



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Université Abou bakr Belkaid- Tlemcen**

**Faculté de Médecine**



**Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de  
docteur en médecine**

*Thème*

***L'électrorétinogramme (ERG)***

**Présenté par :**

- DJAMEI Omar
- MESBAHI Safaa

**Sous l'encadrement du :**

- Pr. BOUSSALAH M.
- Dr. BRAHAMI D.
- Dr. ZERGA I.H.

**Année universitaire 2017-2018**

**Session Octobre 2017**

## Liste des figures

*Figure 01 : Chaîne d'acquisition électro physiologique*

*Figure 02 : Exemple de mire utilisée pour l'ERG multifocal*

*Figure 03 : Stimulation reversal*

*Figure 04 : Stimulation ON – OFF*

*Figure 05 : Seuils et domaines de la vision*

*Figure 06 : Exemple de stimulation rectangulaire et sinusoïdale*

*Figure 07 : Relation entre l'intensité du stimulus et les potentiels d'action*

**Figure 08 : Coupe de l'œil**

*Figure09 : Les cellules de la rétine*

*Figure 10: Structure des cônes et des bâtonnets*

*Figure 11: Répartition des photorécepteurs*

*Figure 12 : Les photons traversent la cornée et viennent frapper la rétine. La rétine répond sous forme de potentiels : c'est l'ERG*

*Figure 13 : Schéma d'une installation d'électrophysiologie*

*Figure 14 : Analyse de l'électrorétinogramme selon Granit*

*Figure 15 : Patient équipé de coques sclérales*

*Figure 16 : Atteintes des cônes*

*Figure 17 : Atteintes des bâtonnets*

*Figure 18 : Atteintes des couches internes*

*Figure 19 : Tracé d'un P-ERG normal*

## Liste des abréviations

**AV** : acuité visuelle

**CV** : champ visuel

**ERG** : Eléctrorétinogramme

**ISCEV** : International Society for Clinical Electrophysiology of Vision

**OCT** : Tomographie en cohérence optique

**OG** : œil gauche

**OD** : œil droite

**PA** : Potentiels d'action

**PEV** : Le potentiel évoqué visuel

**PR** : Potentiels de récepteurs

# SOMMAIRE

## Introduction

I. Les bases physiques.....	04
A. La stimulation visuelle.....	05
1. Structure .....	05
a) Stimulations non structurées	
b) Stimulations structurées	
2. Photométrie .....	07
a) Eclairage.....	07
- Intensité lumineuse	
- Flux lumineux	
- Eclairement	
- Luminance	
b) Contraste.....	10
3. Taille du champ rétinien stimulé.....	10
4. Ambiance lumineuse.....	10
5. Géométrie du stimulus.....	11
6. Caractéristiques chromatiques.....	11
7. Caractéristiques temporelles .....	11
B. Optique physiologique .....	12
1. La lumière dans l'œil.....	12
2. Le bruit de fond lumineux.....	12
C. La physiologie de la vision.....	13
D. Itinéraire de l'information.....	16
II. Electrophysiologie visuelle .....	17
A. Le message nerveux : nature, genèse et propagation .....	17
1. Potentiel de repos fibre nerveuse .....	17
2. Potentiel d'action .....	17
3. Propagation du message nerveux .....	17
4. Genèse des messages nerveux afférents .....	18

B. Anatomie de la retine.....	19
1. la rétine .....	19
2. Cônes et bâtonnets.....	21
3. Cellules bipolaires.....	24
4. Cellules horizontales.....	25
5. Cellules amacrines.....	25
6. Cellules ganglionnaires.....	25
C. Le nerf optique et le cortex visue .....	25
III. Electrorétinogramme (ERG).....	26
A. Définition.....	26
B. Le recueil des signaux bio-électriques .....	26
1. Les électrodes.....	27
2. L'instrument de mesure.....	27
a) Amplification.....	27
b) Filtrage.....	28
c) Traitement du signal.....	29
d) Système informatique.....	29
C. La représentation des résultats.....	30
1. Représentation graphique .....	30
2. Représentation statistique.....	30
D. Les différents types d'ERG et indications.....	30
1. L'ERG Ganzfeld ; global ; plein champ .....	30
a) Principe.....	30
b) Réalisation.....	32
c) Résultats.....	34
d) Intérêt en pathologie.....	36
2. L'ERG Pattern , damier.....	38
a) Principe .....	39
b) Réalisation.....	39
c) Intérêt en pathologie.....	39
3. L'ERG multifocal.....	40
a) Principe.....	40
b) Réalisation.....	41
IV. A-propos d'un cas.....	42

Conclusion  
Bibliographie

# Introduction

L'œil est un organe spécifique qui représente une opportunité scientifique unique. Cet organe offre un agencement de structures cellulaires qui lui confère une fonction neurosensorielle propre. Ce tissu est responsable de la formation du message visuel tel qu'il pourra être reconnu par le cerveau.

La lumière, plus particulièrement les photons, en venant taper sur le fond de ce véritable instrument d'optique déclenche une cascade de réactions biochimiques. Finalement, l'énergie lumineuse reçue sera transformée en énergie électrique ; on pourra donc recueillir ces potentiels électriques et les analyser.

Plusieurs types d'exams ophtalmologiques utilisent ce principe. Nous nous intéresserons ici à l'électrorétinogramme qui est un examen fonctionnel de la rétine.

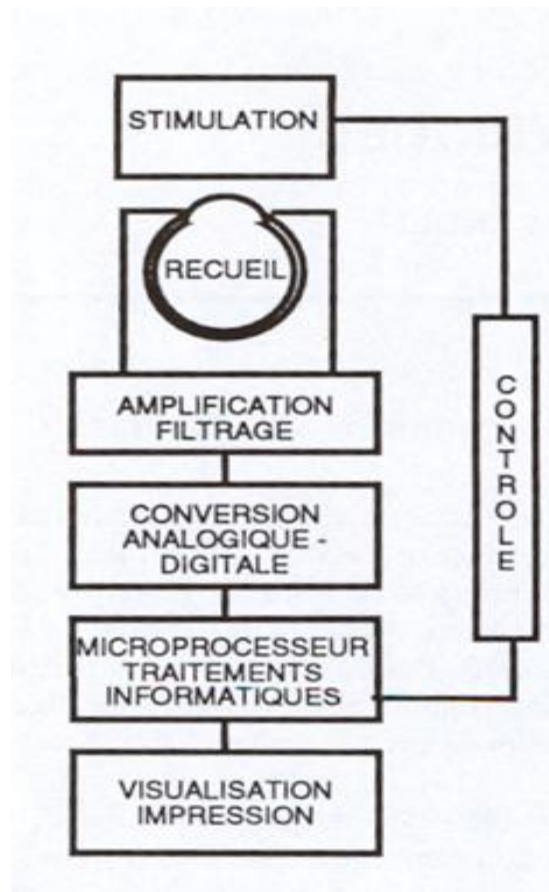
Les variations de potentiel, reflet des modifications d'activité de nombreuses cellules, sont enregistrés après avoir traversé différentes structures de paramètres physiques et électriques variables.

L'utilisation de stimulations spécifiques permet de distinguer les activités de groupes de cellules. Ainsi, on pourra diagnostiquer précisément la zone de la rétine atteinte.

# I . Les bases physiques

Une chaîne d'acquisition électro physiologique (*Figure 1*) comporte plusieurs étapes :

la stimulation visuelle, le recueil des signaux bioélectriques, les traitements informatiques et/ou statistiques qui leurs seront appliqués, le stockage et la sortie des résultats.



*Figure 01 : Chaîne d'acquisition électrophysiologique.*

Le résultat d'un examen électro-physiologique dépend d'une chaîne de mesure complète dont chaque maillon joue un rôle important.

Analysons chacun des maillons de cette chaîne depuis la stimulation jusqu'à la digitalisation du signal recueilli.

## A. La stimulation visuelle

Afin de mesurer la réponse de l'œil à une excitation, il faut s'assurer que l'examen se déroule dans des conditions standardisées **reproductibles**.

Cette démarche commence par le contrôle des caractères physiques du stimulus à quantifier pour disposer d'un appareil calibré. Il faut en conséquence définir certaines unités de mesure.

Plusieurs paramètres permettent de définir les caractéristiques de la stimulation.

### 1. Structure

Deux types de stimulations sont couramment utilisés :

#### a) Stimulations non structurées

Les stimulations non structurées, comme les flashes lumineux, sont produites par une lampe à décharge ou à incandescence associée à un obturateur ou encore par un écran cathodique. Les éclairs sont produits par des diodes électroluminescentes de différentes couleurs. De telles sources permettent de générer des éclairs de courte durée de l'ordre de 1 ms à 5 ms. L'inconvénient principal de ces sources est que le champ visuel stimulé et le

niveau d'ambiance lumineuse de l'environnement ne sont pas contrôlés. Pour résoudre ce problème, on utilise une stimulation en coupole blanche : le niveau d'ambiance est défini avec précision par le fond lumineux de la coupole et la lumière générée par la source d'éclairs se répartit sur toute la surface assurant une stimulation homogène de la rétine.

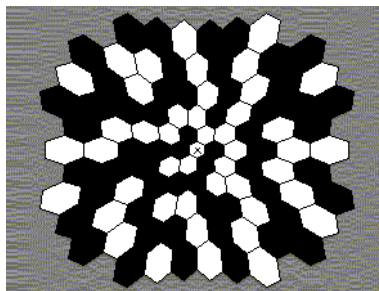
#### b) Stimulations structurées

Les stimulations structurées, nécessaires pour recueillir le Pattern-ERG et l'ERG multifocal, sont caractérisées par la présence de contours ou d'une modulation spatiale. Ce sont des mires de différentes sortes ou « patterns », le plus souvent générés par un écran cathodique.

La description exhaustive des types de mires de stimulation utilisées en Électrophysiologie visuelle est impossible. Nous ne verrons donc que les principales.

On utilise le plus fréquemment le damier noir et blanc, cependant des barres verticales ou horizontales, principalement utilisées pour l'étude de la perception du contraste, peuvent être employées.

Pour l'étude de l'ERG multifocal, on utilise des mires comprenant de nombreux éléments (jusqu'à 256) ayant une forme hexagonale. L'inversion de chaque élément se fait de façon pseudo-aléatoire telle que la moitié des éléments restent clairs et l'autre moitié restent sombre à chaque changement.



*Figure 02 : Exemple de mire utilisée pour l'ERG multifocal.*

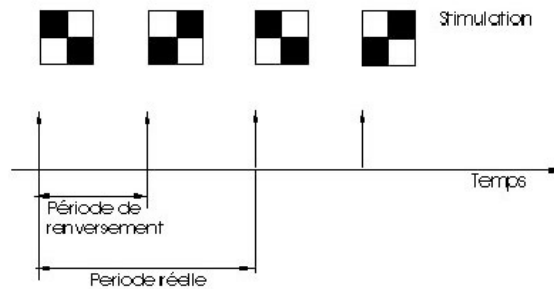


On distingue deux types de changement de structure :

**(1) Stimulation reversal**

Elle consiste à remplacer la première structure (barres, damiers) par une structure identique en "négatif" : les parties blanches deviennent noires et vice versa. (Figure 3)

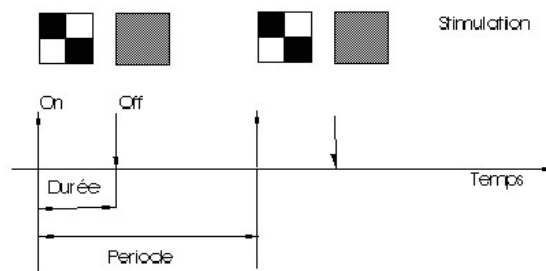
La stimulation est une stimulation par renversement (reversal) de structure. La durée de présentation de l'une ou l'autre structure est identique. Le système visuel perçoit indifféremment l'une ou l'autre structure et répond de la même façon. La période de stimulation correspond alors à la période de renversement de la structure. La synchronisation s'effectue à chaque renversement.



**Figure 03 : Stimulation reversal.**

**(2) Stimulation ON -OFF :**

Le second type de changement de structure consiste à remplacer la première structure par un fond uniforme gris de même luminance (Figure 4). La durée d'apparition de la structure et sa période de présentation sont les variables temporelles de la stimulation. Le système répond à l'apparition (ON) et à la disparition (OFF) de la structure de manière différente. La période de stimulation correspond alors la période de présentation de la structure. La synchronisation peut s'effectuer sur l'apparition de la structure (ON) ou sur sa disparition (OFF).



**Figure 04 : Stimulation ON – OFF.**

## 2. Photométrie

Elle concerne ses aspects énergétiques et chromatiques. A partir des grandeurs énergétiques ont été définies des grandeurs lumineuses qui tiennent compte des caractéristiques de récepteur oculaire.

La photométrie énergétique est l'étude purement physique de la lumière.

### a) Eclairage

Il est difficile de parler objectivement de l'éclairage sans rappeler quelques notions simples de photométrie qui est la science de la mesure des intensités lumineuses.

Ses données de base sont l'intensité, le flux lumineux, l'éclairement et la luminance. Ces quatre facteurs sont liés comme ceci : une source d'éclairage artificielle – ici, les flashes ou les structures – rayonne dans toutes les directions de l'espace un *flux lumineux* dont l'unité est le lumen (lm). Ce flux a, dans une direction donnée, une certaine *intensité* exprimée en candelas (cd) ; une surface – ici, la rétine - placée à une distance donnée de la source, reçoit un *éclairement* qui s'exprime en lux (lx). Enfin, la surface éclairée renvoie une partie de l'éclairement reçu : c'est la *luminance* exprimée en candelas par mètre carré ( cd.m<sup>2</sup>)

- 1- **Intensité lumineuse** : est une grandeur qui exprime la capacité à éclairer d'une source ponctuelle de lumière dans une direction donnée.

L'intensité lumineuse est la grandeur photométrique de base dans le système international d'unités. Elle se mesure en candela (cd). L'intensité ne se mesure pas directement ; mais on a pu définir, de plusieurs manières au cours du temps, un étalon. Elle sert principalement pour établir la répartition de la lumière qu'émet un luminaire ou une surface éclairée selon la direction.

- 2- **Flux lumineux** : indique la quantité globale de lumière qu'une source émet dans toutes les directions.

Intensité lumineuse : indique le flux lumineux émis par unité d'angle dans une direction donnée

- 3- **Eclairement** : Flux lumineux reçu par mètre carré. Connaissant l'intensité lumineuse et la distance de la source à la surface éclairée, on peut calculer l'éclairement  $E_v$  en divisant l'intensité lumineuse  $I_v$  par le carré de la distance  $d$  (en mètres).

$$E_v = \frac{I_v}{d^2}$$

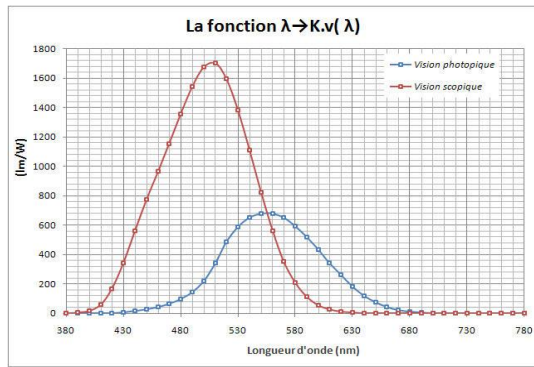
- 4- **Luminance** : quotient de l'intensité lumineuse d'une surface par l'aire apparente de cette surface.

Les niveaux de luminance en photométrie visuelle :

Le niveau *photopique* correspond à la vision diurne, colorée, d'action des cônes

Le niveau *scotopique* correspond à la vision nocturne, incolore, d'action des bâtonnets

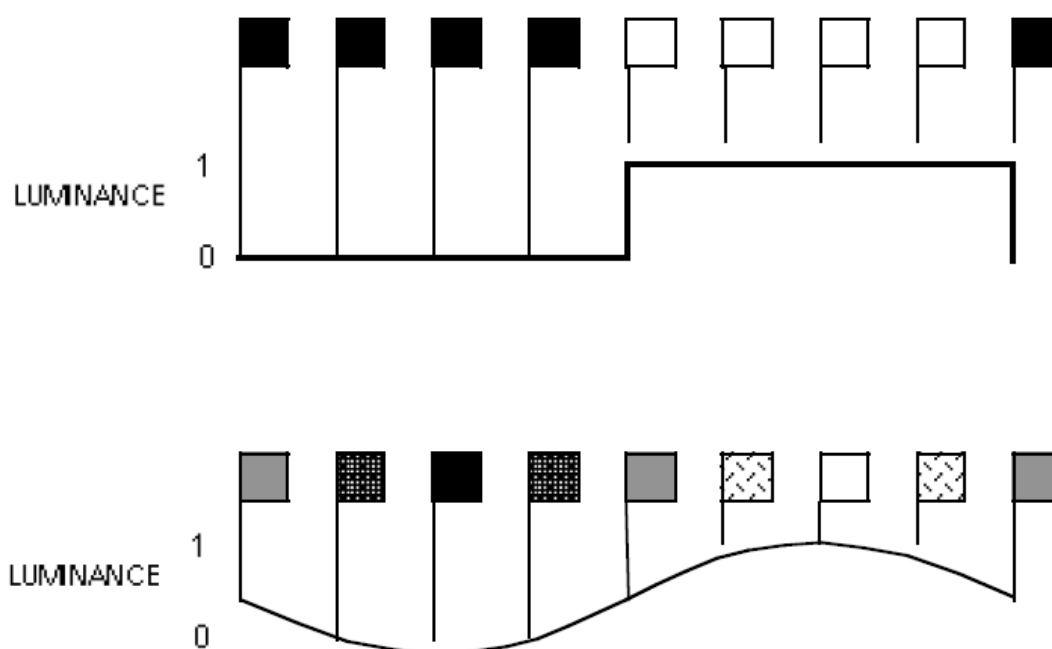
Le niveau *mésopique* est situé entre les deux précédents. Ses limites sont assez floues : il correspond à la vision crépusculaire, d'action des cônes et des bâtonnets.



Domaine	Luminance	Photo récepteur	Seuils	Exemples
Domaine de l'éblouissement			<i>seuil des lésions</i>	héliotraumatisme
			<i>seuil d'incapacité</i>	neige au soleil
			<i>seuil d'inconfort</i>	éclairage intérieur
Domaine photopique	$5 \times 10^{-3}$	cônes	<i>seuil des cônes</i>	zone optimale pour la lecture
	$10^{-3}$ nit			éclairage urbain de nuit
Domaine mésopique			<i>seuil photopique</i>	nuit très claire sans lune
	$10^{-4}$ nit		<i>seuil chromatique</i>	surface blanche sous pleine lune
Domaine scotopique	$4 \times 10^{-6}$	bâtonnets	<i>seuil morphoscopique nocturne</i>	
	$10^{-6}$ à		<i>seuil des bâtonnets</i>	
	$10^{-7}$ nit		<i>seuil lumineux terminal brut</i> <i>seuil atteint par quelques sujets</i>	nuit noire

*Figure 05 : Seuils et domaines de la vision.*

Pour les deux types de stimulation, (flash ou structure), la luminance peut varier dans le temps selon toute fonction temporelle. Les fonctions rectangulaire et sinusoïdale sont les plus couramment utilisées (*Figure 06*).



*Figure 06 : Exemple de stimulation rectangulaire et sinusoïdale.*

Ces fonctions sont en effet facilement décomposables dans le domaine des fréquences. Cette décomposition fréquentielle simplifie la caractérisation du système visuel. Si la stimulation sinusoïdale semble la mieux appropriée pour la modélisation des fonctions visuelles, sa réalisation pratique est beaucoup plus difficile qu'une stimulation de type rectangulaire.

Le principe de superposition des systèmes linéaires permet de prédire la réponse à tout type de stimulation, à partir de la seule connaissance des réponses à un signal sinusoïdal pour toutes les fréquences. En faisant l'hypothèse que le système visuel est un système linéaire, la connaissance des réponses aux stimulations de type stable est équivalente à la connaissance des réponses aux stimulations de type unitaire.

L'hypothèse de la linéarité du système visuel n'est vérifiée que pour certaines conditions de stimulation. Par exemple pour une stimulation en luminance, le système visuel est linéaire aux faibles intensités. Des non-linéarités apparaissent aux fortes intensités avec la saturation des réponses et les phénomènes d'adaptation. Ces non-linéarités sont mises en évidence par l'apparition de réponses aux fréquences harmoniques de la stimulation. En conséquence, les stimulations unitaires et stables ne sont pas toujours équivalentes pour l'étude des fonctions visuelles.

L'utilisation combinée des ces deux méthodes apporte des informations supplémentaires.

On doit considérer la luminance moyenne de l'écran. On mesure avec un luminancemètre la luminance de la partie claire ( $L_c$ , carrés blancs) et de la partie sombre ( $L_s$ , carrés noirs) du stimulus. On définit la luminance moyenne

comme  $\frac{L_c+L_s}{2}$  : elle devrait être égale ou supérieure à 80 cd.m<sup>-2</sup>.

### b) Contraste

Le facteur de modulation du contraste ( $F_c$  en %) est donné par la formule de Michelson

$$F_c = 100 \times \frac{L_c - L_s}{L_c + L_s}$$

Il doit pouvoir être supérieur à 75 % pour les examens réalisés à contraste maximum. Lorsque l'on stimule avec des damiers apparaissant et disparaissant sur un écran avec un fond gris, la luminance du fond gris doit être égale à la luminance moyenne du damier.

## 3. Taille du champ rétinien stimulé

La taille du champ rétinien stimulé dépend de la taille de l'écran. Par exemple un écran de 50 cm de diagonale a une largeur de 40 cm et une hauteur de 30 cm. Situé à 1 m de distance du patient, il couvre horizontalement un champ visuel de part et d'autre de l'axe visuel  $\theta$  tel que  $\tan\theta$  soit égal à la largeur de la moitié de l'écran divisée par la distance à l'écran.

Dans notre exemple :  $\tan\theta = \frac{20}{100} = 0.2$

De même il couvre verticalement un champ visuel de part et d'autre de l'axe tel que

$$\tan\theta_v = \frac{15}{100} = 0,15$$

-Soit un champ total de 22° horizontalement et 17° verticalement.

-En pratique clinique le champ total doit être plus large que 15° (**normes ISCEV**)

## 4. Ambiance lumineuse

Elle permet d'imposer le niveau d'adaptation des photorécepteurs. Elle peut être réalisée par des sources lumineuses spécifiques avec éventuellement un système de calibration (par exemple dispositif d'éclairage d'une coupole diffusante) ou plus simplement par l'éclairage de la pièce.

## 5. Géométrie du stimulus

Elle est caractérisée par l'angle sous lequel il est perçu. Il peut s'agir d'un champ total couvert par le stimulus ou de celui correspondant à un motif élémentaire (pas d'un réseau, carré d'un damier...). Pour les stimulations structurées, on définit également la fréquence spatiale en nombre de cycles par degré.

La fréquence spatiale de la mire : lorsqu'il s'agit d'un réseau constitué de barres noires et blanches à modulation sinusoïdale de contraste, on préfère la notation en fréquence spatiale en cycles par degrés. Un damier diffère du réseau précédent par la variation brutale du contraste entre chaque élément. En conséquence il se définit mieux par l'angle sous lequel il est perçu.

Certains stimulateurs champ total (couples diffusantes) permettent d'obtenir une stimulation uniforme de la rétine. Dans le cas contraire, la distance et l'orientation du regard peuvent modifier la surface de rétine éclairée.

## 6. Caractéristiques chromatiques

Les caractéristiques chromatiques sont la longueur d'onde dans le cas d'une source monochromatique, la décomposition spectrale dans le cas d'une source polychromatique, ou encore la largeur de la bande passante du filtre dans le cas d'une source pseudomonochromatique (lumière blanche avec un filtre interférentiel par exemple)

## 7. Caractéristiques temporelles

Ce sont la période exprimée en secondes ou millisecondes ou la fréquence exprimée en hertz.

## B. Optique physiologique

### 1. La lumière dans l'œil

Différents dioptries de l'oeil : Les différents milieux transparents traversés par la lumière jusqu'à la rétine montrent une série de dioptries (ensemble de deux milieux mis en contact par l'intermédiaire d'une surface de séparation) successifs où se situent des phénomènes de réfraction.

- Le dioptré cornéen antérieur
- Le dioptré cornéen supérieur: négligeable car la cornée et l'humeur aqueuse ont des indices de réfraction quasiment similaires
- Le dioptré cristallin antérieur;
- Le cristallin, composé d'une suite de couches d'indices différents!;
- Le dioptré cristallin postérieur.

En pratique, on considère un oeil simplifié comme un dioptré cornéen antérieur séparant l'air d'un milieu d'indice  $n=1,337$ , et un dioptré cristallin antérieur et postérieur d'indice moyen  $n=1,42$ .

L'éclairement rétinien :

Un point essentiel d'interface entre les variables physiques du stimulus et le récepteur rétinien sont les relations entre la luminance  $B$  d'une source et l'éclairement de son image sur la rétine. Les facteurs qui interviennent dans l'éclairement rétinien sont essentiellement la surface efficace de la pupille et la transmittance des milieux transparents de l'oeil. On sait que le diamètre pupillaire  $d$  varie avec l'éclairement selon une expression qui est de la forme  $d=f(\text{Log}B)$ , tandis que le coefficient  $\lambda \tau$  croît entre 400 nm et 700 nm de 0,1 à 0,7.

Par des considérations simples d'optique géométrique et de photométrie, on démontre que l'éclairement rétinien  $D_r$  est donné par l'expression suivante :  $D_r = 0,36B.S.\tau \lambda$  où  $B$  est la luminance en  $\text{cd.m}^{-2}$  et  $S$  la surface en  $\text{cm}^2$ . En conséquence la luminance et l'éclairement rétinien correspondant sont des quantités proportionnelles, indépendantes des dimensions de l'objet et de son éloignement. Ce qui justifie que la luminance constitue une grandeur fondamentale pour la vision des sources étendues.

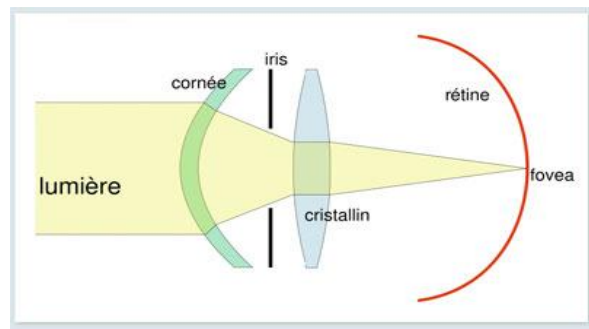
### 2. Le bruit de fond lumineux:

Lorsqu'un rayon lumineux arrive sur une partie de la rétine, il se réfléchit, se diffracte, et va donc en fait stimuler d'autres zones qui s'ajoutent à celle du départ. Il existe donc un bruit de fond lumineux car en stimulant une partie de la rétine, on reçoit sans le vouloir la réponse d'autres zones.

## C. La physiologie de la vision :

### 1- La vision, comment ça marche ?

L'œil est un système optique qui permet la formation d'une image réelle, renversée par rapport à l'objet regardé et de plus petite taille que celui-ci . Les différentes parties de l'œil sont à l'origine d'un ensemble de mécanismes de perception de la lumière. Ce sont, en effet, les rayons lumineux émis ou réfléchis dans notre environnement qui déterminent les formes, les couleurs, le relief des objets que nous percevons.



Toutes les parties de l'œil jouent un rôle dans la conversion de la lumière en images. Si l'une de ces parties est défectueuse ou atteinte d'une pathologie, il peut en résulter un trouble de la vision.

**La cornée** est une paroi transparente qui se trouve à l'avant de l'œil et le protège. Elle est très sensible à la lumière, qu'elle absorbe et dévie vers la rétine où l'image sera constituée. La cornée joue donc un rôle essentiel dans le mécanisme de réfraction des rayons lumineux.

**Le cristallin** est une lentille transparente, située juste derrière l'iris. Son rôle est de concentrer les rayons de lumière et de les projeter sur la rétine. C'est l'organe de l'accommodation, c'est-à-dire de la capacité de l'œil à ajuster sa vision et à focaliser l'image, que l'objet regardé soit lointain ou proche. Comme sa texture est élastique, le cristallin peut, grâce aux muscles intraoculaires (ciliaires), se bomber ou s'aplatir pour capter et réfléchir les rayons lumineux émis à petite ou grande distance.

**La rétine** est une membrane transparente très fine qui recouvre la partie intérieure de l'œil, de l'iris jusqu'au nerf optique. C'est dans la rétine que se trouvent les extrémités des cellules sensorielles :

- les cônes, surtout sensibles aux détails des formes et aux couleurs
- les bâtonnets, surtout sensibles à la perception des contours et mouvements.

Ces cellules sensorielles vont transformer les stimuli lumineux en stimuli nerveux, qui seront transmis au cerveau via **le nerf optique**. Le cerveau va ensuite interpréter l'image.



## 2- Comment les messages nerveux sont-ils générés ?

La **rétine** joue un rôle essentiel dans la vision : elle **convertit le stimulus visuel en message nerveux**. Cette conversion de l'énergie lumineuse se fait par des cellules sensibles à la lumière, appelées **photorécepteurs** : les cônes et les bâtonnets.

- Les cônes et les bâtonnets sont des neurones très courts qui se distinguent par leur forme et par la nature des pigments photosensibles qu'ils contiennent.

- Les **cônes** ont une résolution spatiale très élevée et sont sensibles aux formes et aux couleurs des objets ; ce sont les cellules de la vision diurne. Il en existe près de 7 millions et sont particulièrement concentrés dans la partie centrale de la rétine, appelée fovéa ou macula.
- Les **bâtonnets**, au nombre de 130 millions, sont quant à eux extrêmement sensibles à la lumière (100 fois plus sensibles que les cônes) mais aussi au mouvement ; ce sont les cellules de la vision nocturne.

- L'absorption de lumière par les pigments photosensibles des cônes et des bâtonnets modifie leurs propriétés électriques et conduit à la naissance d'un message nerveux. En effet, si la stimulation visuelle est suffisante, un **message nerveux sous forme de potentiel d'action**, constitué d'une succession de signaux électriques, est généré dans les fibres du **nerf optique**. Une variation de l'intensité du stimulus visuel se traduit alors par une variation de la fréquence des signaux électriques.

Le message nerveux ne naît pas au niveau des photorécepteurs mais au niveau des neurones ganglionnaires dont les prolongements se regroupent pour former les centaines de fibres du nerf optique. Les neurones ganglionnaires sont reliés aux photorécepteurs par les neurones bipolaires.

## 3- Quelles sont les caractéristiques de la vision ?

- La sensation visuelle peut durer plus longtemps que le stimulus qui l'a engendrée. En effet, les pigments photorécepteurs, décomposés par la lumière, mettent un certain temps pour se reconstituer. On parle alors de **persistance rétinienne**.

- La vision en couleur s'explique par l'existence de trois types de cônes, permettant chacun de voir une des couleurs fondamentales : le bleu, le vert et le rouge (Tritane Deutane Protane). Notre vision est ainsi **trichromatique**. Puisque ces cellules visuelles présentent un maximum de densité au centre de la rétine, c'est dans la partie centrale de la vision que la sensation colorée est la meilleure.

Il existe de nombreuses anomalies de la vision (**dyschromatopsie**). L'absence d'un des types de cônes – le rouge ou le vert le plus souvent – conduit par exemple au daltonisme.

- Le **champ visuel** de chaque œil est plus étendu du côté temporal que du côté nasal. En outre, l'amplitude du champ visuel dépend des longueurs d'onde reçues car les différents types de cônes ne sont pas disposés au même endroit sur la rétine. Par exemple, le champ visuel pour la lumière verte est peu étendu car les cônes sensibles au vert sont dans la partie centrale de la rétine.

- C'est juste en face de soi, au niveau du **point de fixation**, que l'**acuité visuelle** – c'est-à-dire l'aptitude à distinguer les détails des objets – est **optimale**. Dans le champ visuel périphérique, l'acuité diminue mais la perception du mouvement reste bonne.

- La vision dans des conditions de très faible éclairage est possible grâce aux bâtonnets. Cette perception, floue et grisâtre, est la **vision scotopique**. Pour des éclairages plus importants, les bâtonnets saturés sont relayés par les cônes. L'acuité est alors optimale et la vision est en couleur ; la **vision** est dite **photopique**.

#### 4- Comment les voies nerveuses qui conduisent les messages nerveux au cerveau sont-elles organisées ?

Les messages nerveux visuels générés par la rétine sont acheminés par les nerfs optiques jusqu'au cerveau.

- Le **nerf optique** de l'œil droit et celui de l'œil gauche subissent une decussation au niveau du **chiasma optique**. À cet endroit, la moitié des fibres de chacun des nerfs optiques s'entrecroisent et passent dans l'hémisphère opposé. Les autres fibres rejoignent directement le lobe occipital du cerveau, où se trouvent les centres d'interprétation de la vision. Ainsi, chaque hémisphère reçoit des informations visuelles issues des deux yeux.

- Il existe une **zone de relais**, située entre le chiasma optique et le cortex visuel, dans laquelle toutes les fibres des nerfs optiques sont en **connexion synaptique** avec d'autres neurones qui conduisent les messages jusqu'au cortex visuel. La transmission du message nerveux se fait alors par l'intermédiaire de substances chimiques, les **neurotransmetteurs**.

Ainsi, certaines substances hallucinogènes, en se fixant sur les récepteurs de ces neurotransmetteurs, modifient la perception visuelle.

#### 5- Quelles sont les zones du cerveau mobilisées par la vision ?

Différentes régions du cerveau sont impliquées dans le processus de la vision : le cortex visuel primaire mais aussi différentes aires cérébrales spécialisées.

- Après avoir franchi la zone de relais, la plupart des messages nerveux visuels arrivent dans une aire située à l'arrière du cortex occipital de chacun des deux hémisphères. Ces deux aires cérébrales forment le **cortex visuel primaire V<sub>1</sub>**. Chacune d'entre elles reçoit des informations provenant des deux yeux. Ainsi, toute lésion située dans cette zone provoque une cécité plus ou moins prononcée.

- Parallèlement, certaines informations visuelles arrivent directement dans différentes **aires visuelles spécialisées** tel que **V<sub>4</sub>** dans le traitement de la **couleur**, des **formes** ou encore des **mouvements**.

- Ainsi, toutes les informations concernant une image sont traitées en parallèle. Leur intégration et les échanges entre l'ensemble de ces aires permettent ensuite d'avoir une perception globale et unifiée.

#### 6- Peut-on développer ses capacités visuelles ?

- Les **gènes** interviennent dans l'organisation et la structure du **cortex visuel** et sont, par conséquent, impliqués dans la perception visuelle. Ces structures sont similaires chez tous les individus, ce qui donne initialement à chacun les mêmes potentialités visuelles.

À condition d'être stimulées, les capacités visuelles se développent entre 0 et 10 ans, en même temps que le cerveau.

- En outre, l'**environnement** et l'**expérience individuelle** ont une influence sur les structures corticales mises en jeu dans la vision.



## II. Electrophysiologie visuelle

### A. Le message nerveux : nature, genèse et propagation

#### 1. Potentiel de repos d'une fibre nerveuse:

Toutes les cellules vivantes sont polarisées. En effet, en l'absence de stimulation, il existe une différence de potentiel entre les deux faces de la membrane plasmique : l'intérieur est chargé négativement et l'extérieur est chargé positivement. La membrane, au repos, est perméable aux ions  $K^+$  et imperméable aux ions  $Na^+$ . Cette tension électrique entre les deux faces de la membrane, le potentiel de repos ou potentiel membranaire, est exprimé négativement pour rappeler que l'intérieur de la membrane est négatif par rapport à l'extérieur. La valeur du potentiel de repos varie selon les types cellulaires de -30 à -70 mV mais il est toujours polarisé dans le même sens.

#### 2. Potentiel d'action:

Si l'on apporte sur la surface du neurone une tension suffisamment élevée tous les ions  $Na^+$  vont envahir l'intérieur de la cellule alors que les ions  $K^+$  vont en sortir. Les courants entrant et sortant engendrés par ces déplacements ioniques se traduisent par une différence de potentiel brutale que l'on appelle potentiel d'action. Le potentiel d'action est une modification provoquée et passagère du potentiel de repos en un point de la fibre nerveuse. Il est caractérisé par une inversion de polarité de la membrane, le compartiment intracellulaire devenant positif par rapport à l'extérieur. Un potentiel d'action n'apparaît que lorsque le potentiel de récepteur (dépolarisations localisées de la membrane) a atteint ou dépassé une valeur de dépoliarisation appelée seuil de genèse d'un potentiel d'action (ou seuil de potentiel).

#### 3. Propagation du message nerveux:

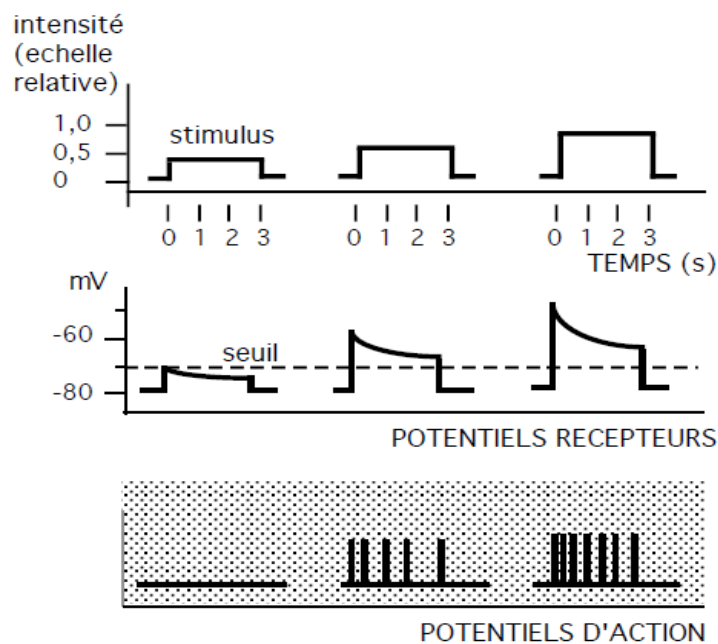
La présence d'un potentiel d'action en un point d'une fibre nerveuse crée dans les milieux intra- et extracellulaires des courants électriques. Ces courants locaux entraînent la dépoliarisation de la membrane de part et d'autre du point origine jusqu'à atteindre le seuil de potentiel et déclencher un potentiel d'action. Dès l'apparition d'un potentiel d'action en un point, le processus peut recommencer. Le potentiel d'action se propage en gardant ces caractéristiques inchangées mais au-delà d'un certain seuil la fréquence des potentiels d'action est d'autant plus grande que l'intensité du stimulus est grande. Il n'y a jamais retour d'un potentiel d'action vers le point d'origine car, après une dépoliarisation, la membrane est inactivée tant qu'elle n'a pas retrouvé son état de polarisation initial. L'existence de cette « période réfractaire » permet la propagation du message nerveux. La vitesse de propagation du message nerveux augmente avec le diamètre de la fibre.

#### 4. Genèse des messages nerveux afférents:

Au niveau d'une cellule sensorielle, le stimulus spécifique provoque une modification du potentiel de la membrane : le potentiel récepteur. L'amplitude de ce potentiel est proportionnelle à l'intensité du stimulus ; un potentiel d'action apparaît, au niveau d'un site générateur, lorsque le potentiel de récepteur atteint le seuil de déclenchement des potentiels d'action. La fréquence des potentiels d'action est fonction de l'amplitude du potentiel récepteur qui parvient au site générateur.

Les neurones génèrent, transportent, intègrent et transmettent des signaux électriques, support de l'information nerveuse. Ils peuvent être transmis d'un neurone à un autre au travers de régions de contact : les synapses.

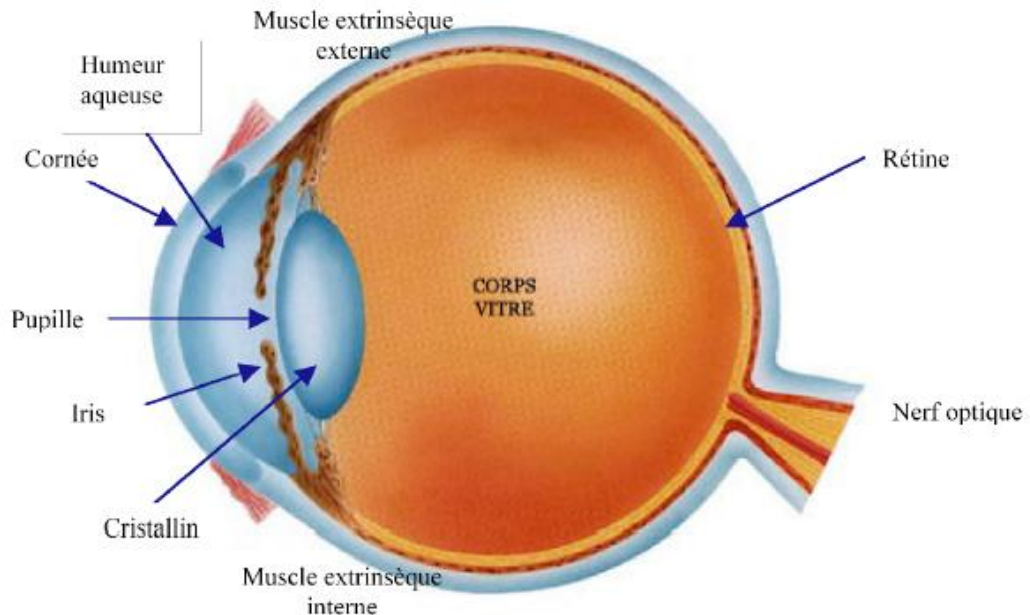
La transmission s'effectue soit directement, comme une petite onde électrique, soit indirectement, via la libération, par le neurone situé en amont, d'une substance chimique : un neurotransmetteur. Ce neurotransmetteur est ensuite reconnu par des récepteurs spécifiques. Ces derniers activent alors, directement ou non, des protéines spéciales qui forment des canaux au travers desquels des courants ioniques peuvent circuler de part et d'autre de la membrane. Ces courants ioniques engendrent à nouveau des variations du potentiel transmembranaire. Cette cascade de réactions biochimiques est responsable de la génération de nouvelles variations électriques dans le neurone suivant. Et ainsi, de proche en proche, les signaux circulent dans des réseaux de neurones interconnectés.



*Figure 07 : Relation entre l'intensité du stimulus et les potentiels d'action.*

## B. Anatomie de la rétine

### 1. la rétine



**Figure 08 : Coupe de l'œil.**

L'œil est l'organe sensoriel de la vision. Il est constitué de milieux transparents entourés par une coque membranaire. La partie antérieure de cette membrane, ou cornée, est transparente et laisse passer la lumière. La partie postérieure est constituée de couches dont la plus interne, la rétine, est la couche nerveuse. La rétine tapisse le fond de l'œil. C'est là que vient se former, inversée, l'image du monde extérieur. Pour simplifier on dit souvent que l'œil se comporte comme un appareil photographique.

Deux opérations essentielles sont réalisées au niveau de la rétine. D'abord la transduction ou traduction de l'énergie de la lumière contenue dans l'image en des signaux électrochimiques élaborés par des photorécepteurs. Ensuite, le traitement de ces signaux pour coder l'image sous forme de trains d'impulsions électriques propagées par les fibres du nerf optique.

Comme tout tissu nerveux, la rétine est constituée de neurones et d'autres cellules non nerveuses. Il est classique de distinguer dix couches de la rétine :

→ La couche la plus externe est adhérente à la choroïde : c'est *l'épithélium pigmentaire*.

→ La couche des cônes et des bâtonnets est formée par les deux segments externes et internes des cellules visuelles, là où commencent les premiers

phénomènes de sensation lumineuse. Elle est épaisse de 40  $\mu\text{m}$  et compte environ 130 millions de bâtonnets et 6 500 000 cônes.

→ *La limitante externe* est une membrane fenêtrée où s'enchâssent les cellules visuelles.

→ *La couche des grains externes* est constituée par les noyaux des cônes et des bâtonnets.

→ *La plexiforme externe*, épaisse de 20  $\mu\text{m}$ , est formée par la terminaison des cônes et des bâtonnets, qui entrent en relation (synapse) avec les dendrites des cellules de la couche suivante. La plexiforme externe a une importance considérable, puisqu'elle est le siège du relais entre rétine sensorielle et rétine cérébrale.

→ *La couche des grains internes*, épaisse d'environ 30  $\mu\text{m}$ , est constituée, d'une part, par les cellules bipolaires, qui transmettent l'influx nerveux de la cellule réceptrice à la cellule ganglionnaire, et, d'autre part, par les cellules horizontales, cellules d'association, et par les cellules de soutien : corps cellulaire des fibres de Müller, cellules amacrines.

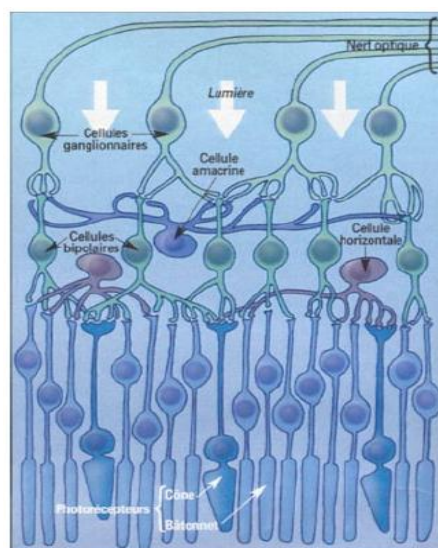
→ *La plexiforme interne*, où se fait la jonction entre les cellules bipolaires et les cellules ganglionnaires, est épaisse de 20 à 30  $\mu\text{m}$ .

→ *La couche des cellules ganglionnaires* est faite de grosses cellules nerveuses dont les cylindraxes, très longs, constitueront le nerf optique. Epaisse de 10 à 20  $\mu\text{m}$ , elle est presque partout faite d'une seule couche, sauf autour de la fovéa où les noyaux s'empilent sur sept à huit rangs, expliquant un relief observé à ce niveau.

→ *La couche des fibres optiques* se dirigeant vers la papille optique.

→ Enfin, *la limitante interne* est formée par la réunion des extrémités internes des fibres des cellules de Müller (rôle de soutien).

Trois catégories de cellules ont pour fonction de transférer l'information selon une direction radiaire. Elles la font circuler depuis les photorécepteurs (cônes et bâtonnets) jusqu'au dernier étage de traitement rétinien : les cellules ganglionnaires entre lesquelles se situent les cellules bipolaires.



**Figure09 : Les cellules de la rétine.**

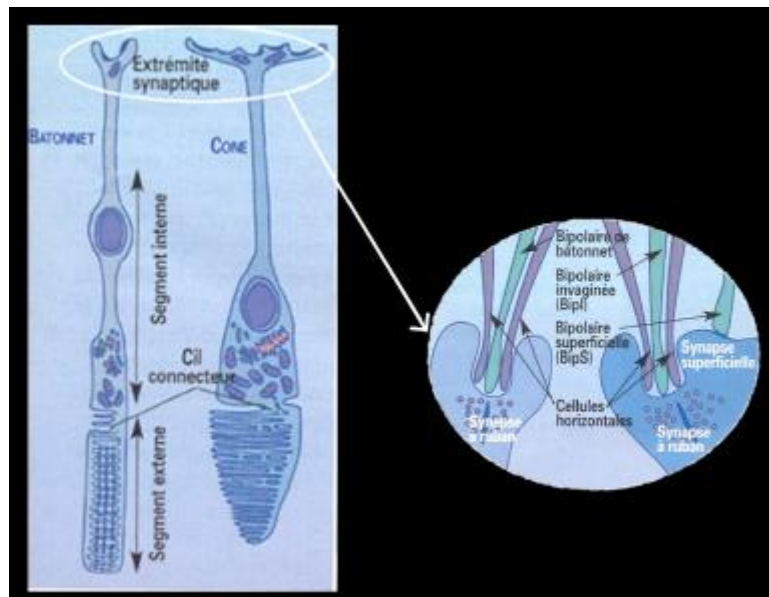
## 2. Cônes et bâtonnets

La rétine contient quelques 125 millions de bâtonnets et 5 millions de cônes. Ces photorécepteurs sont les premières cellules à interagir avec la lumière et sont situés dans la couche la plus éloignée du cristallin, au plus profond de l'oeil, occupant 1250 mm<sup>2</sup> de rétine.

Les bâtonnets, qui font défaut au centre de la rétine, voient les formes et fournissent la vision périphérique ainsi que la vision crépusculaire et sont capables de le faire à très faible luminosité c'est à dire quand le flux de photon est faible (ambiance nocturne ou scotopique) puisque, en moyenne, un seul photon est capable d'exciter un bâtonnet.

Les cônes, concentrés sur la fovéa, ne s'activent, au contraire, qu'en pleine lumière, c'est à dire avec un flux de photons important (ambiance diurne ou photopique) mais ils sont capables de saisir les couleurs et de distinguer les détails.

En somme, il y a un organe sensoriel fait de bâtonnets à faibles performances mais à grande sensibilité, et un autre organe fait de cônes à hautes performances (couleur, acuité) mais nécessitant un apport lumineux plus important.



*Figure 10: Structure des cônes et des bâtonnets.*



Qu'il s'agisse d'un cône ou d'un bâtonnet, tout photorécepteur est constitué de deux parties distinctes : un segment externe et un segment interne. Ces deux parties sont reliées par un cil connecteur.

Le segment interne contient les organes cellulaires (noyau, mitochondries, appareil de Golgi, etc.) indispensables au fonctionnement de toute cellule. Dans sa partie la plus distale, son pied, le segment interne possède divers types de synapses : des synapses électriques, qui assurent des relations entre les photorécepteurs voisins, et des synapses chimiques.

Ici, une première distinction entre cônes et bâtonnets doit être introduite. Chez les cônes, on observe en effet deux types de synapses chimiques : des synapses « à ruban » et des synapses « superficielles ». Les premières connectent le photorécepteur à trois éléments postsynaptiques : une dendrite de cellule bipolaire au centre et deux dendrites ou axones de cellules horizontales de chaque côté. Pour les cônes – dont les pieds sont de grande taille – cette triade peut se répéter jusqu'à 15 ou 20 fois.

Les synapses « superficielles », elles, ne contactent que des cellules bipolaires « superficielles ». A l'inverse, les bipolaires impliquées dans les synapses à ruban sont des bipolaires « invaginées ».

Chez les bâtonnets, on ne trouve que des synapses « à ruban » : mais à raison d'une triade seulement par pied car celui-ci est de petite taille.

Les synapses « à ruban » présentent, de part et d'autre du ruban, de nombreuses vésicules qui contiennent le neuromédiateur. Les synapses « superficielles », bien que dépourvues de ces vésicules, assurent également une transmission chimique. Elles fonctionnent avec le même neuromédiateur que les synapses « à ruban ». Il s'agit d'un acide aminé : le glutamate.

L'autre partie d'un photorécepteur, son segment externe, contient le pigment photosensible, situé dans les membranes des disques est formé de l'empilement de centaines de lamelles. Ces structures correspondent à des repliements de la membrane externe qui enveloppe le photorécepteur. Des différences s'observent là encore entre cônes et bâtonnets. Chez les premiers, membrane externe et membrane des lamelles ne sont pas disjointes. Chez les seconds, au contraire, les lamelles forment des disques indépendants qui flottent librement à l'intérieur du segment externe.

C'est au niveau de cet appareil que se produit l'interaction avec la lumière. Les molécules impliquées, les rhodopsines, sont présentes dans la membrane des lamelles. Un seul bâtonnet de rétine humaine en contient environ 100 millions.

Cônes et bâtonnets ne diffèrent pas seulement par leur morphologie ou leurs synapses ; ils diffèrent aussi par les propriétés d'absorption de leurs pigments visuels. Chez l'homme, il existe trois catégories de cônes et une seule de bâtonnets.

Le pigment unique du bâtonnet a son maximum d'absorption vers 499 nm. En revanche, on distingue trois classes de cônes. Leurs pigments ont des maxima d'absorption situés dans trois régions du spectre visible : dans les courtes, moyennes et grandes longueurs d'onde, respectivement à 430, 535, 565 nm. Ils sont pour cette raison désignés par les termes de pigment S, pigment M et pigment L (S pour short, M pour medium et L pour long). Ces trois catégories permettent à l'être humain de discriminer les couleurs.

Le flux d'énergie apportée dans l'oeil par la lumière s'exprime en Watts. La sensation de flux lumineux s'exprime en lumens. Les bâtonnets transforment un watt de lumière à 505 nm en 1 750 lumens lorsque la rétine est adaptée à l'obscurité. Les cônes transforment un watt de lumière à 555 nm en 680 lumens en ambiance diurne.

L'oeil n'a pas la même efficacité pour toutes les longueurs d'onde. Adaptée à la lumière, la rétine est plus sensible dans le jaune-vert (555 nm). Adaptée à l'obscurité, les bâtonnets sont plus sensibles dans le bleu-vert (505 nm)

Cônes et bâtonnets diffèrent aussi en nombre (on compte environ 125 000 000 bâtonnets et 5 000 000 cônes dans une rétine humaine).

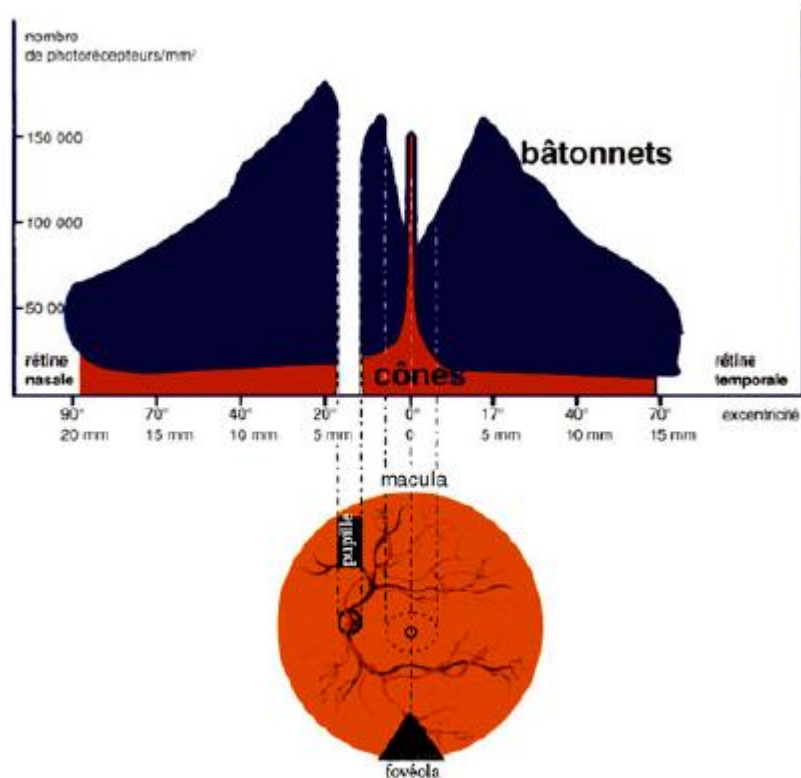
De surcroît ils ne sont pas distribués uniformément sur la rétine (*Figure 10*). Les cônes sont exclusivement localisés dans la région centrale alors que les bâtonnets dominent dans les régions périphériques ; ils sont localisés dans une espèce d'anneau de rayon de 4-5 mm.

Enfin, les trois catégories de cônes ont des distributions spatiales différentes sur la rétine centrale. En particulier les cônes S qui sont minoritaires ne représentant que 10 % de la population totale des cônes, ont leur maximum d'intensité à environ 1° d'excentricité, ils sont très rares dans le centre de la fovéa.

Les photorécepteurs sont également impliqués dans les propriétés temporelles des phénomènes d'adaptation. Le temps requis pour l'adaptation à l'obscurité (15 à 20 minutes) est déterminé en partie par le temps nécessaire pour restaurer les réserves du pigment photosensible des bâtonnets, la rhodopsine. La période d'adaptation des cônes (5 minutes) est plus courte que pour les bâtonnets mais leur sensibilité est moindre (rapport 100).

En ce qui concerne les bâtonnets, dans la rétine humaine, leurs pics de densité se situent entre 140000 et 160000/mm<sup>2</sup>.

L'ensemble a une structure très coordonnée. Cette très grande spécialisation des bâtonnets se retrouve au niveau de ses constituants biochimiques : la rhodopsine, pigment photosensible, représente environ 80% du contenu de la cellule en protéines. C'est la décomposition de ce pigment photosensible par les photons qui entraîne une cascade de réactions chimiques à l'origine de la vision.



**Figure 11: Répartition des photorécepteurs.**

Trois catégories de cellules (*Figure 09*) transfèrent l'information depuis les photorécepteurs jusqu'aux cellules ganglionnaires : les cellules bipolaires, les cellules horizontales et les cellules amacrines.

### 3. Cellules bipolaires :

Il existe deux grandes classes de cellules bipolaires : les bipolaires des bâtonnets et les bipolaires des cônes. Les cellules bipolaires des cônes se subdivisent en deux grands types : les bipolaires des cônes dites « invaginées » (BipI) et les bipolaires de cônes dites « superficielles » (BipS) . Ces deux catégories de cellules réagissent de façon opposée au glutamate. Dans l'obscurité, sous l'action du glutamate constamment libéré, les bipolaires invaginées sont hyperpolarisées et les superficielles dépolarisées. Cette différence tient aux récepteurs synaptiques propres à chaque classe de bipolaire. Les premiers (sur BipI) sont inhibiteurs, les seconds (sur BipS) excitateurs.

Nous avons vu que l'activation du pigment par la lumière se traduisait au niveau synaptique par une moindre quantité de transmetteur libéré. Inversement, sitôt l'activation terminée, cette quantité augmente.

Les cellules bipolaires des bâtonnets et des cônes reçoivent leurs signaux d'entrée des bâtonnets et des cônes respectivement, pour les transférer, au niveau de la couche plexiforme interne, aux cellules amacrines et aux cellules ganglionnaires.

#### 4. Cellules horizontales

Il existe trois types de cellules horizontales : HI, HII, HIII.

Les cellules horizontales répondent à la stimulation lumineuse, comme les photorécepteurs, par des hyperpolarisations graduées.

Elles joueraient en quelque sorte le rôle d'un interneurone, permettant à la cellule bipolaire de collecter les réponses de nombreux photorécepteurs distribués sur une surface rétinienne éloignée de la zone de contacts synaptiques directs des photorécepteurs.

Ces cellules font partie de la couche plexiforme externe et relient latéralement les photorécepteurs aux cellules bipolaires.

#### 5. Cellules amacrines

Chez l'homme, on en connaît une quarantaine de types distincts. Dans la plupart des cas les cellules amacrines donnent une réponse transitoire à l'établissement et à la fin d'une stimulation lumineuse à l'inverse des cellules bipolaires dont les réponses sont maintenues tout le temps que dure la stimulation lumineuse. Elles contribuent aux aspects dynamiques des interactions entre centre et pourtour du champ récepteur des cellules ganglionnaires. Elles servent, comme les cellules horizontales, à moduler latéralement la transmission d'information.

#### 6. Cellules ganglionnaires

Les cellules ganglionnaires constituent la voie finale commune de la rétine.

Elles constituent une classe bien définie de neurones ; elles présentent cependant une grande diversité morphologique.

Bien qu'elles ne forment pas un ensemble homogène, toutes possèdent de longues fibres qui courent sur le fond d'oeil et qui se rassemblent et sortent de la rétine par la tache aveugle pour former le nerf optique.

### C. Le nerf optique et le cortex visuel

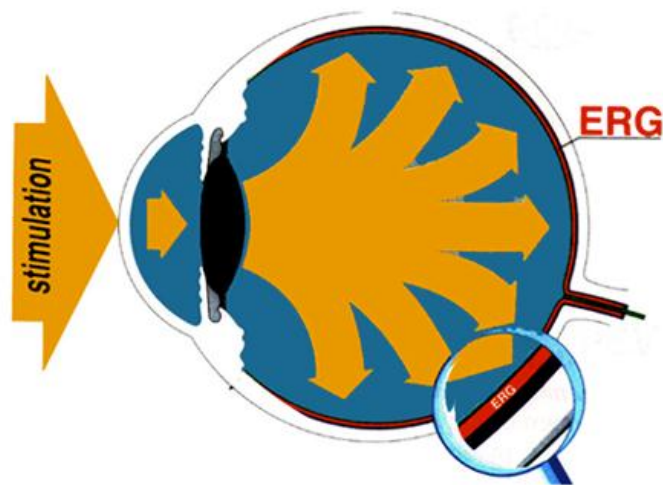
Les nerfs optiques, d'une longueur de 35 à 55 mm, s'unissent, avant de pénétrer dans l'encéphale, en formant le chiasma, au niveau duquel s'entrecroisent les fibres optiques issues de cellules ganglionnaires puis se terminent dans le corps genouillé latéral. Le message est ensuite relayé par des « cellules principales » pour se terminer dans le cortex occipital.

### III . Electrorétinogramme (ERG)

#### A. Définition

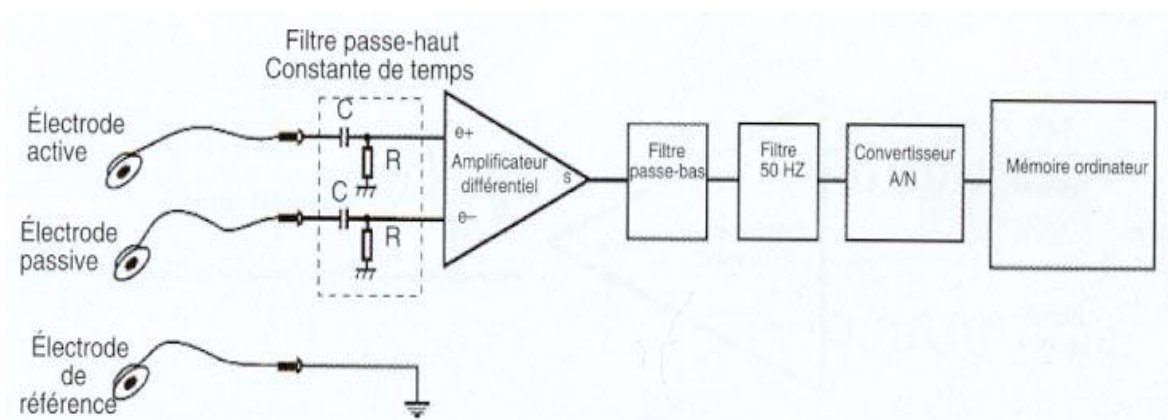
L'électrorétinogramme est un examen permettant de tester le bon fonctionnement de la rétine.

L'électrorétinographie est définie comme l'ensemble des méthodes permettant de recueillir les potentiels émis par la rétine en réponse à une stimulation.



*Figure 12 : Les photons traversent la cornée et viennent frapper la rétine. La rétine répond sous forme de potentiels : c'est l'ERG.*

#### B. Le recueil des signaux bio-électriques



*Figure 13 : Schéma d'une installation d'électrophysiologie.*

Une installation électrophysiologique (*Figure 1*) comprend plusieurs parties :

## 1. Les électrodes

Une électrode est l'élément de contact entre le corps humain et l'instrument de mesure. Elles mesurent les variations du champ électrique créé par les signaux biologiques. A leur niveau, les courants ioniques biologiques sont transformés en courants électroniques. Les électrodes sont constituées de matériaux particulièrement sélectionnés (argent, chlorure d'argent, platine) pour limiter les perturbations liées à ce phénomène.

Il est essentiel d'avoir de bonnes électrodes ayant une impédance faible et stable pendant tout l'examen. L'impédance de l'électrode est la résistance exprimée en Ohms qu'elle oppose au passage du courant. Traditionnellement, on essaie de se rapprocher du modèle de l'électrode impolarisable de d'Arsonval.

Il y a au moins trois électrodes :

- Une électrode « active » qui est reliée à l'entrée positive de l'amplificateur
- Une électrode « indifférente » à distance reliée à l'entrée négative. Elle doit être du même type que l'électrode active.
- Une électrode de terre placée soit au vertex soit à distance.

Il existe des modèles très différents selon les examens :

- Coques sclérales réutilisables : elles sont constituées d'un verre de contact en plexiglas muni d'ergots (blépharostats) pour maintenir les paupières ouvertes et d'un petit tube creux pour assurer le contact électrique entre le fil d'électrode et la cornée par l'intermédiaire d'une mèche en gélatine absorbable.
- Coques à usage unique Dencott : ce sont des électrodes avec blépharostats. Elles sont constituées d'un verre de contact en polycarbonate. Un dépôt d'argent forme d'anneau assure le contact électrique entre le gel conducteur et le fil de l'électrode.
- Coques à usage unique ERG-JET : Elles sont constituées d'un verre de contact de taille unique. Un dépôt d'or sous vide en forme d'anneau assure le contact électrique entre le gel et le fil de l'électrode.
- Electrodes fibre de carbone : Elles sont réalisées à partir d'une fibre de carbone recouverte en dehors de ses extrémités d'un plastique isolant en forme de crochet qui permet de le mettre en place facilement dans le cul de sac inférieur.
- Electrodes Gold foil : Elles sont constituées d'une lamelle de Mylar avec un dépôt d'or sur l'une des faces.
- Electrodes DTL : Elles sont constituées d'un faisceau de fibres de nylon imprégnées d'argent.

## 2. L'instrument de mesure

Un instrument d'électrophysiologie comprend deux parties : des amplificateurs et un système informatique pour recueillir le signal sous forme numérique après conversion, le mettre en mémoire, l'analyser et imprimer les résultats.

### a) Amplification

Les signaux biologiques ont une amplitude très faible (du microvolt au millivolt) et doivent donc être amplifiés.

Il s'agit du premier étage du module de recueil des réponses électrophysiologiques. Il se trouve à proximité du patient pour minimiser les interférences électromagnétiques. Le signal en sortie de cet étage à amplification différentielle 4 voies est augmenté d'un gain variant de 5000 à 20000 selon les cas.

Les amplificateurs sont des équipements électroniques dont le rôle est de recevoir les courants très faibles venant des électrodes, les filtrer, les amplifier et les présenter à l'équipement informatique. Ils ont plusieurs caractéristiques fondamentales :

- Ils sont différentiels c'est à dire qu'ils n'amplifient que la différence entre l'entrée positive et l'entrée négative ; cela est important pour éliminer tous les potentiels parasites communs aux deux voies tels l'électrocardiogramme ou ceux induits par les champs magnétiques ou électromagnétiques. Il est donc essentiel que les deux fils venant des électrodes aux amplificateurs soient aussi proches que possible l'un de l'autre et de préférence torsadés entre eux.

- Ils ont un grand gain : ils multiplient la différence de potentiel très faible recueillie entre les deux électrodes par un facteur de 1000 ou même plus pour envoyer des signaux de l'ordre du volt vers les instruments de mesure.

- Ils ont des filtres pour éliminer les parasites :

- filtre 50 Hz qui rejette les parasites liés au secteur

- filtre passe-bas qui élimine les signaux de haute fréquence comme l'électromyogramme (par exemple au-dessus de 200 Hz)

- filtre passe-haut pour éliminer les dérives des potentiels d'électrodes qui se produisent au cours du temps car la concentration en électrolyte se modifie.

- Chaque amplificateur a ainsi une bande passante qui doit être adaptée à chaque type d'examen. L'ERG a des composantes rapides, la bande passante est le plus souvent comprise entre 1 et 200 Hz.

Les amplificateurs doivent aussi isoler le patient sur le plan électrique avec une sécurité d'au moins 2000 volts.

## **b) Filtrage:**

Le second étage est un étage de filtrage du signal. Ces filtres sont programmables à partir de l'unité centrale et ne nécessitent donc pas de mise au point manuelle. Les filtres passe-haut ont deux fréquences de coupures programmables : 1 et 10 Hz. Les filtres passe-bas sont programmables entre 19 et 1150 Hz. Enfin, le bruit généré par le réseau électrique peut être supprimé par l'emploi d'un filtre réjecteur ajustable à 50 ou 60 Hz. Le gain est également programmable pour obtenir en sortie de cet étage un gain de 3125 ou de 12500.

Les signaux enregistrés sont constitués non seulement d'un signal utile, mais également de nombreux parasites d'origine biologique (électrocardiogramme, électromyogramme), ou externe (champ électrique associé au réseau EDF...). Un filtrage en fréquence permet d'éliminer ces signaux parasites. Mais ce filtrage modifie également l'aspect du tracé final, et il faut en tenir compte lors de l'interprétation. C'est particulièrement le cas pour l'ERG, où les petits accidents du tracé apparaîtront ou non en fonction du filtrage réalisé.

Cette dernière possibilité est particulièrement importante. Elle permet d'extraire des signaux très faibles noyés au sein de signaux parasites appelés « bruit de fond ».

En réalisant la moyenne de signaux successifs, on améliore le rapport signal/bruit d'un facteur égal à la racine carrée du nombre de signaux « moyennés » car le bruit de

fond est aléatoire mais le signal est corrélé à la stimulation. la sommation des réponses : Elle permet d'améliorer la qualité du signal utile. Elle est fondée sur le fait que le signal utile est parfaitement corrélé à la stimulation tandis que les signaux parasites, ou bruit, apparaissent de façon aléatoire par rapport à la stimulation. Si on effectue une sommation des réponses sur plusieurs stimulations successives, les signaux utiles auront tendance à s'additionner tandis que les signaux parasites auront tendance à s'annuler. Le rapport signal/bruit varie proportionnellement à la racine carrée du nombre de stimulations.

La compréhension des limites de cette méthode est essentielle pour une bonne interprétation car lorsque le signal est très petit il est difficile de l'extraire sauf à augmenter le nombre de stimulations ce qui n'est pas toujours possible. Il arrive qu'à la fin d'une mesure il soit impossible de dire si la donnée visualisée à l'écran vient du signal ou du bruit, d'où des erreurs d'interprétation. Cette situation est fréquente notamment lors des examens de l'enfant quand les conditions de recueil ne sont pas idéales.

### **c) Traitement du signal**

Le signal électrique est transformé en une valeur numérique par un convertisseur analogique-numérique qui est une sorte de voltmètre très rapide mesurant le signal à fréquence régulière et envoie la valeur dans la mémoire de l'ordinateur. Cette mesure est déclenchée par la stimulation. Le signal électrophysiologique est donc représenté dans la mémoire par une suite ordonnée de nombres. Elle permet de transformer les signaux continus en signaux binaires reconnus par l'ordinateur. La fréquence de l'échantillonnage conditionne largement la fiabilité du tracé obtenu après conversion.

Un seul convertisseur analogique-digital est utilisé alternativement pour échantillonner chacune des 4 voies. La fréquence maximale d'échantillonnage est de 11135 Hz pour une voie. Les données sont quantifiées sur 10 bits. Pour un gain de 12500, chaque bit est équivalent à 1,56  $\mu\text{V}$ . Pour un gain de 3125, chaque bit est équivalent à 6,25  $\mu\text{V}$ . Ces données, entre autres, sont mises en mémoire directement et traitées en temps réel par le logiciel d'exploitation.

L'ordinateur dispose de programmes pour contrôler la validité du signal après chaque stimulation, ou pour faire des opérations mathématiques comme un filtrage numérique ou la moyenne de signaux obtenus après des stimulations successives.

### **d) Système informatique**

La plupart des instruments utilisent un système informatique pour piloter l'examen, recueillir et analyser les signaux électriques issus des électrodes. Toutes les informations utiles à l'opérateur pour programmer et suivre le déroulement des examens sont présentées sur l'écran de dialogue. Des dispositifs de contrôle permettent de s'assurer du bon fonctionnement de la chaîne de recueil, en particulier celui de l'impédance des électrodes (qualité de contact avec la peau) et celui du gain d'amplification.

Pendant la phase d'examen, les réponses temporelles sont enregistrées et traitées en temps réel. Le filtrage numérique est effectué à la fréquence de stimulation. A chaque nouvelle stimulation, la transformée de Fourier est calculée et fournit une valeur d'amplitude et de phase qui sont alors présentées sur l'écran de contrôle. Chaque



point du graphique résulte en fait de l'analyse fréquentielle d'une fenêtre temporelle de 1 à 2 secondes.

La dernière phase est consacrée au traitement en temps différé du signal, à sa sauvegarde sur disque et à son impression. L'ensemble des données temporelles est sauvegardé sur disque. L'impression sur papier consiste à copier intégralement les données présentées à l'écran avec l'adjonction de commentaires supplémentaires (nom du patient, date, type de stimulation, etc.).

## **C. La représentation des résultats**

### **1. Représentation graphique**

L'électrorétinogramme est avant tout un schéma composé de plusieurs ondes successives. La représentation graphique des résultats la plus courante sera donc la courbe de l'ERG. Il existe cependant d'autres façons de représenter les résultats.

### **2. Représentation statistique**

Lors de l'examen, plusieurs stimulations sont effectuées donc plusieurs réponses sont recueillies. Le système informatique établit une probabilité statistique de l'existence de chaque onde en tenant compte des fluctuations au cours de l'examen et du bruit de fond.

## **D. Les différents types d'ERG et indications**

### **1. L'ERG Ganzfeld, global, plein champ**

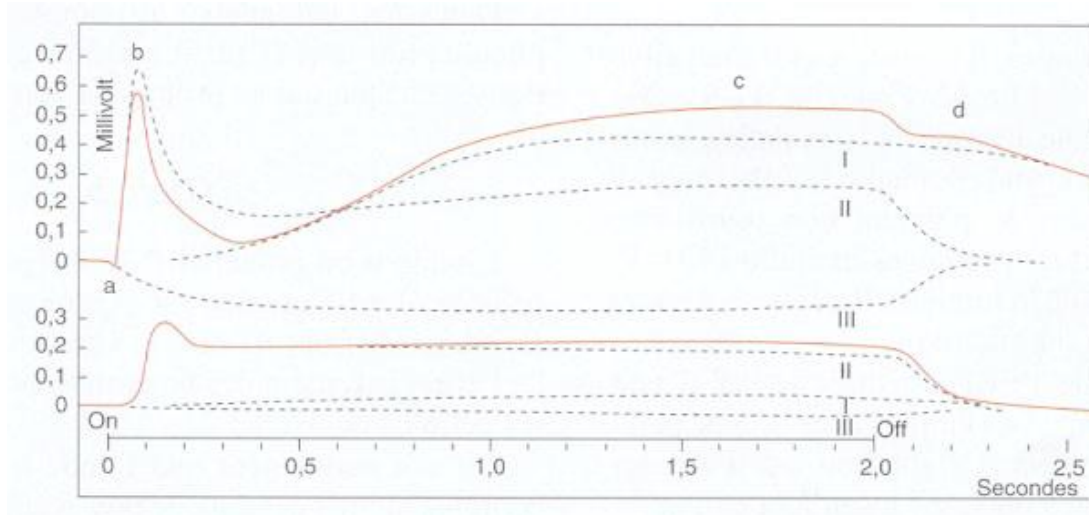
#### **a) Principe**

Ce sont les travaux de Granit qui furent déterminants pour la compréhension de l'origine de l'ERG. Il a isolé trois composantes dans l'ERG appelées PI, PII et PIII relatifs aux ondes de l'ERG que nous étudierons ci-après.

PIII est rapide, négatif à la cornée et correspond à l'onde a. Il reflète l'activité des photorécepteurs. C'est le potentiel de récepteur tardif.

PII est plus lent et positif et correspond à l'onde b. Il est lié à l'activité des cellules de Müller.

PI (onde c) est plus tardif et prend son origine près de la couche des photorécepteurs.



**Figure 14 : Analyse de l'électrorétinogramme selon Granit.**

Le tracé du haut a été obtenu avec un niveau de stimulation élevé et celui du bas à un niveau cent fois plus faible.

L'ERG comprend une série d'ondes qui ne sont pas toutes utilisées en clinique.

**(1) Potentiel de récepteur précoce ou ERP :**

Il apparaît sans latence mesurable au moment de la stimulation. Il correspond au déplacement de charges lors des phénomènes photochimiques induits sur la rhodopsine par la lumière dans le segment externe des photorécepteurs.

Il comprend deux ondes, R1 positive et R2 négative dont la durée est de l'ordre de 1 ms. Son amplitude est maximale lorsque la stimulation lumineuse est appliquée sur un œil adapté à l'obscurité et qu'il y a un maximum de pigments non transformés disponibles. Son amplitude peut alors atteindre 140 mV. Sur une rétine adaptée à la lumière, la réponse devient très faible, de l'ordre du microvolt.

L'enregistrement de l'ERP est difficile car il faut des stimulations très intenses et très brèves qui ne parasitent pas les instruments.

**(2) Onde a :**

L'onde a ou potentiel de récepteur tardif correspond au potentiel PIII de Granit. Elle naît dans les photorécepteurs où elle est la conséquence des modifications des courants ioniques. A l'obscurité, les canaux ioniques de l'article externe sont ouverts.  $\text{Na}^+$  pénètre dans l'article externe et  $\text{K}^+$  sort du segment interne. Il existe donc un courant circulant d'obscurité maintenant à une valeur fixe la différence de potentiel entre l'intérieur et l'extérieur du photorécepteur. La lumière vient bloquer l'entrée du  $\text{Na}^+$ , ce qui provoque une hyperpolarisation de la cellule qui devient plus négative. Ce phénomène est dépendant de l'intensité de la lumière et crée l'onde a. L'onde a des cônes est plus rapide que l'onde a des bâtonnets. Dans les bâtonnets, un nombre très faible suffit à créer cette hyperpolarisation électrique qui se propagera vers les bipolaires.

### (3) Onde b :

L'onde b ou potentiel PII de Granit est une onde positive dont l'origine est post-réceptoriale. On sait maintenant que l'onde b est créée par les courants induits des flux de potassium dans les cellules de Müller. L'activité des bipolaires libère du  $K^+$  qui entre dans les cellules de Müller au niveau des couches plexiformes externe et interne. Ces ions  $K^+$  sortent par le pied de la cellule de Müller avant de regagner la rétine au travers des espaces extracellulaires. Ce courant ionique crée l'onde b. L'onde b peut se décomposer en deux ondes successives appelées onde b1 et onde b2.

### (4) Onde c :

L'onde c est une grande onde lente qui correspond au potentiel PI de Granit. Elle est la somme de deux composantes : une composante négative qui apparaît dans la rétine interne comme l'onde b, appelée PI lent et une composante positive à la cornée, l'onde c de l'épithélium pigmentaire. On a montré que cette onde c était produite par un changement de concentration en potassium dans l'espace sous-rétinien.

Cette onde c est difficile à enregistrer car il faut des stimulations de longue durée. De plus les artéfacts provoqués par les clignements se superposent à l'enregistrement.

### (5) Onde d :

L'onde d ou potentiel d'extinction apparaît à l'extinction de la lumière. C'est un potentiel positif qui apparaît dans l'ERG photopique à l'arrêt de la stimulation. Son origine est discutée mais l'onde d est essentiellement liée aux changements dans le potentiel de récepteur tardif à l'arrêt de la lumière. C'est l'inverse de l'onde a. Dans l'ERG scotopique, cette onde est difficile à enregistrer et son existence est même discutée.

### (6) Potentiels oscillatoires rapides :

Des potentiels oscillatoires rapides peuvent être identifiés sur la montée de l'onde b. Il y a 3 à 4 oscillations en adaptation à la lumière et 4 à 5 à l'obscurité. L'origine de ces potentiels a été établie dans la neurorétine. Des arguments permettent de penser qu'ils sont issus des cellules amacrines dépolarisantes et éventuellement des cellules interplexiformes.

## b) Réalisation

### (1) Stimulation :

Pour réaliser un examen électrorétinographique standard, le stimulateur utilisé doit pouvoir exciter toute la rétine. Cette stimulation en champ total (Ganzfeld) rend préférable l'emploi d'une coupole. L'intérêt de la coupole est de pouvoir contrôler la luminance de l'environnement. Pour les examens réalisés en condition diurne, la luminance de la coupole doit être comprise entre 17 et 30  $cd.m^{-2}$ .

Le stimulateur doit pouvoir délivrer des éclairs d'une durée plus brève que le temps d'intégration des photorécepteurs (<10 ms).

Le stimulus standard de référence est un stimulus blanc. Il donne à la surface de l'écran, un produit luminance-temps équivalent à 3  $cd.m^{-2}.s$ . Pour étudier l'activité des bâtonnets, la norme I.S.C.E.V. (International Society for Clinical Electrophysiology of Vision) recommande d'utiliser le même stimulus blanc atténué par l'interposition d'un filtre neutre.

La plupart des protocoles habituellement utilisés en France font aussi appel à des stimulations colorées rouges et bleues pour séparer les activités des cônes et de celle des bâtonnets. Il est admis qu'un filtre rouge ne laissant passer que les longueurs d'onde au-delà de 630 nm permet d'isoler correctement l'activité des cônes L. Pour

une stimulation élective des bâtonnets sur une rétine adaptée à l'obscurité, on peut utiliser un filtre bleu de très courte longueur d'onde vers 409 nm.

### **(2) Electrodes :**

On utilise deux types principaux d'électrodes cornéennes pour le recueil de l'ERG : Dans le cas général, les coques sclérales avec blépharostat (ce sont de petits ergots qui maintiennent les paupières ouvertes).



**Figure 15 : Patient équipé de coques sclérales.**  
On voit également l'électrode de terre sur le front.

Quand on ne peut pas poser de lentilles sur la cornée, on utilise des électrodes à placer dans le cul de sac conjonctival inférieur. Beaucoup sont en fibre de carbone.

Les électrodes cornéennes sont placées après instillation d'un collyre anesthésique et dilatation de la pupille.

L'électrode indifférente devrait être une électrode cutanée placée sur la tempe.  
L'électrode de terre est placée sur le front.

### **(3) Méthodes de recueil :**

Le patient est installé devant le stimulateur après les explications nécessaires à l'examen.

Selon le protocole utilisé, le patient est équipé de ses électrodes soit dans l'immédiat, soit après une période d'adaptation à l'obscurité.

De plus, il est souhaitable que la pupille soit dilatée pour que l'énergie lumineuse qui arrive sur la rétine soit constante.

On utilisera l'extraction du signal par la méthode des moyennes, mais avec un nombre restreint de stimulations.

Habituellement 16 stimulations en ambiance diurne à une fréquence d'un éclair par seconde. Mais en condition scotopique, on se limite à 8 stimulations espacées de deux secondes pour ne pas désadapter la rétine.

L'analyse de l'ERG est faite en mesurant l'amplitude et le temps de culmination de chaque onde.

### c) Résultats

Pour séparer l'activité du système photopique (cônes et couche interne liée aux cônes), du système scotopique (bâtonnets et couche interne liée aux bâtonnets), on fait varier l'ambiance lumineuse et donc l'état d'adaptation de la rétine ainsi que les modalités de stimulation. Il ne faut pas confondre le niveau d'ambiance photopique ou scotopique avec le niveau d'intensité du stimulus. On peut ainsi utiliser un stimulus intense (donc photopique) sur une rétine adaptée à l'obscurité. La morphologie de l'ERG varie de façon très importante selon l'ambiance lumineuse et le type de stimulus.

#### (1) Fluctuations avec l'ambiance :

L'ERG blanc photopique sert de référence dans tout examen électrorétinographique. Il est obtenu sur une rétine adaptée à un niveau lumineux photopique d'au moins 17 cd.m<sup>2</sup>, avec un stimulus bref (<10 ms) blanc, de forte intensité. On obtient un signal qui comprend l'onde a (environ 30μV) et l'onde b (70 μV). Cette réponse ERG est spécifique de l'activité des cônes.

Dans une ambiance scotopique, au cours de l'adaptation à l'obscurité, avec un stimulus blanc identique au précédent, on constate une augmentation progressive de l'amplitude des ondes a et b. L'onde b globale prend un aspect plus ample et plus large. Cela est lié à l'apparition de l'onde b2 mais qui n'est pas bien séparée de b1 avec un stimulus blanc.

Un stimulus jaune-orangé sépare mieux l'onde b1 de l'onde b2. Seule l'onde b2 est le reflet du fonctionnement du système scotopique. En revanche, l'onde a liée aux bâtonnets est peu ou pas visible car masquée par la montée de l'onde b.

Avec un stimulus intense, l'apparition des potentiels oscillatoires se manifeste sur la montée de l'onde b1.

#### (2) Fluctuations avec le stimulus :

##### (a) Intensité du stimulus :

Sur une rétine adaptée à l'obscurité, à part la réponse négative de seuil scotopique qui n'est pas utilisée en pratique courante, lorsque le stimulus est très faible (de niveau scotopique ne stimulant que les bâtonnets) c'est l'onde b qui se manifeste comme une onde positive avec un aspect arrondi et tardif (b2 vers 150 mV). Son amplitude augmente avec l'intensité du stimulus. Lorsque celui-ci atteint un niveau suffisant pour stimuler les cônes, la morphologie de l'onde b se transforme. Elle prend un aspect plus aigu (b1) en même temps que l'onde a apparaît. Son amplitude se stabilise puis augmente de nouveau lorsque le stimulus devient très intense. Son temps de culmination diminue lorsque l'intensité du stimulus croît.

L'onde a n'apparaît qu'à un niveau de stimulation assez intense (photopique stimulant les cônes) et augmente régulièrement avec l'intensité du stimulus.

Il existe une relation entre les amplitudes de l'onde a et de l'onde b des bâtonnets et la valeur du stimulus. Cette fonction « réponse/stimulus » s'écrit

$$\frac{V}{V_{\max}} = \frac{I^n}{I^n + \sigma^n}$$

Où  $V$  est l'amplitude de la réponse,  $I$  l'intensité du stimulus,  $\sigma$  la valeur de  $I$  qui provoque la moitié du maximum de l'amplitude de la réponse et  $n$  une indication de la pente de la courbe (habituellement 1).

Les potentiels oscillatoires au nombre de 3 ou 4 apparaissent plutôt à un haut niveau d'intensité et ont un caractère photopique.

(b) Couleur du stimulus :

Si la lumière blanche est la référence en matière de stimulation, on continue à employer les stimulations colorées pour isoler l'activité des différents photorécepteurs

- Un stimulus rouge, de longueur d'onde supérieure ou égale à 630 nm stimule de manière sélective les cônes L. La réponse ERG à cette longueur d'onde est deux fois moins ample que la réponse à un stimulus blanc de même énergie. Cette différence reflète la répartition des cônes (environ 50% de cônes L qui sont les cônes sensibles au rouge). Avec un stimulus rouge sur une rétine adaptée à l'obscurité, on obtient les ondes a et b1 ainsi qu'une onde b2 de très faible amplitude puisque les bâtonnets sont peu sensibles à cette longueur d'onde ;

- Un stimulus jaune-vert ne permet pas d'étudier isolément les cônes M pourtant sensibles à cette longueur d'onde ; en effet, leur courbe de sensibilité spectrale est presque la même que celle des cônes L, sauf dans les grandes longueurs d'onde. Pour y parvenir, il faudrait éliminer l'activité des cônes L par un fond coloré rouge de grande intensité ;

- Un stimulus bleu sur une rétine adaptée à l'obscurité stimule préférentiellement les bâtonnets. Dans ces conditions, on obtient une onde b2 presque pure ;

- Avec un stimulus bleu de longueur d'onde 420 nm, en condition photopique (fond jaune), il est théoriquement possible d'isoler la réponse des cônes S (sensibles au bleu). En pratique, elle est difficile à mettre en évidence car les cônes S ne représentent que 10% des cônes. Leur réponse est donc très faible. De plus, il est presque impossible d'inhiber les bâtonnets qui sont très sensibles à cette longueur d'onde.

(c) Fréquence du stimulus :

Lorsqu'on augmente la fréquence de stimulation, la forme de la réponse ERG se modifie pour atteindre un état stable, avec un aspect sinusoïdal. On a montré qu'à basse fréquence les cônes et les bâtonnets répondent mais qu'au-dessus de 20 Hz seuls les cônes réagissent. Cela est à l'origine d'un autre ERG (ERG flicker) du protocole international qui permet d'isoler l'activité des cônes.

**(3) Fluctuations dépendantes du patient**

(a) Fluctuations avec l'âge :

L'onde b diminue avec l'âge de façon régulière. On a évalué cette diminution à environ 2,5 microvolts par an entre 10 ans et 70 ans. L'onde a, en revanche, reste stable.

(b) Fluctuations avec la longueur de l'oeil :

L'onde b de l'ERG a une amplitude qui est liée à la longueur axiale de l'oeil : plus ample chez les hypermétropes et plus petite chez les myopes.

(c) Fluctuations avec le sexe :

Les femmes ont un ERG en moyenne un peu plus ample que celui des hommes probablement dû au fait que leurs yeux sont de longueur axiale légèrement plus courte.

**d) Intérêt en pathologie**

On peut classer les atteintes ERG en trois catégories :

Les atteintes de système rétinien qui sont des pertes d'activité spécifique soit des cônes, soit des bâtonnets, ou encore une atteinte mixte que l'on découvre lors d'une anomalie pour une longueur d'onde et/ou fréquence temporelle déterminée.

Les atteintes de couche que l'on découvre en étudiant les ondes : Les anomalies sont-elles spécifiques de l'onde a, de l'onde b ou des deux ?

Les atteintes de zone rétinienne sont difficilement repérables en ERG Ganzfeld. On les découvre, en général, lors de l'examen d'ERG multifocal qui, lui, stimule zone par zone la rétine.

L'ERG en pathologie est intéressant pour le diagnostic d'affections rétiniennes mais également pour juger de l'évolution d'une maladie (dans ce cas, les examens sont régulièrement répétés).

Par exemple les atteintes des systèmes (cônes et bâtonnets) peuvent être déduites de certaines altérations des ondes a et b selon les conditions de stimulation. L'analyse de l'ensemble des anomalies, confrontée à d'autres éléments de l'examen ophtalmologique, guidera vers tel ou tel diagnostic.

Par exemple lors d'une atteinte des bâtonnets (système scotopique), l'amplitude de l'onde b en stimulation bleue scotomiser sera réduite (onde b2 absente ou diminuée). Par contre, l'ERG flicker sera normal puisqu'il reflète l'activité des cônes.

Pour une plus grande simplicité et une meilleure compréhension, nous avons choisi de présenter les variations des ondes de l'ERG sous forme de tableaux.

Altération des composantes photopiques		
Etat d'adaptation	Stimulus	Modification des ondes
Rétine adaptée à la lumière (ambiance photopique)	Blanc standard (ERG cône)	Ondes a et b absentes ou diminuées
	Rouge	Onde a et onde b chutent
	ERG Flicker	Diminution d'amplitude ou tracé plat
Rétine adaptée à l'obscurité (ambiance scotopique)	Bleu ou blanc atténué (ERG rod)	Onde b2 normale
	Blanc standard (ERG max)	Onde a diminuée ou absente Onde b diminuée (disparition de b1)
	(ERG Osc)	Potentiels oscillatoires diminués ou absents

**Figure 16 : Atteintes des cônes.**

Altération des composantes scotopiques		
Etat d'adaptation	Stimulus	Modification des ondes
Rétine adaptée à la lumière (ambiance photopique)	Blanc standard (ERG cône)	onde a et onde b normales
	Rouge	Onde a et onde b normales
	ERG Flicker	normal
Rétine adaptée à l'obscurité (ambiance scotopique)	Bleu ou blanc atténué (ERG rod)	Onde b2 absente ou diminuée
	Blanc standard (ERG max)	Onde a normale Onde b pointue et diminuée (disparition de b2)
	(ERG Osc)	Potentiels oscillatoires normaux

**Figure 17 : Atteintes des bâtonnets.**

diminution de l'onde b et des potentiels oscillatoires		
Etat d'adaptation	Stimulus	Modification des ondes
Rétine adaptée à la lumière (ambiance photopique)	Blanc standard (ERG cône)	onde a hyper ample onde b diminuée ou absente
	Rouge	Onde a normale et onde b diminuée
	ERG Flicker	diminué
Rétine adaptée à l'obscurité (ambiance scotopique)	Bleu ou blanc atténué (ERG rod)	Onde b2 absente ou diminuée
	Blanc standard (ERG max)	Onde a hyper ample Onde b diminuée
	(ERG Osc)	Potentiels oscillatoires absents ou altérés

**Figure 18 : Atteintes des couches internes.**



## 2. Le Pattern-ERG , ERG Damier

### a) Principe

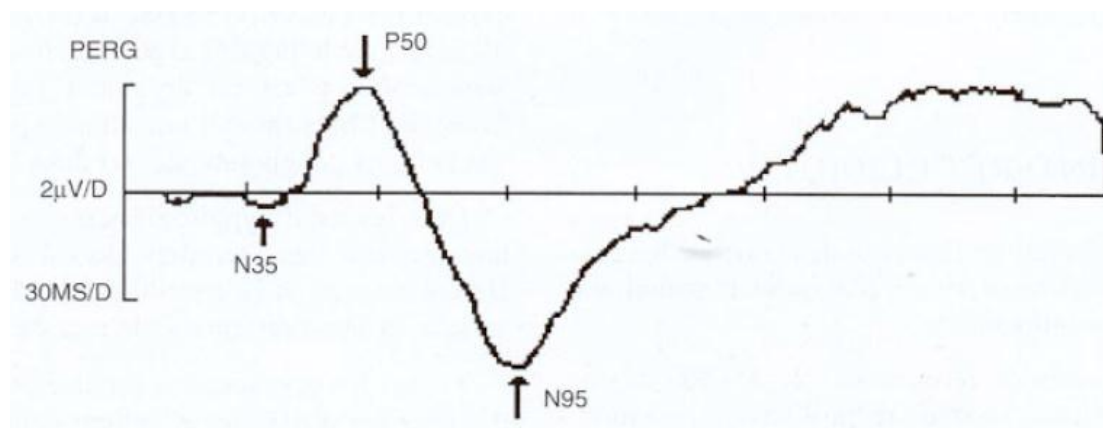
Le Pattern-ERG (P-ERG) est l'enregistrement de l'ERG obtenu en stimulant la rétine avec des mires.

#### (1) Origine :

Le P-ERG est obtenu en stimulant la rétine avec un damier noir et blanc. Puisqu'il y a autant de carrés noirs que de carrés blancs, la luminance moyenne du stimulus reste constante lorsqu'on inverse le damier. Le passage de l'obscurité à la lumière et inversement provoque des courants dans la partie de rétine sur laquelle se projette chaque damier et donc une réponse électrorétinographique au sens traditionnel du terme. Dans la pratique ces courants locaux sont cependant peu contributifs au signal global enregistré. En fait, il a été démontré que le P-ERG avait son origine dans la rétine interne. Le P-ERG explore donc d'autres structures que l'ERG classique.

#### (2) Description :

Le Pattern-ERG est constitué de deux ondes principales P50 et N95 et d'une onde moins étudiée N35.



**Figure 19 : Tracé d'un P-ERG normal.**

On mesure l'amplitude de P50 à partir du bas de N35 jusqu'au pic et l'amplitude de N95 à partir de ce dernier.

Ces chiffres correspondent aux latences habituelles. L'amplitude totale du P-ERG normal est de l'ordre de  $5\ \mu\text{V}$ . Cette très faible amplitude explique la difficulté d'enregistrement en pratique.

N95 serait sensible au contraste et à la fréquence spatiale du stimulus et donc plus spécifique des cellules ganglionnaires. P50 est peu sensible aux différentes fréquences spatiales mais présente une sensibilité à la luminance et serait liée à la rétine interne en général.

C'est l'aire maculaire qui répond principalement : l'amplitude du P-ERG diminue fortement lorsqu'on s'éloigne de la macula.

## **b) La réalisation**

Puisque la rétine doit être stimulée avec une mire, il faut qu'une image nette de celle-ci puisse se former sur la rétine. Les électrodes cornéennes (coques) sont donc impropres. En effet, une mauvaise focalisation sur la rétine réduit fortement l'amplitude du P-ERG. La Gold foil, la DTL ou encore celle en carbone sont les seules utilisables. Le patient doit porter sa correction optique pour voir nettement l'écran. La dilatation pupillaire n'a, en général, pas d'influence significative sur le résultat de l'examen. L'électrode indifférente est placée sur la tempe.

Puisque le signal est petit, il faut une technique soignée pour avoir le moins de parasites possibles. De plus, on fait un grand nombre de stimulations pour extraire le signal du bruit de fond, habituellement 400. Un bon programme de rejet d'artefacts est nécessaire ; 4 à 8 inversions par seconde du damier habituel. L'examen dure entre 1 et 2 minutes. Il est impossible d'empêcher les clignements qui sont la source d'artefacts la plus importante. Il faut donc procéder par courtes séquences d'une quinzaine de secondes.

## **c) Intérêt en pathologie**

Le pattern-ERG, reflet de l'activité des couches les plus internes de la rétine, a permis d'aborder la pathologie des cellules ganglionnaires et donc permet d'élargir l'intérêt de l'ERG.

Il est particulièrement intéressant dans certaines maladies de l'oeil où l'atteinte rétinienne concerne la couche ganglionnaire. C'est le cas du glaucome. En effet, dans les atteintes rétinienne : le P-ERG a une amplitude diminuée. Le glaucome a suscité de nombreuses études. Les résultats sont encore controversés. Toutefois, il est admis que le PERG est altéré lorsqu'on constate des altérations de la papille et du champ visuel. L'altération du P ERG porte principalement sur les deux ondes P50 et N95. Elle est particulièrement marquée avec des fréquences spatiales moyennes (entre 0,5 et 2 cycles par degré). Les altérations se manifestent surtout à des fréquences temporelles élevées (de l'ordre de 15 Hz).

Contrairement à l'ERG classique qui est largement utilisé, le P-ERG reste une méthode appliquée surtout à la recherche. Ceci est en partie liée aux difficultés techniques de l'examen.



## **b) La réalisation**

Les réponses électriques de l'oeil sont enregistrées avec des électrodes cul-de-sac conjonctival comme pour l'examen du P-ERG, mais la nature spéciale du stimulus et l'analyse produit une carte typographique des réponses de l'ERG. La rétine est stimulée par

un moniteur d'ordinateur ou autre appareil capable de générer des mires. Les motifs semblent clignoter au hasard mais chaque élément (hexagone) suit une séquence fixe, prédéterminée appelée « M séquence » telle que la luminance globale de l'écran soit relativement stable. Les données peuvent être affichées de plusieurs façons telles qu'un tableau topographique ou une courbe en trois dimensions.

Il est important de garder en mémoire que les tracés de l'ERG multifocal ne sont pas des réponses électriques directes d'une région locale de la rétine. Les formes d'onde sont une extraction mathématique des signaux qui corrèlent avec le moment où une portion de l'écran stimulant est illuminé.

La forme d'onde typique de la réponse primaire de l'ERG multifocal (également appelée réponse du 1<sup>er</sup> ordre ou 1<sup>er</sup> ordre Kernel K1) est une onde biphasique avec une déflexion négative suivie d'un pic positif. Il peut y avoir une seconde déflexion négative après le pic. On nomme respectivement ces trois pics N1, P1 et N2. Il y a des similitudes entre cette forme d'onde et l'ERG classique mais ils ne sont probablement pas identiques.

Les connaissances sur ce sujet comme l'origine cellulaire de la réponse sont encore incomplètes. Il serait donc prématuré de supposer une simple corrélation entre l'onde de l'ERG multifocal et certaines classes de cellules de la rétine. Cependant, des études ont montré que la réponse N1 provient des mêmes cellules que l'onde a.

La transduction visuelle est certainement le domaine de la biochimie moléculaire qui a le plus évolué depuis les vingt dernières années. La compréhension de l'enchaînement des différentes étapes de la perception rétinienne de la lumière a permis, d'une part, de savoir définitivement comment les vertébrés voyaient et, d'autre part, de mieux appréhender d'autres mécanismes moléculaires tels que l'expression intracellulaire de la fixation d'une hormone sur son récepteur.

## IV. A-propos d'un cas

### 1. Description du cas :

#### ➤ Généralités et symptômes initiaux :

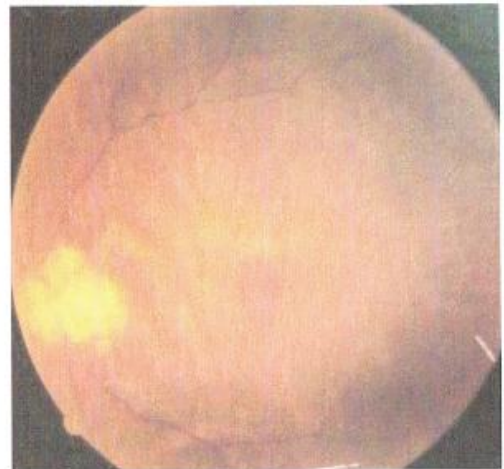
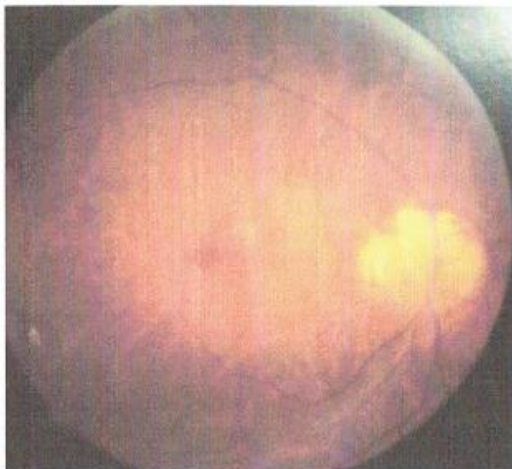
-Mr. P. 56 ans né de parents consanguins une sœur qui présente la même symptomatologie.

#### - Examen ophtalmolo :

- ✓ Normal en 2011
- ✓ Notion d'HTIO avec atrophie optique bilatérale
- ✓ Apparition progressive d' une héméralopie et d' une baisse visuelle bilatérale

#### ➤ Examen ophtalmologique

- AV œil droit : 7/10é P2 avec -1,75 (-0,75 à 110)
- AV œil gauche : 8/10é P2 avec -1,00 ( -0,75 à 115)
- TO : 22 mmHg aux 2 yeux





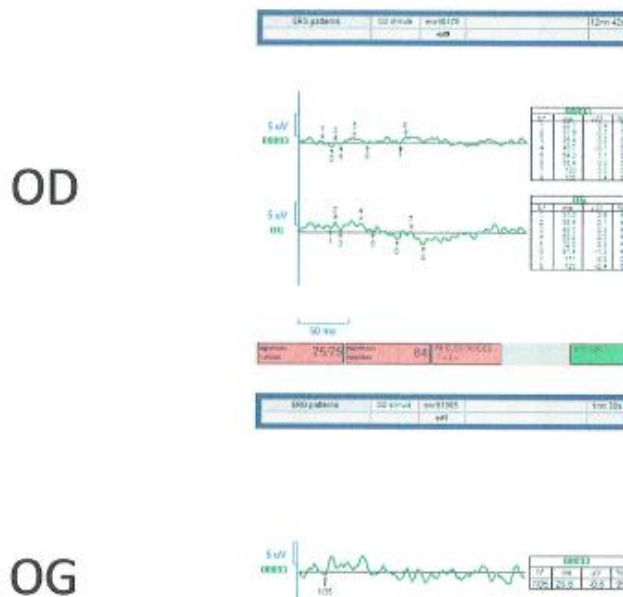
## ➤ ERG grand champ séquences 1 et 2 scotopique



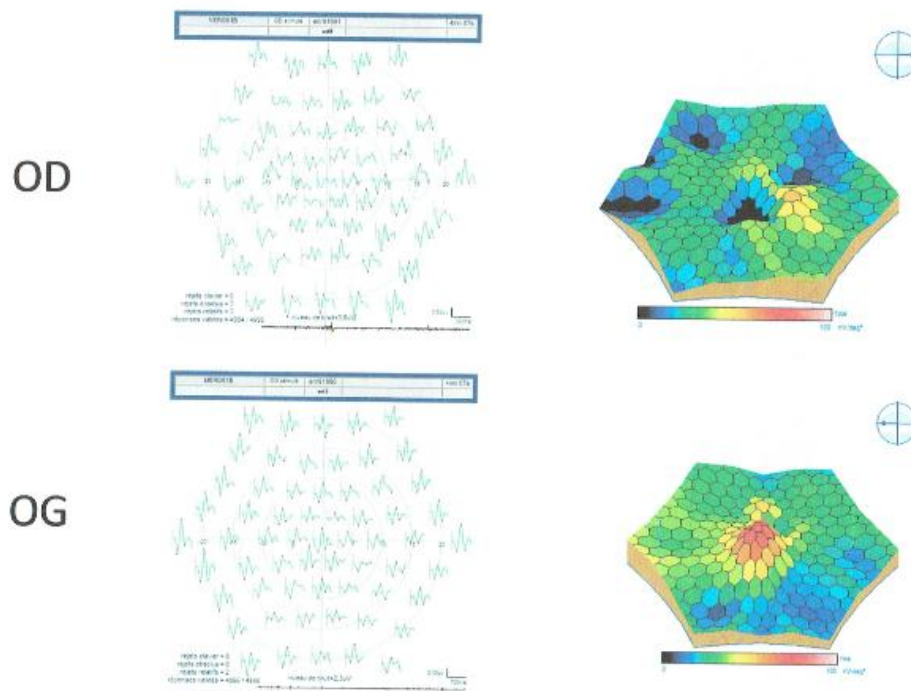
## ERG grand champ séquences 3, 4 et 5 photopique



## ➤ ERG Pattern



## ➤ ERG Multifocal



## 2. Synthèse examens électrophysiologiques

- ✓ Dysfonctionnement rétinien bilatéral et symétrique en photopique
- ✓ Dysfonction rétinienne asymétrique au pôle postérieur plus sévère à droite qu' à gauche
- ✓ Rétinopathie pigmentaire type rod-cone dystrophy
- ✓ Les anomalies PEV sont expliquées par une atteinte des nerfs optiques associée ( glaucome et/ou neuropathie optique dans le cadre de sa pathologie ?).



# Conclusion

L'ERG est un examen fonctionnel de la rétine dont la réponse est dépendante de nombreux paramètres. Les techniques évoluent constamment, Les premiers ERG (Ganzfeld et Pattern), ne permettaient qu'une réponse globale de la rétine. L'ERG multifocal est capable de donner une réponse localisée de la rétine. Cette technique est très prometteuse même si les connaissances à son sujet sont encore incomplètes.

A l'avenir, on sera capable d'explorer la rétine à l'échelle cellulaire, C'est-à-dire qu'on pourra stimuler un cône ou un bâtonnet, Ces techniques améliorent le diagnostic des maladies et font également progresser la recherche sur le fonctionnement complexe de la rétine.

Grace à ces connaissances, on pourra dans quelques années implanter une rétine artificielle chez l'homme sous forme de puce électronique qui renverrait exactement les mêmes informations au cerveau qu'une rétine humaine.

# Bibliographie

## Ouvrages de référence :

1. RISSE J.-F.

***Exploration de la Fonction Visuelle – Applications au domaine sensoriel de l’oeil normal et en pathologie.***

Editions MASSON, 1999.

2. BOCQUET X.

***Analyse Fréquentielle en Electrophysiologie Visuelle : Potentiel Evoqué Visuel et Electrorétinogramme.***

Thèse présentée à l’Université du Droit et de la Santé de Lille II, 1989.

3. CHAINE G., CORBE C., MENU J.-P.

***Traité d’Optique Physiologique et Clinique.***

Editions DOIN, 1993.

4. BOYER R.-L., JAYLE G.-E., SARACCO J.-B.

***L’Electrorétinographie – Bases physiologiques et données cliniques***

Tome premier, Editions MASSON, 1965.

5. LE GARGASSON J.-F., RIGAUDIERE F.

***Explorations Electrophysiologiques sensorielles (ERG, EOG, PEV)***

Article de l’Encyclopédie Médico-Chirurgicale, Ophtalmologie, 21046 A-10, 1993

6. HOOD D., KEATING D., KONDO M., MARMOR M.F., MIYAKE Y., SEELIGER M.

***Guidelines for Basic Multifocal Electroretinography.***

Publié par l’I.S.C.E.V. (International Society for Clinical Electrophysiology of Vision)

7. VERNON ODOM J.

***Kernel Analysis.***

Article tiré de *Principles and Practice of Clinical Electrophysiology of Vision*, p 254.

8. IMBERT M.

***La Rétine et son Fonctionnement.***

Science et Vie, Hors Série, N° 216, Septembre 2001.

## Autres ouvrages :

9. DUCASSE A., SEGAL A.

***Anatomie de la Rétine.***

Article de l'Encyclopédie Médico-Chirurgicale, Ophtalmologie, 21003 C-40, 4-12-10, 1987.

10. BULLIER J., BARONE P.

***Voies Optiques Intracrâniennes et Lobe Occipital : anatomie, fonction, développement.***

Article de l'Encyclopédie Médico-Chirurgicale, Ophtalmologie, 21008 A-40, 1997.

11. BACIN F., RIGAL D.

***Les Phénomènes Chimiques de la Vision.***

Article de l'Encyclopédie Médico-Chirurgicale, Ophtalmologie, 21026 D-10, 4-1-12.

12. DOLY M.

***Phénomènes Chimiques de la Vision et Transmission Synaptique de la Rétine.***

Article de l'Encyclopédie Médico-Chirurgicale, Ophtalmologie, 21026 K-10, 1997.

13. BUSER P., IMBERT M.

***Vision – Neurophysiologie Fonctionnelle.***

Editions HERMANN, Collection METHODES, 1987.

14. CORBE C., MENU J.-P.

***Stimulus Visuel et Différentes Fonctions Visuelles.***

Article de l'Encyclopédie Médico-Chirurgicale, Ophtalmologie, 21027 A-20, 1991.

15. ARDEN G. B., HECKENLIVELY J. R.

***Principles and Practice of Clinical Electrophysiology of Vision.***

Mosby Year Book, 1991.

16. DOLLFUS H., FLAMENT J., MACK G., MOHAND-SAID S., SAHEL J.

***Nouveau Mode d'Enregistrement de l'Activité Rétinienne : ERG multifocal.***

Journal Français d'Ophtalmologie, Volume 22, N° 2, Mars 1999.  
Editions MASSON.

17. EVANS A., KEATING D., PARKS S.  
***Technical aspects of multifocal ERG recording.***  
Documenta Ophthalmologica, Volume 100, N° 2/3, 2000.
18. BOCK M., GOCKELN R., KRETSCHMANN U., ZRENNER E.  
***Clinical applications of multifocal electroretinography.***  
Documenta Ophthalmologica, Volume 100, N° 2/3, 2000.
19. KONDO M., MIYAKE Y.  
***Assessment of local cone on- and off-pathway function using multifocal ERG technique.***  
Documenta Ophthalmologica, Volume 100, N° 2, p 139-154, 2000.
20. CHISHOLM J., EVANS A., KEATING D., PARKS S.  
***The impact of fixation on the multifocal electroretinogram.***  
Documenta Ophthalmologica, Volume 102, 2001.
21. HAEGERSTROM-PORTNOY G., VERDON W.  
***Topography of the multifocal electroretinogram.***  
Documenta Ophthalmologica, Volume 95, N° 1, 1998.
22. CHISHOLM J., EVANS A., KEATING D., PARKS S.  
***The impact of fixation on the multifocal electroretinogram.***  
Documenta Ophthalmologica, Volume 102, N° 2, p 131-139, 2001.
23. ANDRASSI M., BELITSKY L., BOCK M., LORENZ B.  
***A comparison of two multifocal ERG systems.***  
Documenta Ophthalmologica, Volume 97, N° 2, p 157-178, 1998.

L'électrorétinogramme (ERG) est une technique permettant de recueillir les signaux électriques générés par la rétine puis de les analyser par système informatique.  
On découvre ainsi, grâce à l'ERG, certaines maladies liées à la rétine.

The ERG is a technic which allowed to collect electric signals produced by the retina and then to analyse them by processing system.  
So, we can discover thanks to the ERG some troubles linked to the retina.

Die ERG ist ein Technic erlaubt zu sammeln elektrisch Zeichen hervor von der Auge dann untersuchen bei electtoische Datenverarbeitung System.  
Mann kann auch dank die ERG einig Krankheit brinden von der Auge entdecken.