

UE3-1 : Biophysique – Biophysique des membranes

Chapitre 5 :

Les Récepteurs Sensoriels

Professeur Alim Louis BENABID
Professeur Alessandro VILLA

Année universitaire 2011/2012

Université Joseph Fourier de Grenoble - Tous droits réservés.

5. Récepteurs sensoriels

5.1. Sensibilité

5.1.1. Caractéristiques psychophysiques

5.1.2. Types de récepteurs

5.2. Phénomène de transduction

5.2.1. Mécanisme général

5.2.2. Phototransduction

5.3. Codage neuronal

5.3.1. Champ récepteur

5.3.2. Types de réponse

5.3.3. Codage spatial

5.3.4. Codage fréquentiel

5.3.5. Codage temporel

5.3.6. Codage spatio-temporel

5. Récepteurs sensoriels

5.1. Sensibilité

5.1.1. Caractéristiques psychophysiques

5.1.1.1. Qualité (modalité)

Stimulation = apport d'énergie

Différentes **formes d'énergie** sont transformées par le système nerveux en différentes sensations ou **modalités sensorielles**

Historiquement = les 5 sens: **vision, audition, toucher, goût, odorat**
mais aussi autres modalités, p.ex. **VESTIBULAIRE** (équilibre , accélération)

Selon l'énergie physique mesurée:

PHOTO-R

lumière

CHEMO-R

structure moléculaire

BARO-R

pression

VOLO-R

volume

MECANO-R

déplacement

5. Récepteurs sensoriels

5.1. Sensibilité

5.1.1. Caractéristiques psychophysiques

5.1.1.2. Quantité

A. Intensité

- ← quantité d'énergie reçue
- ← modalité sensorielle

Loi de Stevens $I = k (S - S_0)^n$

I = intensité (grandeur perçue)

k = constante

S = intensité du stimulus (grandeur physique)

S_0 = intensité seuil

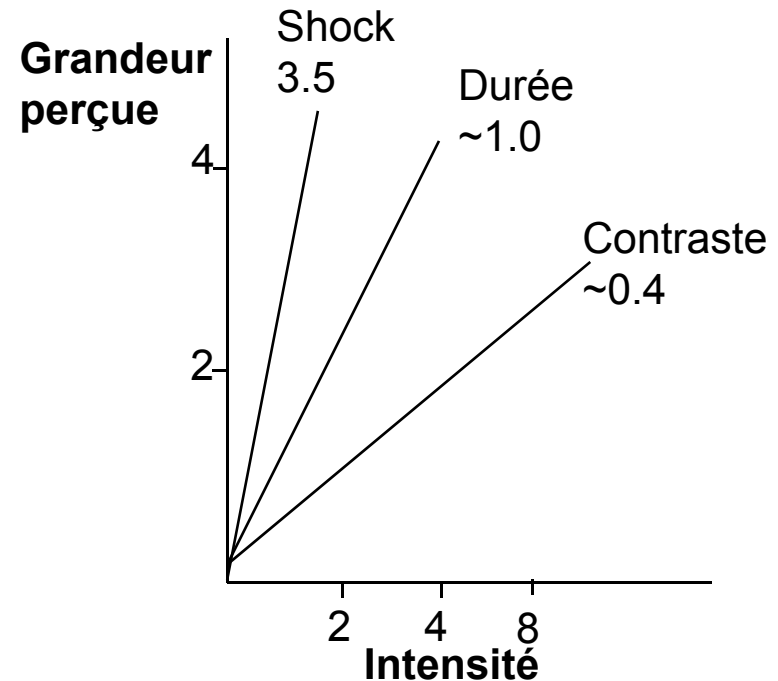
n = coefficient propre à chaque modalité

B. Durée

- adaptation rapide, lente
- réponse phasique: transitoirement au début de la stimulation
- réponse tonique: soutenue pendant toute la durée de la stimulation

C. Localisation

- situer le site d'où provient la stimulation
- distinguer deux sites voisins (p.ex. deux points sur la peau)



5. Récepteurs sensoriels

5.1. Sensibilité

5.1.2. Types de récepteurs

5.1.2.1. Généralités

Objectif commun: **INTERFACE** entre une variation d'énergie et sa mesure

stimulus X \rightarrow signal électrique spécifique
stimulus \leftrightarrow structure du récepteur

Les récepteurs sensoriels correspondent généralement à des structures spécialisées situées au niveau de la membrane cellulaire des cellules réceptrices

Ces structures ne sont généralement pas présentes sur toute la membrane, mais à des endroits particuliers de la cellule (“polarisation de la cellule”, p.ex. membrane apicale, membrane basale, etc.)

Ces structures transforment l'énergie physique en énergie électrochimique

\rightarrow langage commun pour tous les systèmes sensoriels

\Rightarrow **TRANSDUCTION**

Comment faire pour distinguer des stimuli différents de même modalité et entre les modalités?

\Rightarrow **CODAGE NEURONAL**

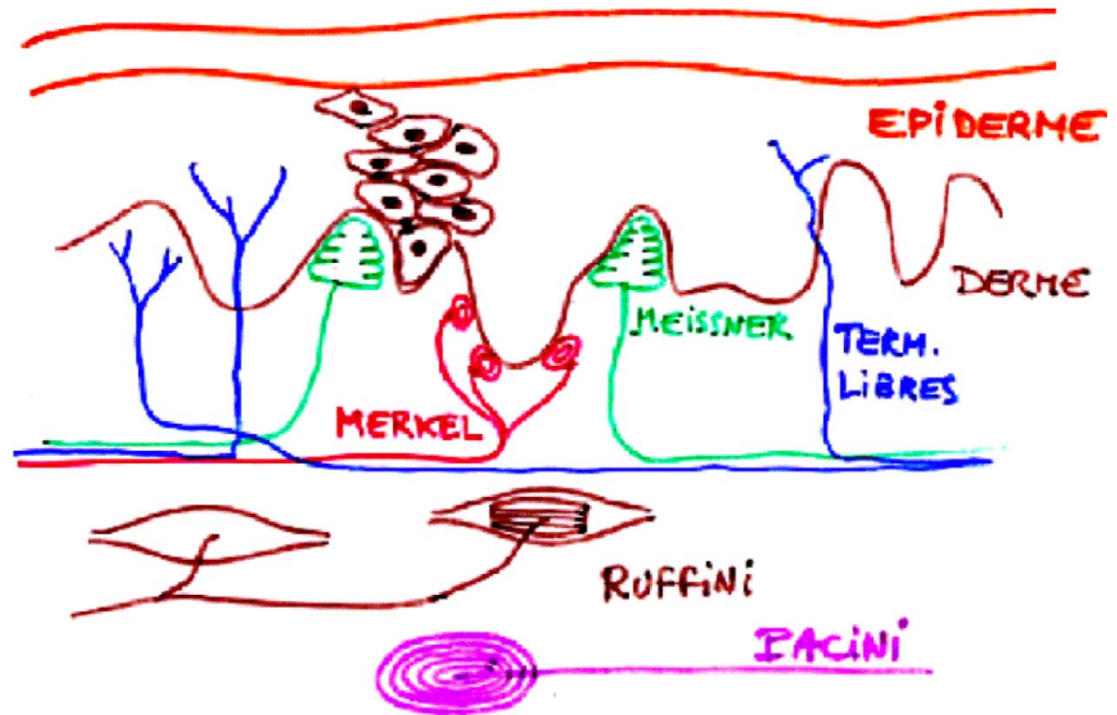
5. Récepteurs sensoriels

5.1. Sensibilité

5.1.2. Types de récepteurs

5.1.2.2. Récepteurs cutanés

Récepteurs "encapsulés":
par ex. **MEISSNER**, **PACINI**:
TACT, PRESSION



Terminaisons libres:

Derme: **DOULEUR**

Follicule pileux: **MOUVEMENTS ?**

follicule pileux:



MOUVEMENTS ?
TACT

5. Récepteurs sensoriels

5.1. Sensibilité

5.1.2. Types de récepteurs

5.1.2.3. Récepteurs arthro-musculaires



Fuseau neuro-musculaire:

- récepteurs en **parallèle**: sensibilité à l'**allongement**

Organe de Golgi (fuseau neuro-tendineux):

- récepteurs en **série**: sensibilité à la force de **contraction**

5. Récepteurs sensoriels

5.1. Sensibilité

5.1.1. Caractéristiques psychophysiques

5.1.2. Types de récepteurs

5.2. Phénomène de transduction

5.2.1. Mécanisme général

5.2.2. Phototransduction

5.3. Codage neuronal

6.3.1. Champ récepteur

6.3.2. Types de réponse

6.3.3. Codage spatial

6.3.4. Codage fréquentiel

6.3.5. Codage temporel

6.3.6. Codage spatio-temporel

5. Récepteurs sensoriels

5.2. Phénomène de transduction

5.2.1. Mécanisme général

5.2.1.1. Potentiel récepteur

RECEPTEUR = structure membranaire dont V_m change sous l'effet d'un stimulus

⇒ ↓ résistance membranaire

↑ perméabilité aux ions

⇒ DEPOLARISATION LOCALE = potentiel récepteur

La variation du **potentiel récepteur** est :

- graduée, lente
- propagation décroissante, locale
- sommable dans le temps
- amplitude :
 - proportionnelle au Log (intensité) pendant la phase statique
 - f (d intensité/dt) pendant la phase dynamique

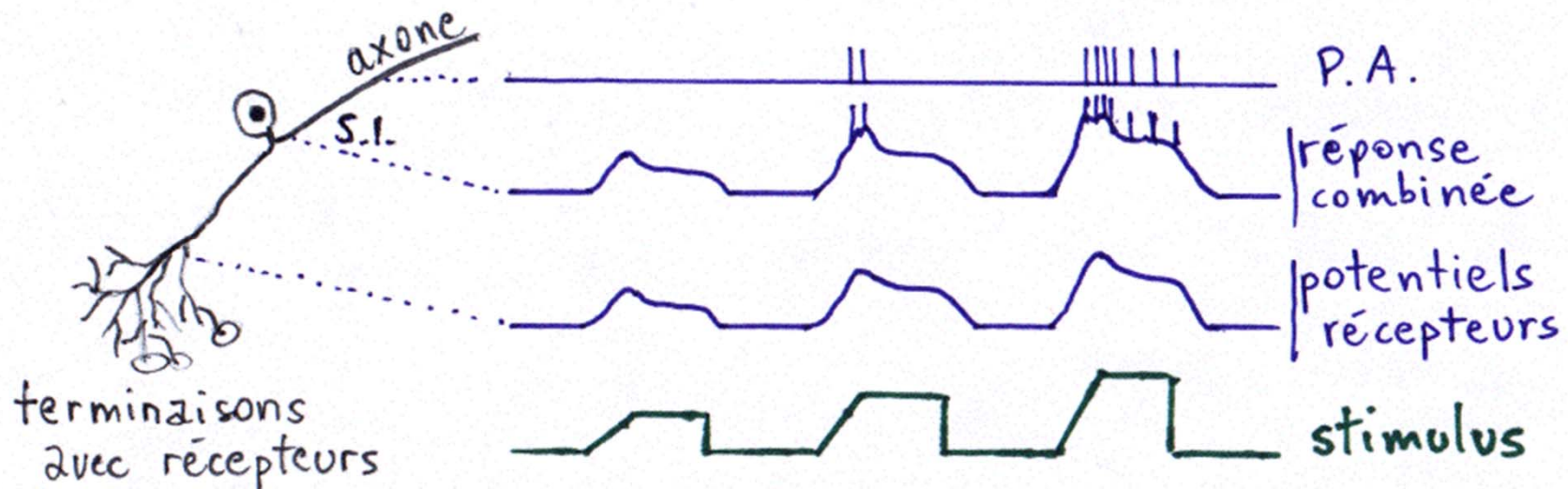
5. Récepteurs sensoriels

5.2. Phénomène de transduction

5.2.1. Mécanisme général

5.2.1.2. Initiation du PA

- existence d'un **SEUIL**
 - dépolarisation de la membrane du récepteur → COURANTS LOCAUX
- ⇒ dépolarisation de la membrane de la fibre nerveuse incluse dans R
→ PA si seuil atteint



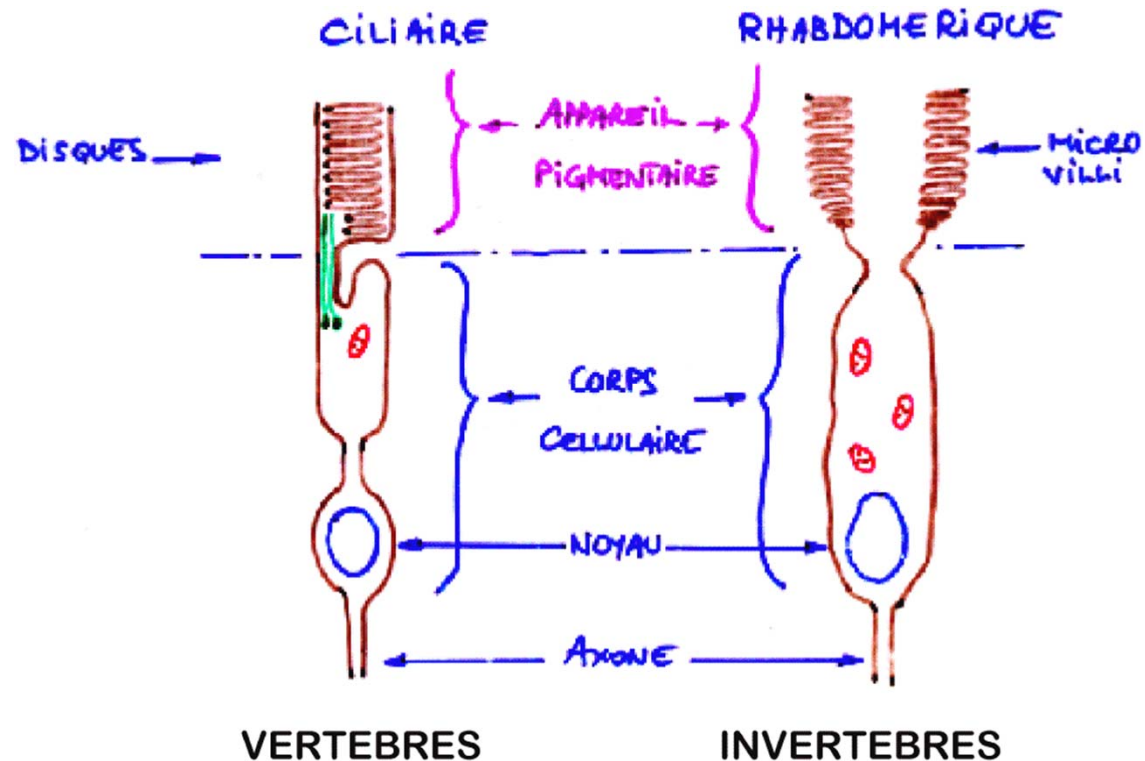
CODAGE ANALOGIQUE ⇒ CODAGE DIGITAL

5. Récepteurs sensoriels

5.2. Phénomène de transduction

5.2.2. Phototransduction

5.2.2.1. Types de récepteurs



Zone sensible = structure membranaire plissée

- en microvillosités
- en disques

⇒ ↑ surface membranaire exposée aux photons ⇔ amplification du signal

PIGMENT PHOTOSENSIBLE = convertisseur d'énergie: lumineuse → électrochimique

5. Récepteurs sensoriels

5.2. Phénomène de transduction

5.2.2. Phototransduction

5.2.2.2. Stimulus lumineux

Photons: $E = h \nu$

h : cte. de Planck = $6.62 \cdot 10^{-34}$ [J·s]

ν : fréquence, de $4.3 \cdot 10^{14}$ [s⁻¹, Hz] (IR) à $7.5 \cdot 10^{14}$ Hz (UV)

$\lambda = c / \nu$: longueur d'onde 700 nm à 400 nm

$E = h \nu = 1240 / \lambda$: 1.77 eV à 3.10 eV

c : vitesse de la lumière = $3 \cdot 10^8$ [m·s⁻¹]

Dans un milieu réfringent d'indice n : $\lambda = c / n \nu$

n : indice de réfraction (sans dimension)

5. Récepteurs sensoriels

5.2. Phénomène de transduction

5.2.2. Phototransduction

5.2.2.3. Interaction lumière-matière

- e^- de valence: 3 à 20 eV
ionisation \leftarrow UV, X, γ
- e^- changement d'orbitale: ≈ 1 eV
lumière \rightarrow ETAT EXCITE pendant 10^{-8} s

Interaction quantique :

si énergie d'excitation $e^- = h\nu \Rightarrow$ **photon absorbé**

Interaction non quantique :

si E d'excitation $e^- \neq h\nu \Rightarrow$ **distorsion moléculaire** créée par champ électromagnétique pdt 10^{-15} s

5. Récepteurs sensoriels

5.2. Phénomène de transduction

5.2.2. Phototransduction

5.2.2.4. Pigments visuels

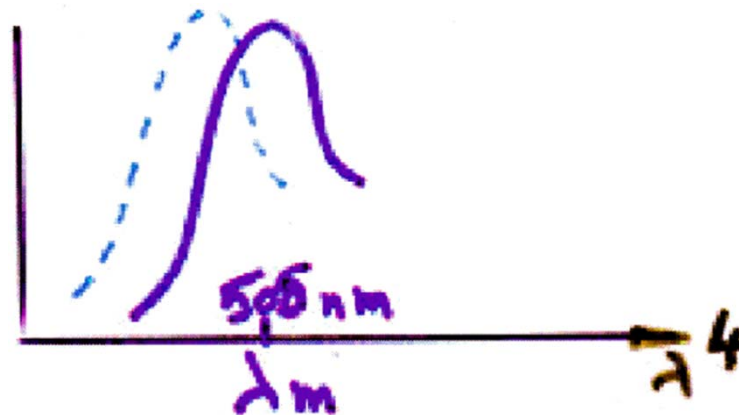
Association de

- **PROTEINE**: absorbe en **UV**
- **GROUPEMENT CHROMOPHORE**: absorbe la **lumière visible**

Ex. **RHODOPSINE** (P.M. 38000) (il y en a 10^9 par BATONNETS)

A. PROTEINE

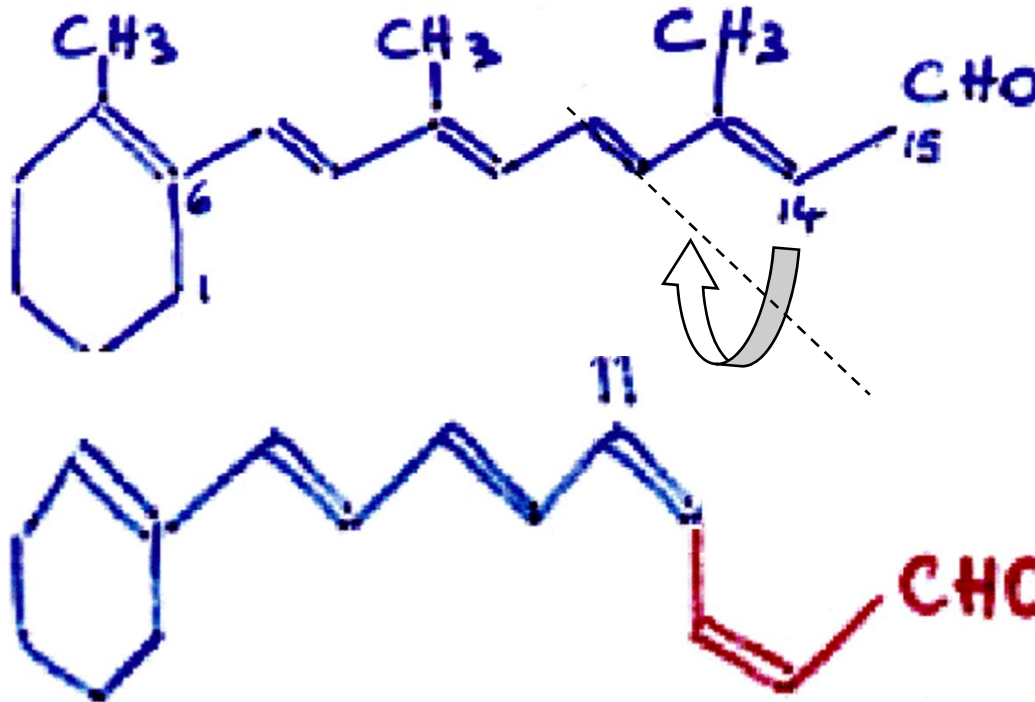
Spectre d'absorption déterminé par PROTEINE: tous les spectres \approx par translation



Hétéroprotéine: **OPSINE** : transmembranaire ou en disques selon les espèces animales

B. GROUPEMENT CHROMOPHORE

RETINENE₁ (RETINAL) : non synthétisé de novo par les mammifères



← Vitamine A₁
RETINOL (CH₂OH en ¹⁵C)

11.cis.RETINAL (cis en ¹¹C)

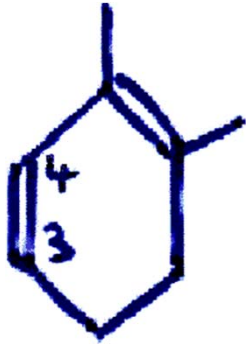
Le 11.cis.Rétinal EST LE CHROMOPHORE UNIVERSEL

Yeux résolvant les images: Mollusques, Arthropodes, Vertébrés

- ← • intense bande d'absorption (polyènes)
- isomérisation (cis/trans) à un rendement élevé
- changement structural grand
- les carotènes, qui sont des précurseurs, sont largement répandus

B. GROUPEMENT CHROMOPHORE (suite)

RETINENE II (double liaison en 3C 4C)



← Vitamine A₂

Pour une même opsine, R_{II} au lieu de R_I ⇒ ↑ λ_m de 20 nm

C. VISION COLOREE

Pour un animal:

- R_I + opsine ⇒ le λ_m correspond à son environnement
- ↑ spectre par réaction réversible R_I ↔ R_{II}
- plusieurs OPSINES déterminent les **couleurs**, vision **diurne** (cônes $3 \cdot 10^6$), **nocturne** (bâtonnets 10^9)

$h\nu + R\text{-opsine} \Rightarrow \Delta \text{ Pot. Membrane des Disques} \rightarrow \text{Pot. Récepteur} \approx \text{PPSE}$

1802 Thomas YOUNG: hypothèse 3 récepteurs fondamentaux

1950 on décrit 3 types de cellules en cônes (!! le chromophore est toujours le 11.cis.Rétinal !!)

BLEU $\lambda_m = 455 \text{ nm}$

VERT $\lambda_m = 530 \text{ nm}$

ROUGE $\lambda_m = 625 \text{ nm}$

(RHODOPSINE $\lambda_m = 505 \text{ nm}$)

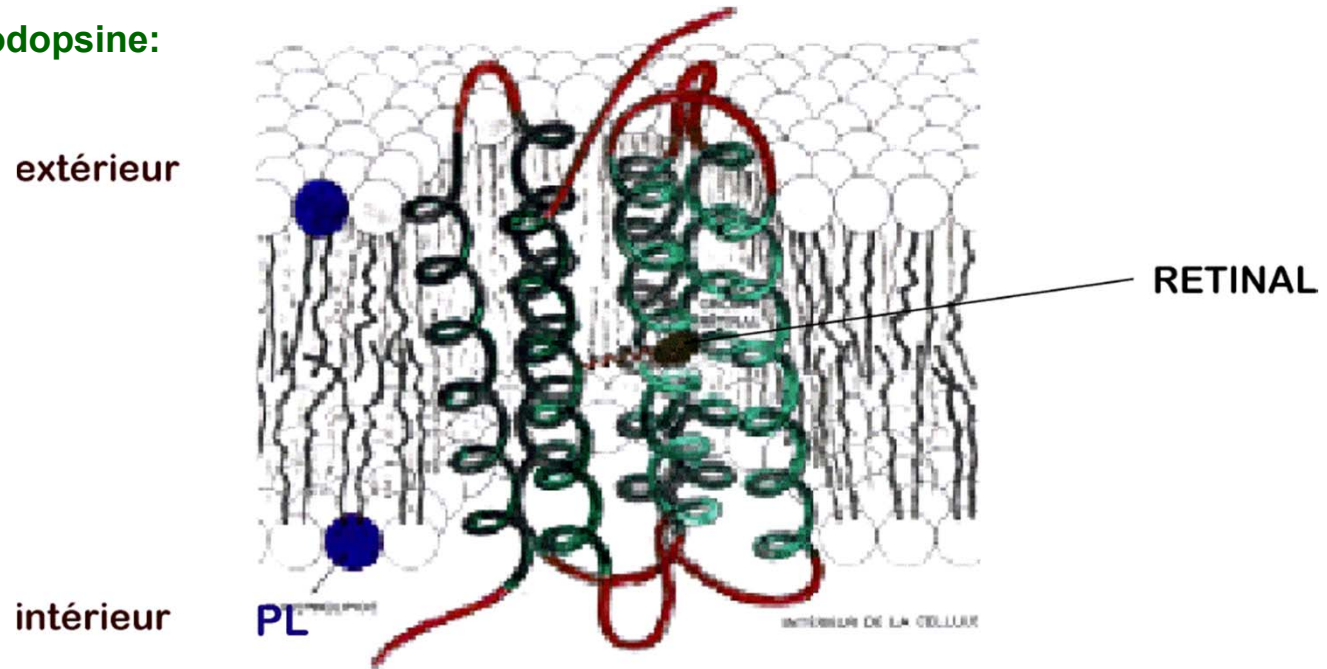
Cécité des couleurs: mutation récessive liée au sexe ← défaut ou absence d'un type d'OPSINE

1% des hommes aveugles au ROUGE

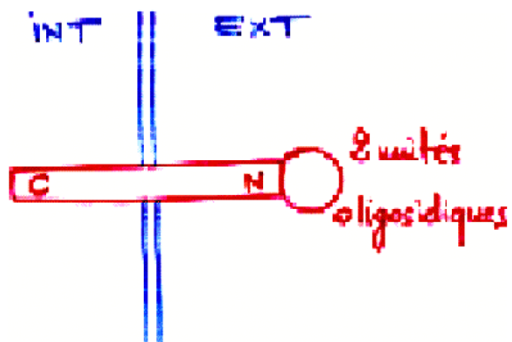
2% des hommes aveugles au VERT

D. POSITION DU PIGMENT DANS LA MEMBRANE

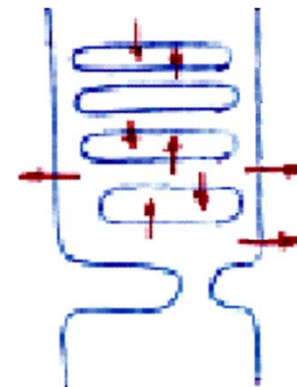
Bactériorhodopsine:



Position transmembranaire de la Rhodopsine



Formation des Disques par endocytose de la membrane



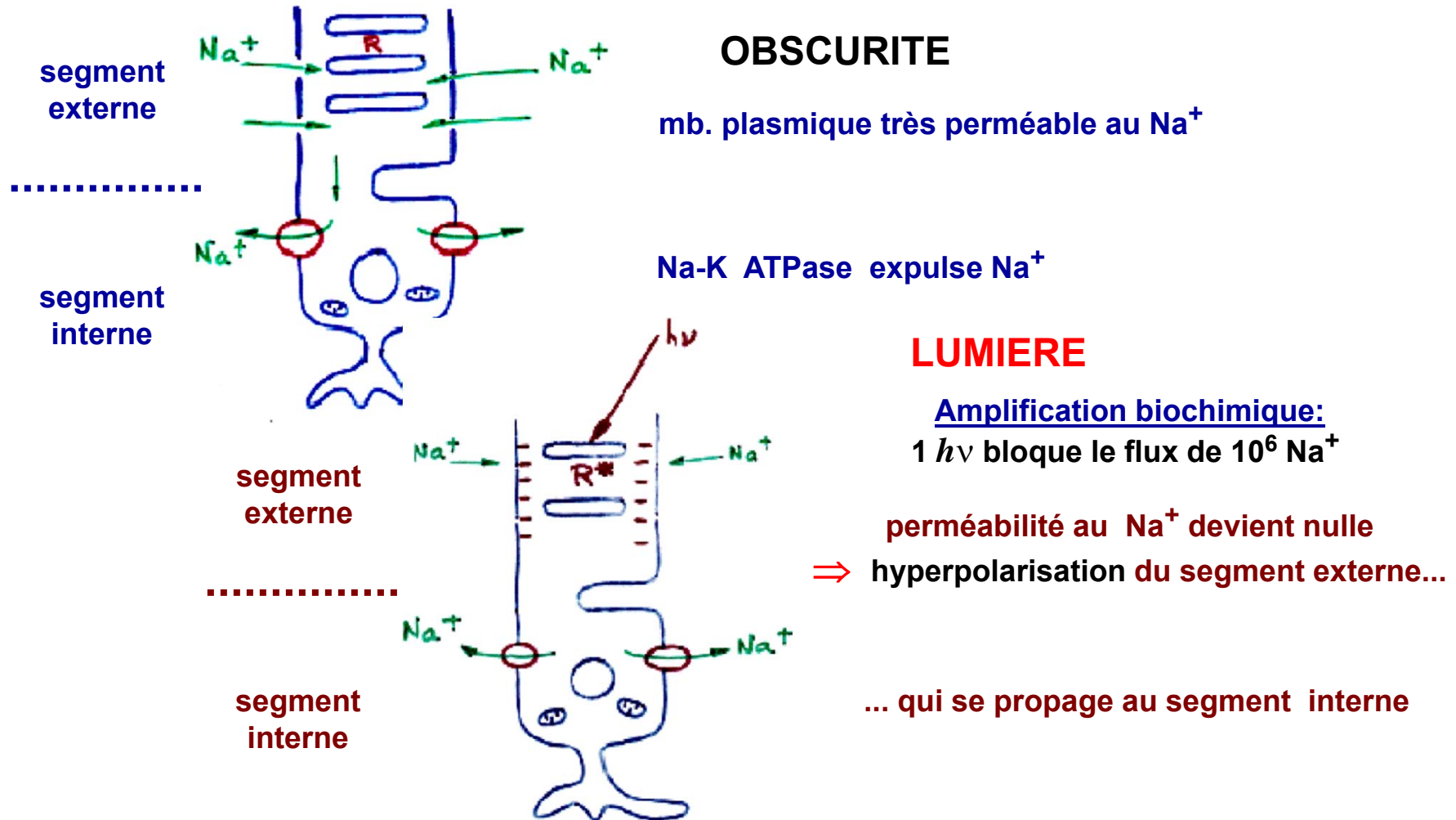
5. Récepteurs sensoriels

5.2. Phénomène de transduction

5.2.2. Phototransduction

5.2.2.5. Etapes de la phototransduction

A. LA LUMIERE HYPERPOLARISE LA MEMBRANE DU SEGMENT EXTERNE



Remarque:

- la cellule en bâtonnet n'a pas de P.A.
- réponse GRADUELLE à la lumière (potentiel récepteur)
qui dépend du nb. de photons absorbés

**Comment l'excitation lumineuse
bloque-t-elle l'entrée de Na^+ ?**

5. Récepteurs sensoriels

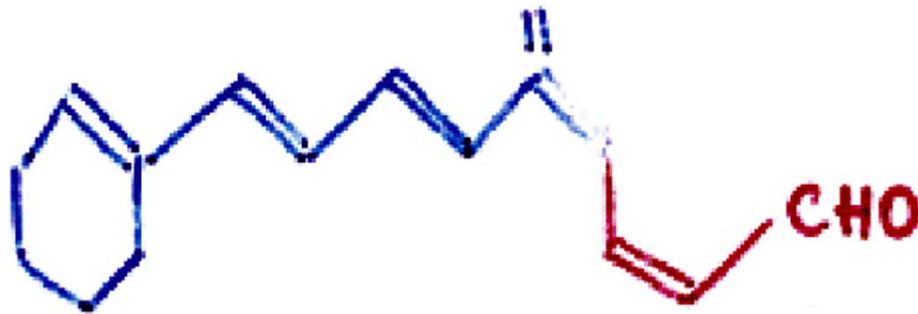
5.2. Phénomène de transduction

5.2.2. Phototransduction

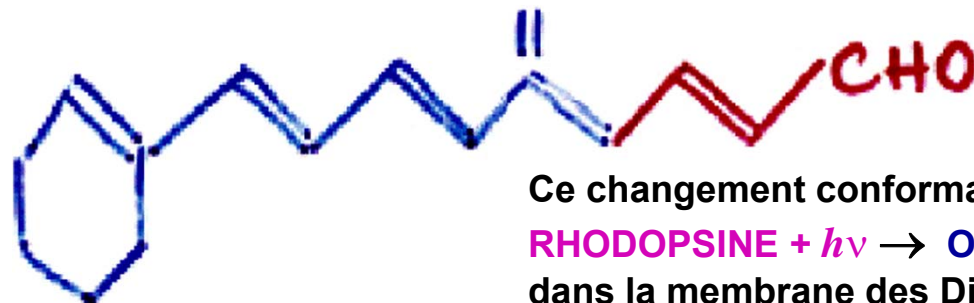
5.2.2.5. Etapes de la phototransduction

B. LA LUMIERE PHOTOLYSE LA RHODOPSINE

$h\nu$ → isomérisation du 11.cis.Rétinal (ou 11.cis.Meta-Rhodopsine) ...



... en All.trans.Rétinal (ou 11.trans.Lumi-Rhodopsine)



1 $h\nu$ a été converti en mouvement atomique = amplification électronique

Ce changement conformationnel du Rétinal entraîne la **PHOTOLYSE**
RHODOPSINE + $h\nu$ → OPSINE + All.trans.Rétinal
dans la membrane des Disques.

- la mb. des Disques (Rhodopsine) n'est pas en contact avec la mb. plasmique
- la Rhodopsine qui absorbe les $h\nu$ est à plusieurs milliers de Å des canaux à Na^+ du segment externe

Alors, comment se transmet-il le signal ? **MEDIATEURS DIFFUSIBLES: Ca^{2+} ?, GMPc ?**

C. LA PHOTOLYSE DE LA RHODOPSINE ENTRAINE L'HYDROLYSE DE LA GMPc

(1) RHODOPSINE PHOTOLYSEE

- active par collisions successives 100 molécules d'une protéine de la mb. des Disques:
la TRANSDUCINE (≈protéine G)
- puis est bloquée par une protéine de 48 kD, l'ARRESTINE (ou Antigène S)

(2) TRANSDUCINE ACTIVEE

- active, mole pour mole, une enzyme de la mb. des Disques, la PHOSPHODIESTERASE (PDE)

(3) PHOSPHODIESTERASE

- hydrolyse la GMPc (10^2 PDE pour 10^5 GMPc) $\Rightarrow 1 h\nu \rightarrow 10^5$ GMPc

(4) GMPc

- nécessaire à l'ouverture des canaux Na^+ .
- Hydrolyse GMPc \Rightarrow fermeture des canaux \Rightarrow hyperpolarisation de la mb. plasmique \Rightarrow Pot. Récepteur

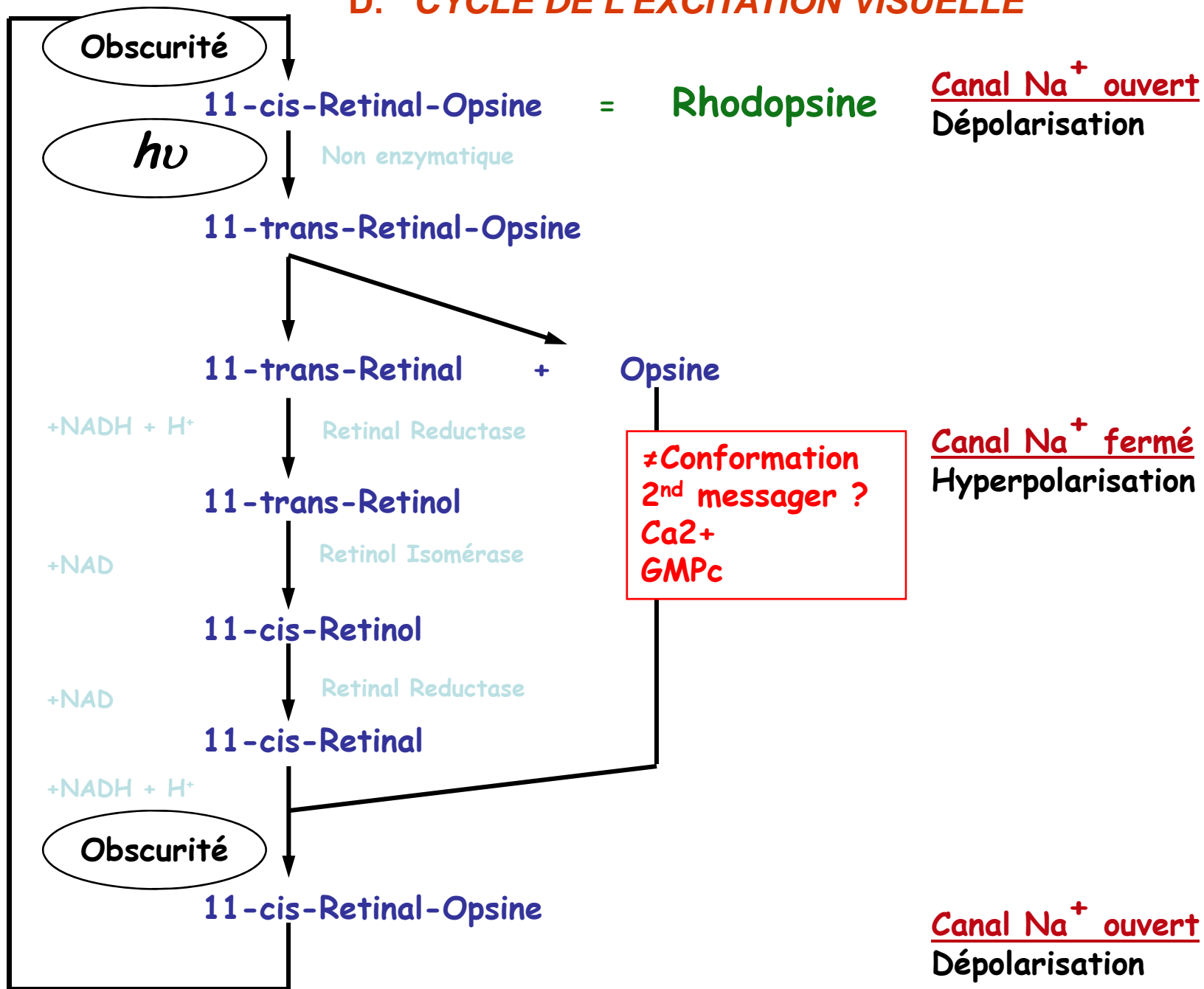
(5) ENERGIE D'HYDROLYSE DU GTP

- permet de boucler le cycle en désactivant PDE, TRANSDUCINE et RHODOPSINE photolysée et reconstituer la 11.cis.meta-Rhodopsine

(6) Ca^{2+}

- jouerait un rôle dans l'adaptation

D. CYCLE DE L'EXCITATION VISUELLE



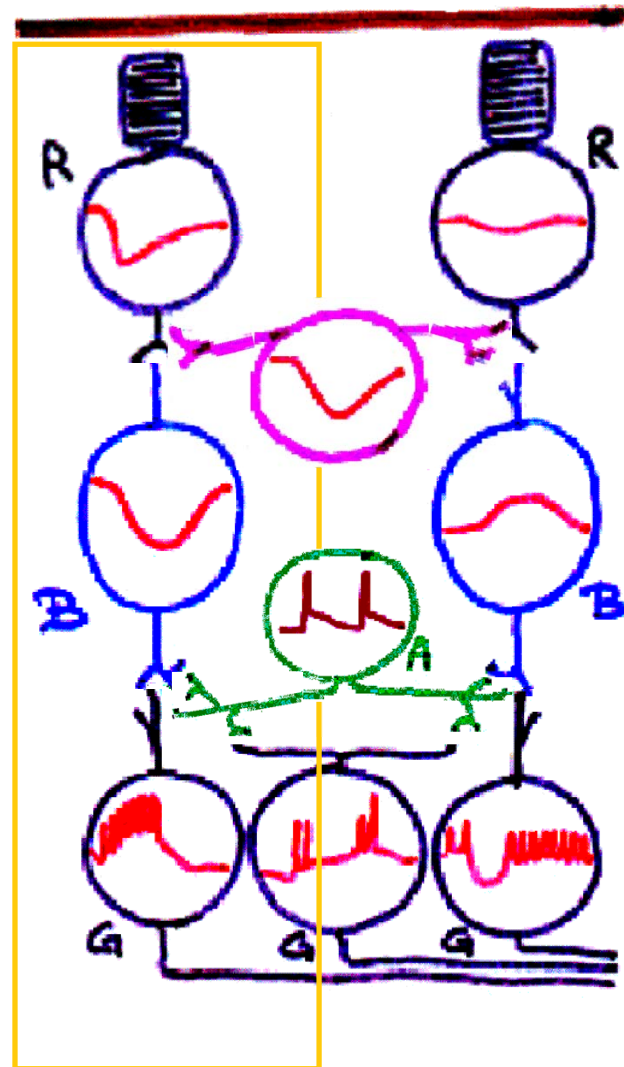
5. Récepteurs sensoriels

5.2. Phénomène de transduction

5.2.2. Phototransduction

5.2.2.6. Schéma d'organisation de la rétine

Lumière
 $h\nu$



EPITH. PIGMENTAIRE

RECEPTEURS

C. HORIZONTALE

C. BIPOLAIRE

C. AMACRINE

C. GANGLIONNAIRE

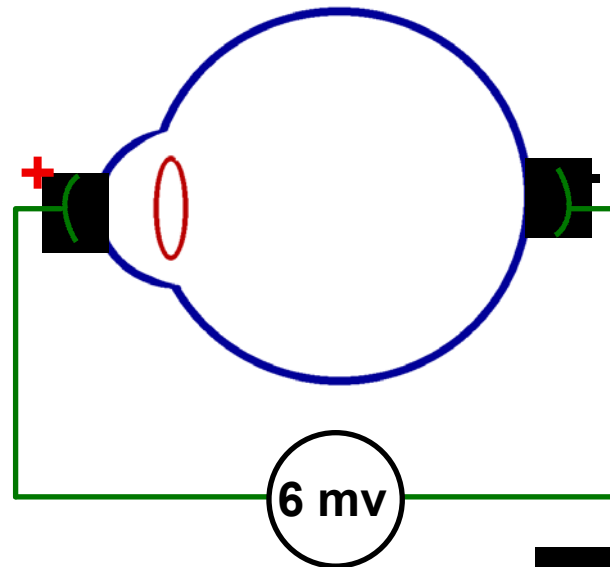
NERF OPTIQUE

5. Récepteurs sensoriels

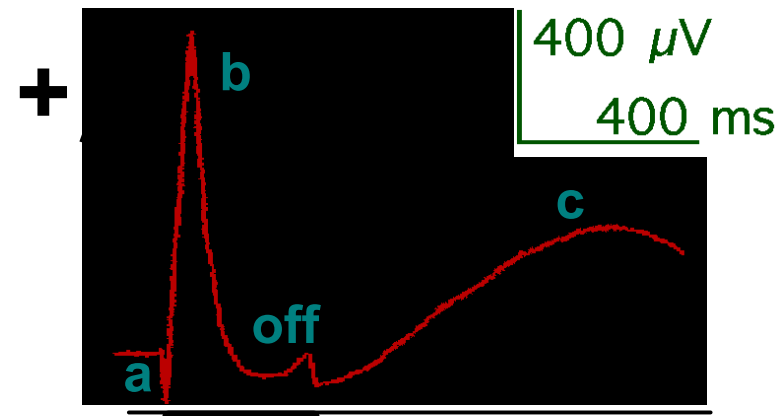
5.2. Phénomène de transduction

5.2.2. Phototransduction

5.2.2.7. Electrorétinogramme ERG



a,b : neurones
c : epith. pigmentaire



5. Récepteurs sensoriels

5.1. Sensibilité

5.1.1. Caractéristiques psychophysiques

5.1.2. Types de récepteurs

5.2. Phénomène de transduction

5.2.1. Mécanisme général

5.2.2. Phototransduction

5.3. Codage neuronal

5.3.1. Champ récepteur

5.3.2. Types de réponse

5.3.3. Codage spatial

5.3.4. Codage fréquentiel

5.3.5. Codage temporel

5.3.6. Codage spatio-temporel

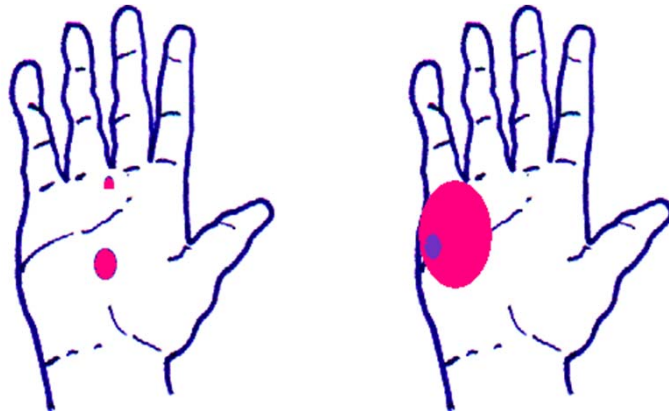
5. Récepteurs sensoriels

5.3. Codage neuronal

5.3.1. Champ récepteur

CHAMP RECEPTEUR = partie de l'espace sensoriel qui, lors de sa stimulation, modifie le potentiel de membrane d'un récepteur (périphérie) ou d'un neurone (centre)

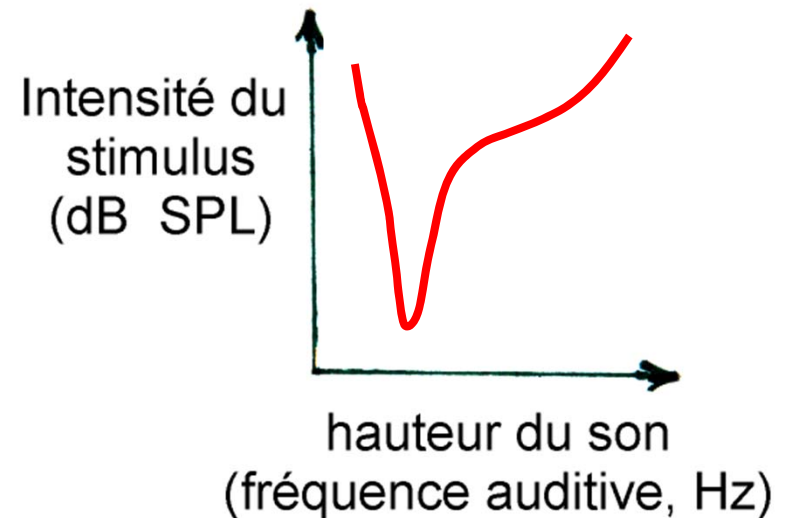
RECEPTEUR CUTANES



Meissner

Pacini

AUDITION



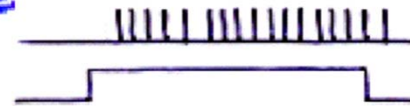
5. Récepteurs sensoriels

5.3. Codage neuronal

5.3.2. Types de réponse

5.3.2.1. Description qualitative

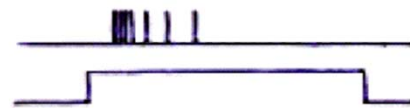
Type soutenue



Réponse
Stimulus

pendant la durée de la stimulation

Type ON



Réponse
Stimulus

transitoirement au début de la stimulation

Type OFF



Réponse
Stimulus

transitoirement à la fin de la stimulation

Type ON-OFF



Réponse
Stimulus

transitoirement au début et à la fin de la stimulation

Type INHIBÉ



Réponse
Stimulus

suppression de l'activité pendant la durée de la stimulation

5. Récepteurs sensoriels

5.3. Codage neuronal

5.3.2. Types de réponse

5.3.2.2. Description quantitative

A. SERIE TEMPORELLE (TRAIN DE PA)

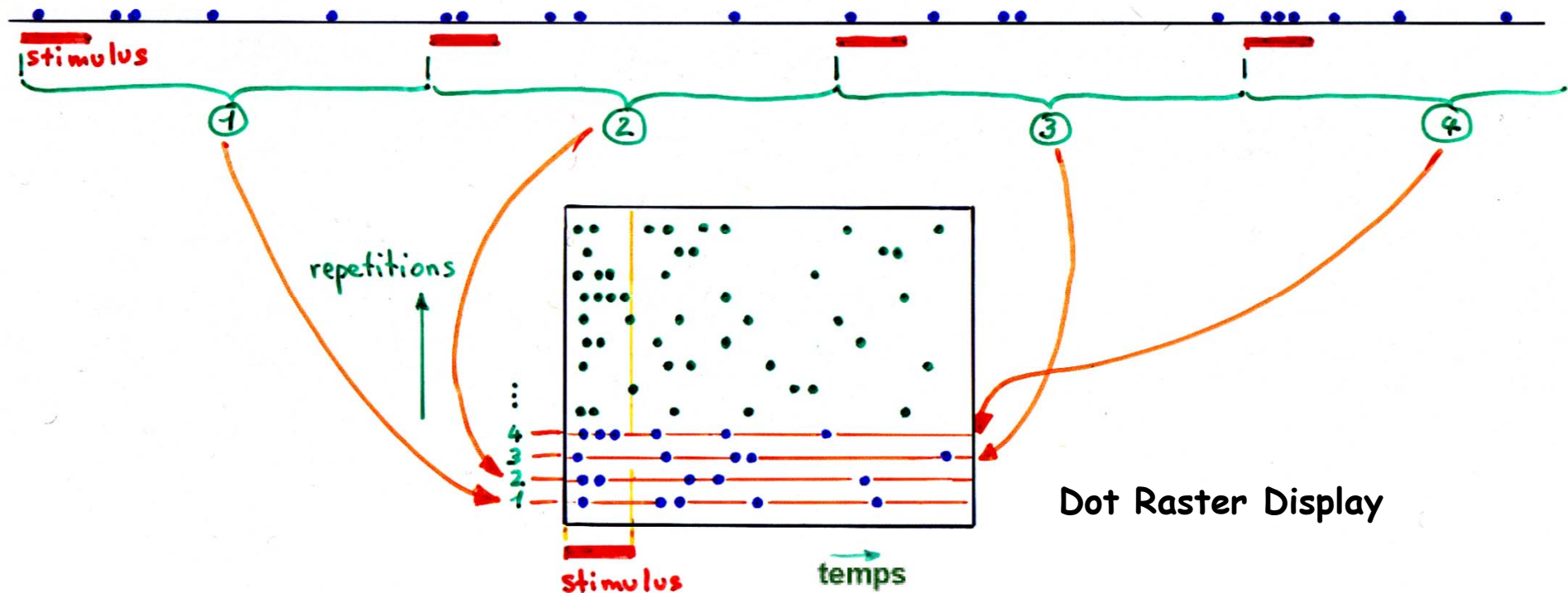
enregistrement électrique

train de P.A.



temps

Répétition du même stimulus dans les mêmes conditions expérimentales



5. Récepteurs sensoriels

5.3. Codage neuronal

5.3.2. Types de réponse

5.3.2.2. Description quantitative

B. REPONSE MOYENNE

Construction d'un histogramme

→ Paramètres caractéristiques de la réponse

S : Fréquence "spontanée" de décharges
("bruit de fond") [nb. de PA / seconde]

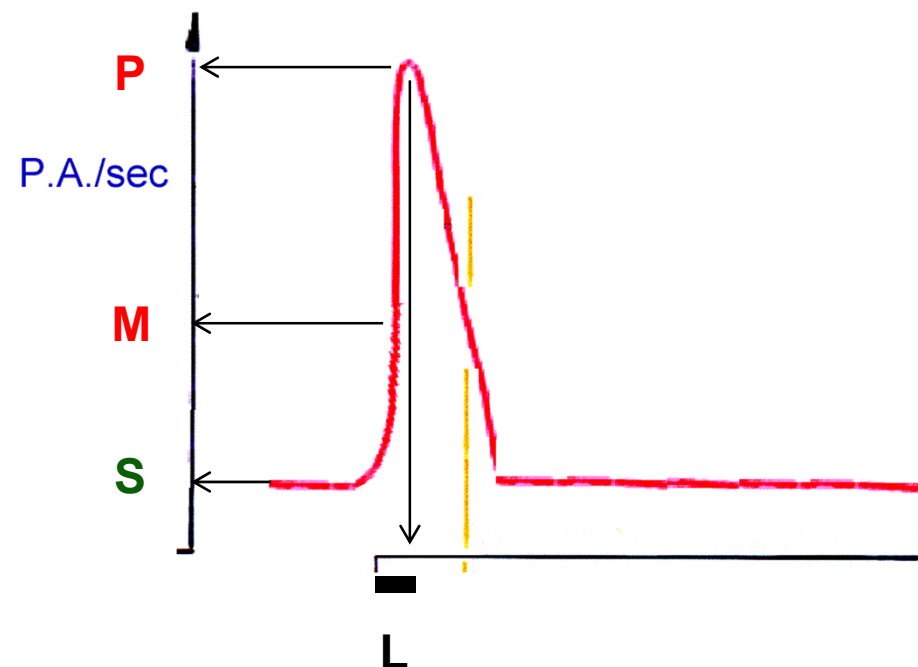
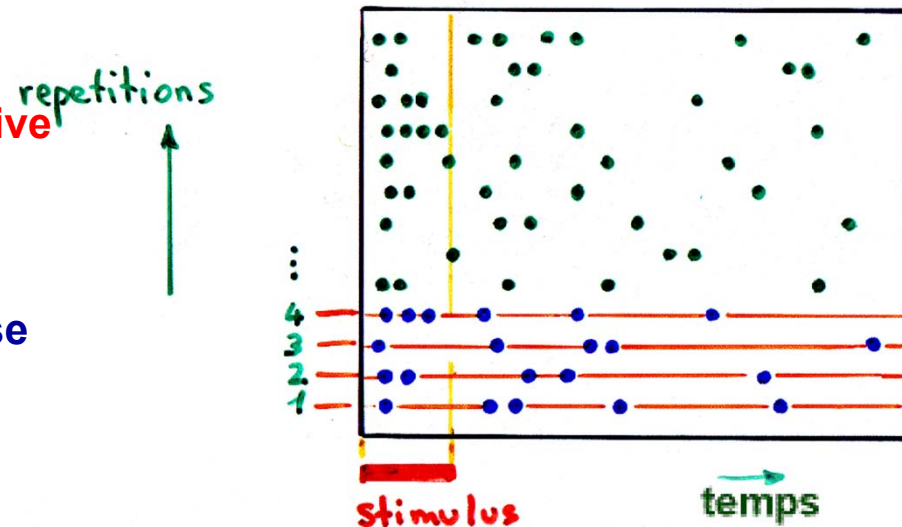
L : Latence = délai entre le début de la stimulation et l'apparition de la réponse [ms]

M : Taux moyen de décharges pendant le stimulus [nb. de PA / seconde]

P : Fréquence maximale de décharges
[nb. de PA / seconde]

SNR = rapport signal/bruit [sans unités]

$$SNR = (P / S)^{1/2}$$

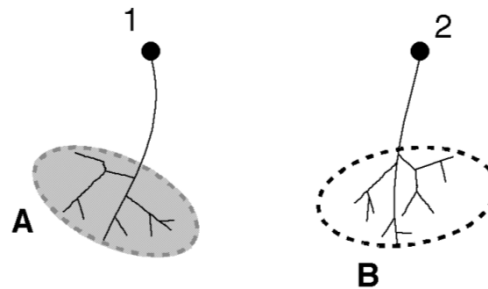


5. Récepteurs sensoriels

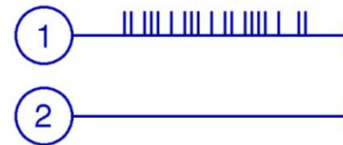
5.3. Codage neuronal

5.3.3. Codage spatial

5.3.3.1. Au niveau périphérique



stimulus A



stimulus B



deux endroits de l'espace sensoriel \Leftrightarrow deux neurones différents
"LIGNES DEDIEES"

← même modalité, les champs récepteurs ne se recouvrent pas

← des modalités différentes

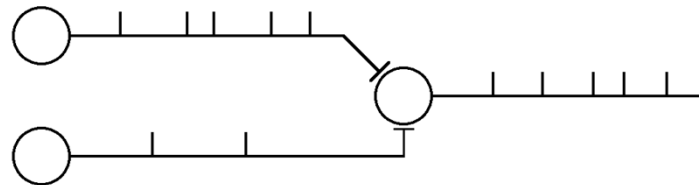
5. Récepteurs sensoriels

5.3. Codage neuronal

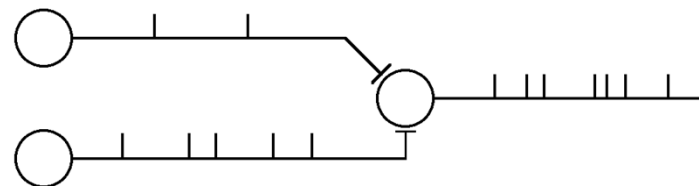
5.3.3. Codage spatial

5.3.3.2. Au niveau central

stimulus A



stimulus B



deux afférences ne somment pas leurs effets \Leftrightarrow la position des synapses a un sens

← synapses distales, synapses proximales, inhibition de barrage

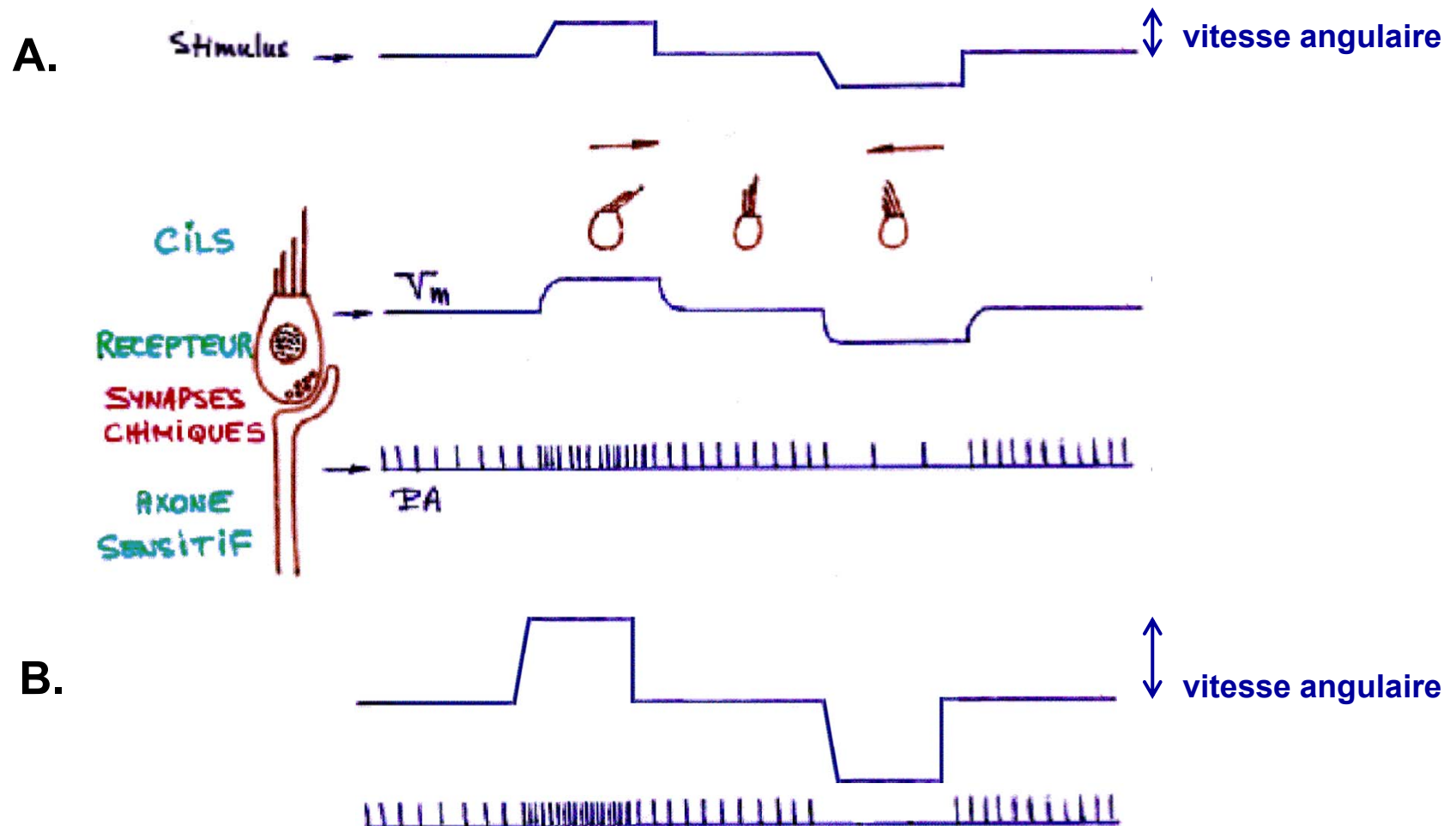
5. Récepteurs sensoriels

5.3. Codage neuronal

5.3.4. Codage fréquentiel

5.3.4.1. Au niveau périphérique

Cellule ciliée (organe latéral du poisson, oreille interne) [Adrian, 1940]



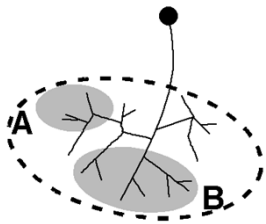
5. Récepteurs sensoriels

5.3. Codage neuronal

5.3.4. Codage fréquentiel

5.3.4.1. Au niveau périphérique

Récepteurs cutanés



stimulus A



stimulus B



même champ récepteur \Leftrightarrow deux intensités différentes \Leftrightarrow fréquences de P.A.
"CODAGE FREQUENTIEL"

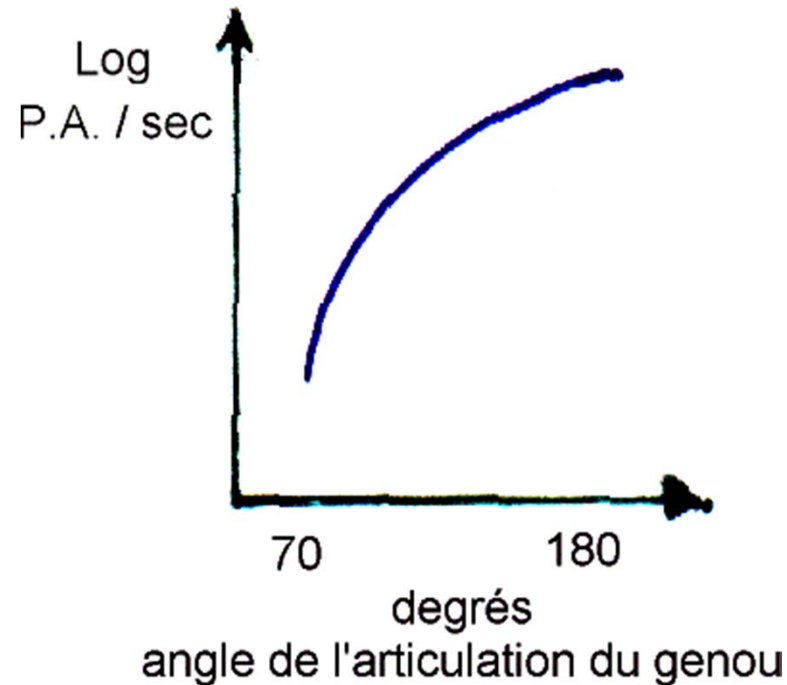
5. Récepteurs sensoriels

5.3. Codage neuronal

5.3.4. Codage fréquentiel

5.3.4.2. Au niveau central

Thalamus ventro-basal [Mountcastle, Poggio, Werner, 1963]



Dans le "CODAGE FREQUENTIEL" la seule chose qui compte est le taux moyen de décharges, exprimé en PA / seconde

5. Récepteurs sensoriels

5.3. Codage neuronal

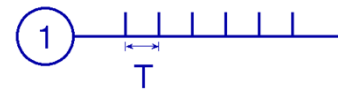
5.3.4. Codage fréquentiel

5.3.5.1. Au niveau périphérique

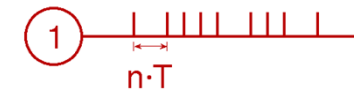
stimuli oscillants, vibratoires



stimulus A



stimulus B



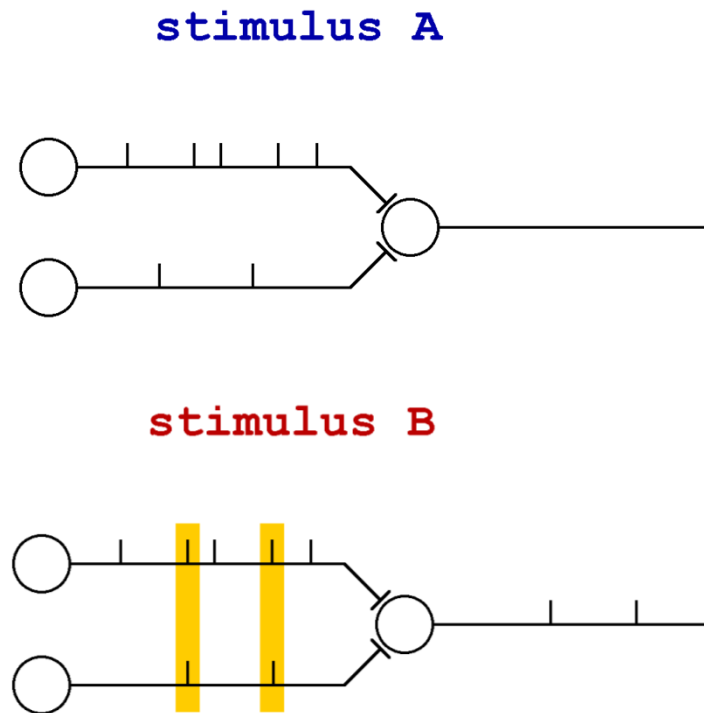
deux fréquences différentes, mais liées entre elles \Leftrightarrow intervalles entre les P.A. (ISI : inter spikes intervals)
"CODAGE HARMONIQUE"

5. Récepteurs sensoriels

5.3. Codage neuronal

5.3.5. Codage temporel

5.3.5.2. Au niveau central



deux afférences ne somment pas leurs effets \Rightarrow **le moment exact d'arrivée des P.A. a un sens**
(exemple: détecteur de coïncidences)

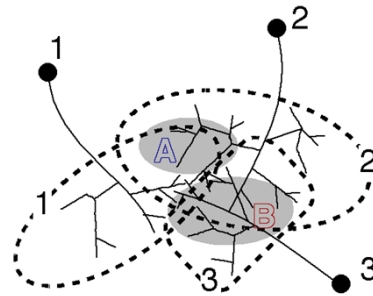
Dans le "CODAGE TEMPOREL" les délais entre les PA sont la seule chose
qui compte, le taux moyen de décharges est secondaire

5. Récepteurs sensoriels

5.3. Codage neuronal

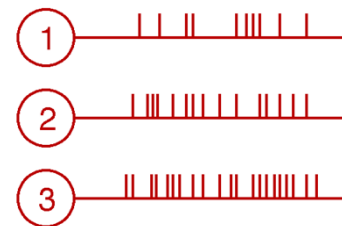
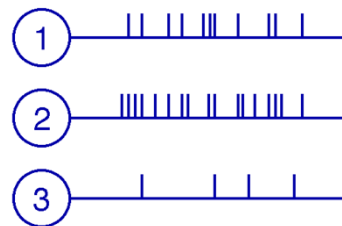
5.3.6. Codage spatio-temporel

5.3.6.1. Au niveau périphérique



stimulus A

stimulus B



deux endroits de l'espace sensoriel \Rightarrow PLUSIEURS neurones activés \Leftrightarrow profils de décharges P.A.

\leftarrow tact: "texture" d'une surface (rugosité)

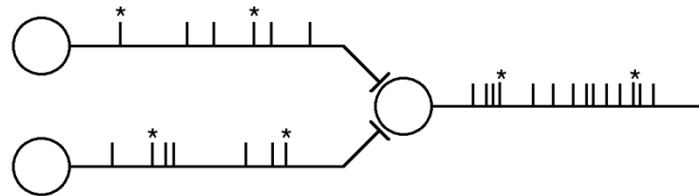
5. Récepteurs sensoriels

5.3. Codage neuronal

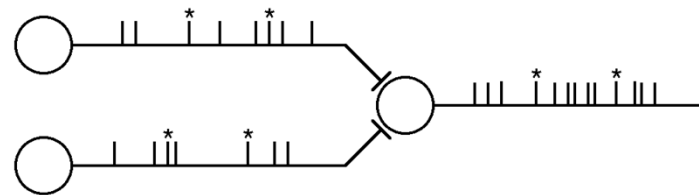
5.3.6. Codage spatio-temporel

5.3.6.2. Au niveau central

stimulus A



stimulus B



les afférences contiennent déjà une information temporelle

⇒ le moment exact d'arrivée des P.A. a un sens MAIS AUSSI l'identité des afférences

les séquences de P.A. ⇔ l'information et réseau neuronal d'appartenance

"CODAGE PAR PATTERN"

Mentions légales

L'ensemble de cette œuvre relève des législations française et internationale sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle, littéraire et artistique ou toute autre loi applicable.

Tous les droits de reproduction, adaptation, transformation, transcription ou traduction de tout ou partie sont réservés pour les textes ainsi que pour l'ensemble des documents iconographiques, photographiques, vidéos et sonores.

Cette œuvre est interdite à la vente ou à la location. Sa diffusion, duplication, mise à disposition du public (sous quelque forme ou support que ce soit), mise en réseau, partielles ou totales, sont strictement réservées à l'université Joseph Fourier (UJF) Grenoble 1 et ses affiliés.

L'utilisation de ce document est strictement réservée à l'usage privé des étudiants inscrits à l'Université Joseph Fourier (UJF) Grenoble 1, et non destinée à une utilisation collective, gratuite ou payante.