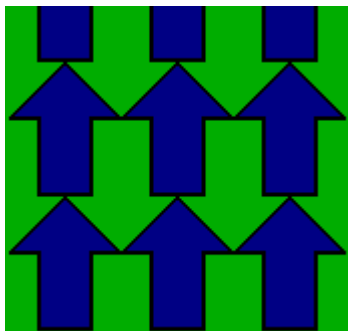
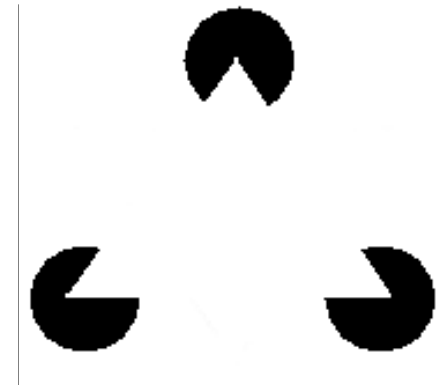
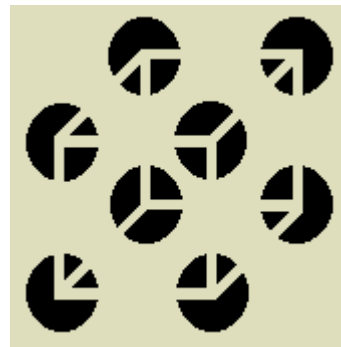
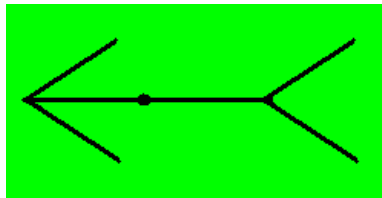
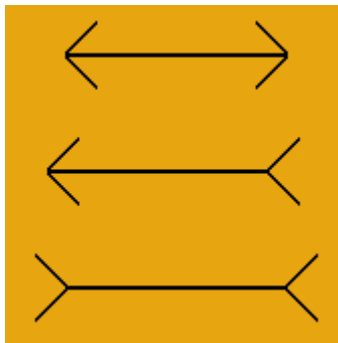
# Illusions d'optique

L'image "physique" formée au fond de l'œil, analysée point par point, puis transmise au cerveau sous forme de messages codés est en principe la même pour tous.

Ce sont les zones visuelles du cerveau qui analysent ces signaux et nous donnent une représentation de l'objet perçu.

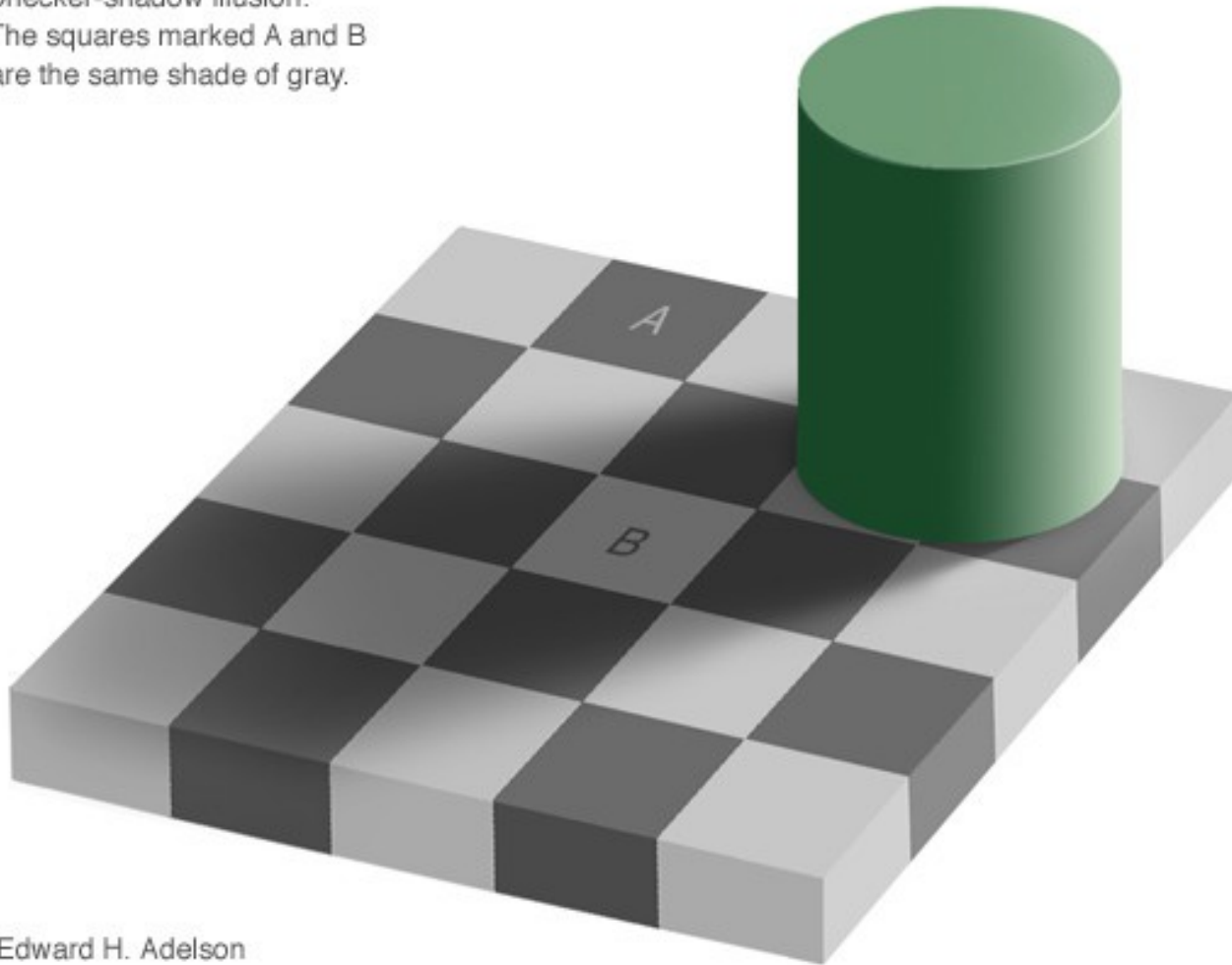
L'interprétation qu'en fait le cerveau peut parfois être ambiguë. Ces "erreurs" d'interprétation sont des **illusions d'optique**, qui ne sont pas perçues de la même façon par chacun d'entre nous (nous n'avons pas tous le même "vécu", ni la même culture, ni les mêmes images en mémoire).

## Exemples d'illusions d'optique



## Exemples d'illusions d'optique

Checker-shadow illusion:  
The squares marked A and B  
are the same shade of gray.



Edward H. Adelson