

*UE3-1 : Biophysique*

## Chapitre 2 : **Potentiel de membrane**

Pr. François ESTEVE, Pr. Alessandro VILLA

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.1. Perméabilité membranaire

2.1.1. Eau

2.1.2. Solutés

2.1.3. Effet de la dissociation

### 2.2. Equation de Goldman

2.2.1. Electroneutralité

2.2.2. Equation fondamentale

### 2.3. Théorie de Hodgkin, Huxley, Katz

2.3.1. Flux ioniques

2.3.2. Modèle électrique de la membrane

2.3.3. Variations du potentiel de membrane

### 2.4. Transduction

2.4.1. Mécanisme général

2.4.2. Transduction sensorielle

2.4.3. Transduction synaptique

2.4.4. Sommation

### 2.5. Potentiel d'action

2.5.1. Courants ioniques

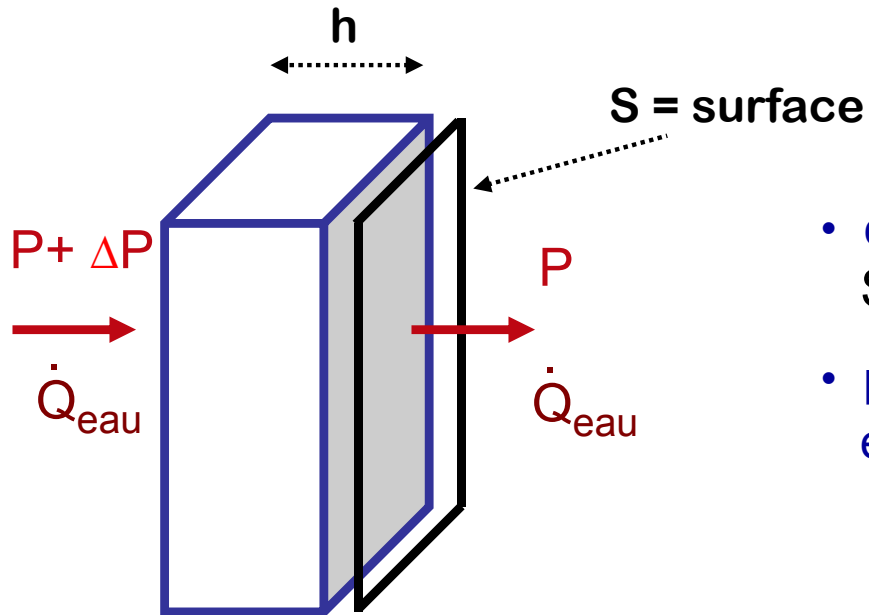
2.5.2. Cycle de l'excitabilité membranaire

2.5.3. Propagation du PA

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.1. Perméabilité membranaire

#### 2.1.1. Eau



- considérons un élément de membrane de surface  $S$  et de largeur  $h$
- pour avoir un débit d'eau constant  $\dot{Q}_{\text{eau}}$  il faut exercer une pression supplémentaire  $\Delta P$

Loi de DARCY (1856)

$$\frac{\dot{Q}_{\text{eau}}}{S} = -L \frac{\Delta P}{h} \quad (1)$$

$\dot{Q}$  = débit [ $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ]

$\Delta P$  = pression [Pascal]

$L$  = conductivité hydraulique [ $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pascal}^{-1}$ ]

$$L \propto \frac{1}{\zeta}$$

$\zeta$  : viscosité dynamique du fluide, défini comme le coefficient de proportionnalité de la force s'appliquant entre deux couches de vitesses différentes d'un fluide.

⇒ la conductivité hydraulique  $L$  prend en compte dans une certaine mesure les interactions physiques entre le fluide et la membrane

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.1. Perméabilité membranaire

#### 2.1.1. Eau

**Rappel :**  $J = - n / dt \square 1/\text{surface}$  (Eq. 3.18)

densité =  $n / \text{volume}$

$J = \text{flux} [\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}]$   
 $d = \text{densité} [\text{mol.m}^{-3}]$

$$\frac{\dot{Q}_{\text{eau}}}{S} = \frac{\overbrace{S h}^{\text{volume}}}{dt} \frac{1}{S} \frac{n}{n} \Rightarrow \cancel{J} \left[ \frac{n}{dt} \frac{1}{S} \right] \left[ \frac{S h}{n} \right] = \cancel{L} \frac{\Delta P}{h} \frac{1}{d_{\text{eau}}}$$

$$\Rightarrow J_{\text{eau}} = L d_{\text{eau}} \frac{\Delta P}{h} \quad (2)$$

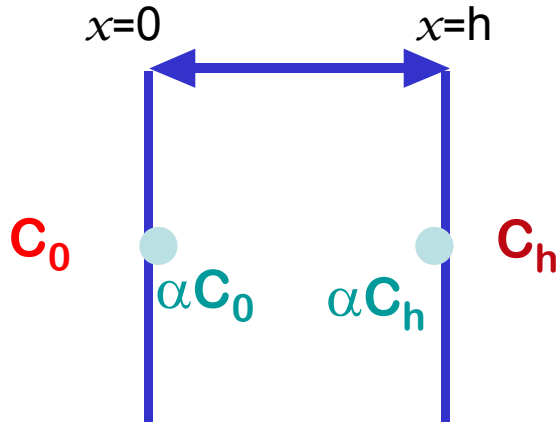
T cte  $\rightarrow d_{\text{eau}} = \text{Cte.}$   $\Rightarrow \frac{J_{\text{eau}}}{d_{\text{eau}}} = L \frac{\Delta P}{h} = P_{\text{eau}} [\text{m.s}^{-1}] \quad (3)$

Perméabilité membranaire de l'eau  $P_{\text{eau}}$  est proportionnelle à la conductivité hydraulique et inversement proportionnelle à l'épaisseur de la membrane

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.1. Perméabilité membranaire

#### 2.1.2. Solutés



- $C_0 > C_h$  : gradient de concentration  $\Delta C = C_0 - C_h$

- $\alpha$  = solubilité membranaire du soluté

- équilibre (2ème loi de Fick)  $\Rightarrow \frac{dC}{dt} = 0$

$$\Rightarrow \frac{d^2C}{dx^2} = 0$$

$\Rightarrow$  solution générale:  $C = a'x + a''$

1ère loi de Fick:  $J = -D \cdot \frac{dC}{dx} = -D a'$

$\Rightarrow$  gradient  $-dC / dx$  est constant; il est égal à  $\alpha \cdot \Delta C / h$   $\Rightarrow J = -D \cdot \frac{dC}{dx} = D \cdot \frac{\alpha \cdot \Delta C}{h}$

Perméabilité membranaire  $P$  définie par

$$P \equiv \frac{J}{\Delta C}$$

[m.s<sup>-1</sup>]

(4)

Relation importante entre perméabilité membranaire ( $P$ )  
et coefficient de diffusion ( $D$ )

$$P = D \alpha / h$$

(5)

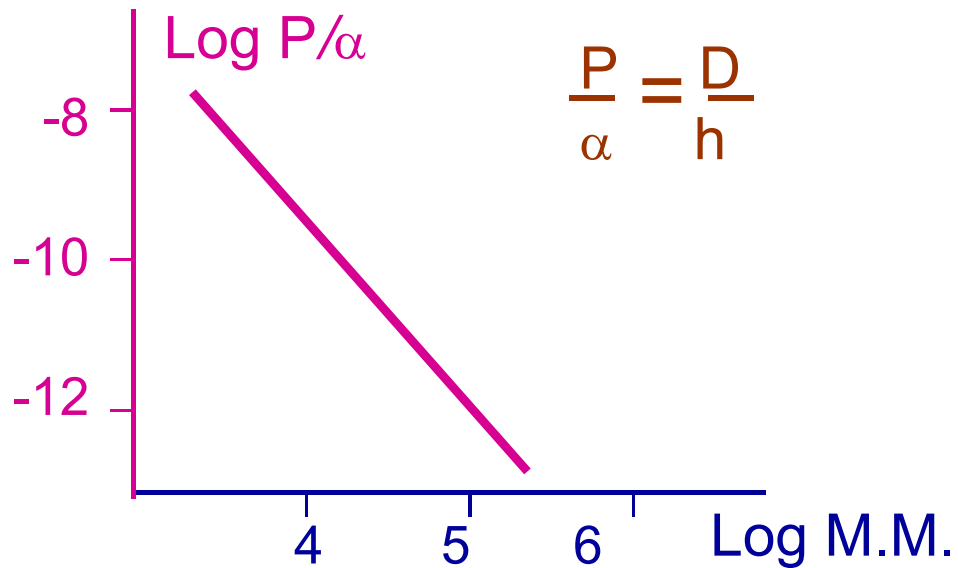
## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.1. Perméabilité membranaire

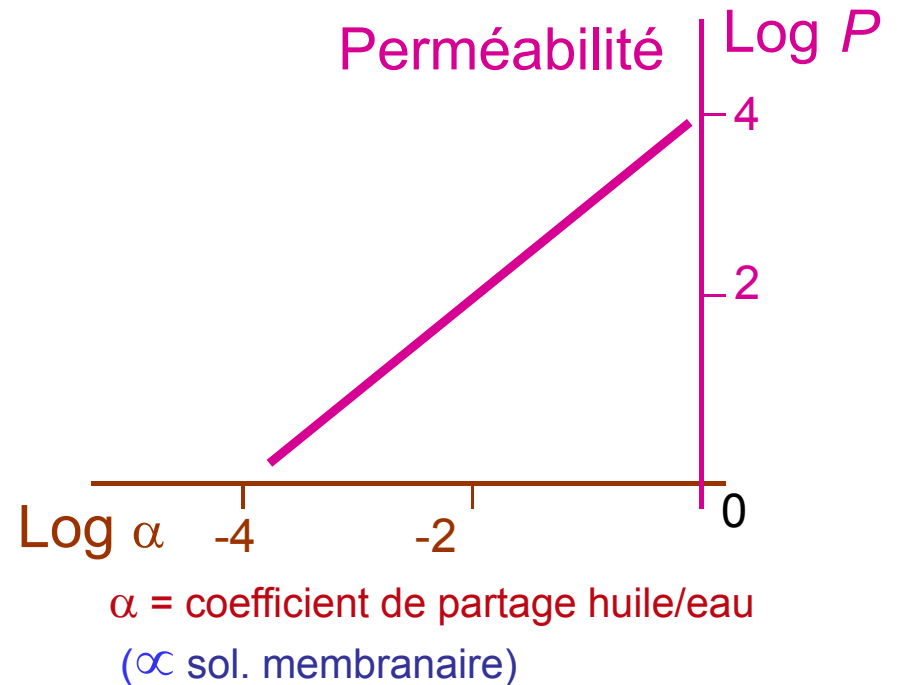
#### 2.1.2. Solutés

La notion de perméabilité  $P$  est liée à la **diffusion**  $\Rightarrow$  phénomène **passif** !

phénomène **passif**  $\Rightarrow$  membrane poreuse inerte  $\Rightarrow$  La membrane cellulaire agit de manière "dyalisante"



Masse Moléculaire du soluté  $\uparrow$   
 $\Rightarrow$  perméabilité  $\downarrow$



liposolubilité  $\uparrow$   
 $\Rightarrow$  perméabilité  $\uparrow$

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.1. Perméabilité membranaire

#### 2.1.2. Solutés

L'interval  $t_{M1/2}$  correspond au temps nécessaire pour que  $C_{int} = 0.5 \times C_{ext}$

Exemples de perméabilité membranaire (le plus souvent mesuré à travers un liposome):

	$t_{M1/2}$	$P$ [m.s <sup>-1</sup> ]
H <sub>2</sub> O	300 ms	10 <sup>-5</sup>
Cl <sup>-</sup>	3 jours	
Na <sup>+</sup> , K <sup>+</sup>	1 an	
urée		3·10 <sup>-9</sup>
Glucose	30 min	10 <sup>-9</sup>

Les **solutés polaires**, même non chargés, comme le **glucose** ou les **protéines**, ne traversent pas passivement la membrane cellulaire.

⇒ il y a des transporteurs membranaires (transport facilité, cotransport, etc.)

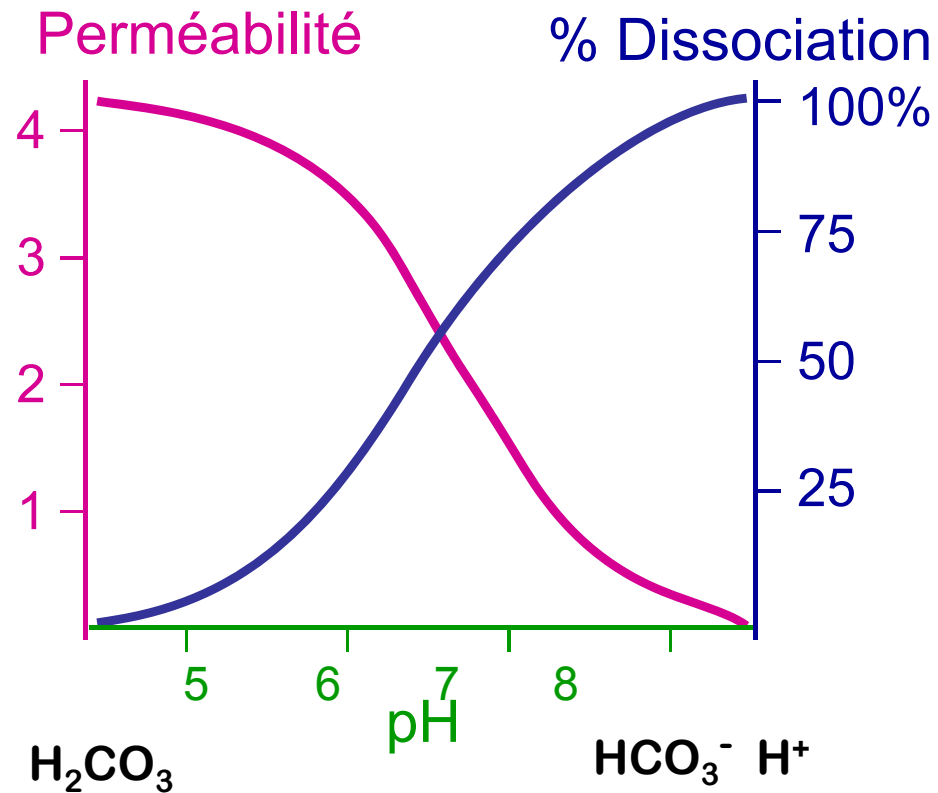
La perméabilité à l'eau ← f() physiologique: hormone antidiurétique (ADH) ⇒ perméabilité ↑

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.1. Perméabilité membranaire

#### 2.1.3. Effet de la dissociation

Exemple de soluté ionisable:  $\text{H}_2\text{CO}_3$



ionisation ( $\propto$  dissociation)  $\uparrow$   
 $\Rightarrow$  perméabilité  $\downarrow$

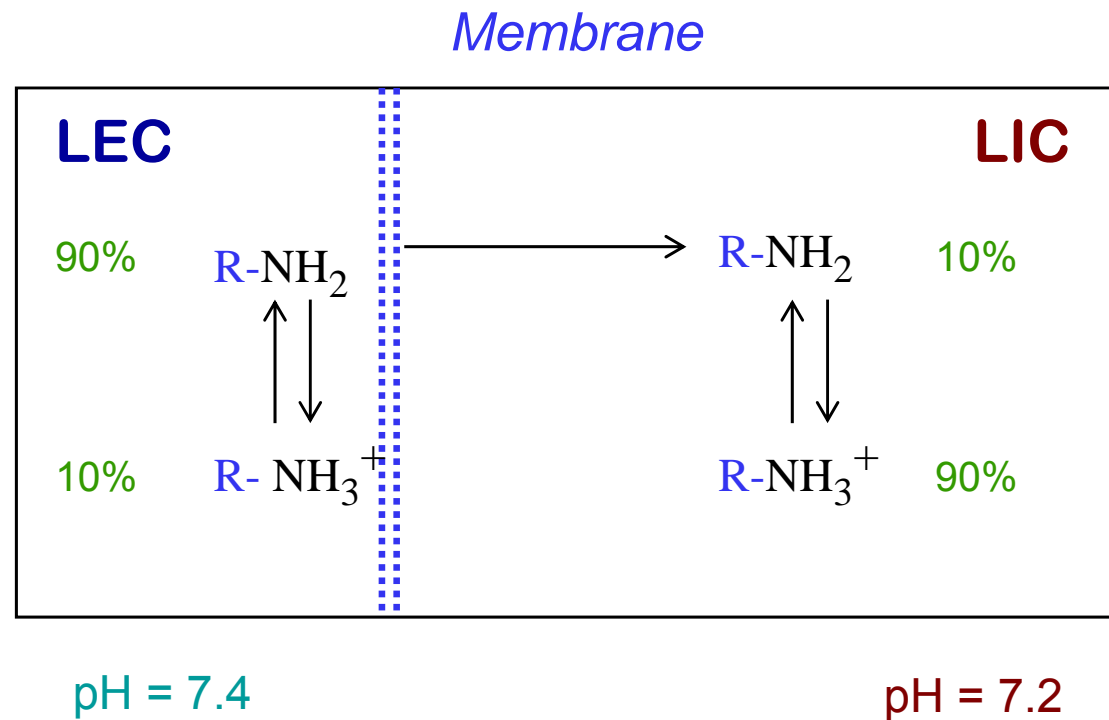


## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.1. Perméabilité membranaire

#### 2.1.3. Effet de la dissociation

Exemple: médicament  $\text{R-NH}_2$



médicament basique  $\text{R-NH}_2$  dont le  $\text{pK}_b = 7.3$

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

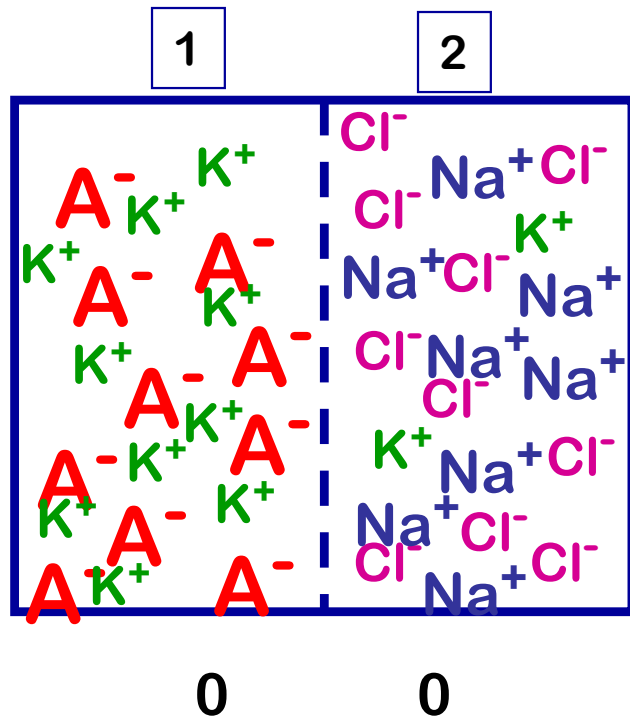
### 2.2. Equation de GOLDMANN

#### 2.2.1. Electroneutralité

##### 2.2.1.1. Principe général

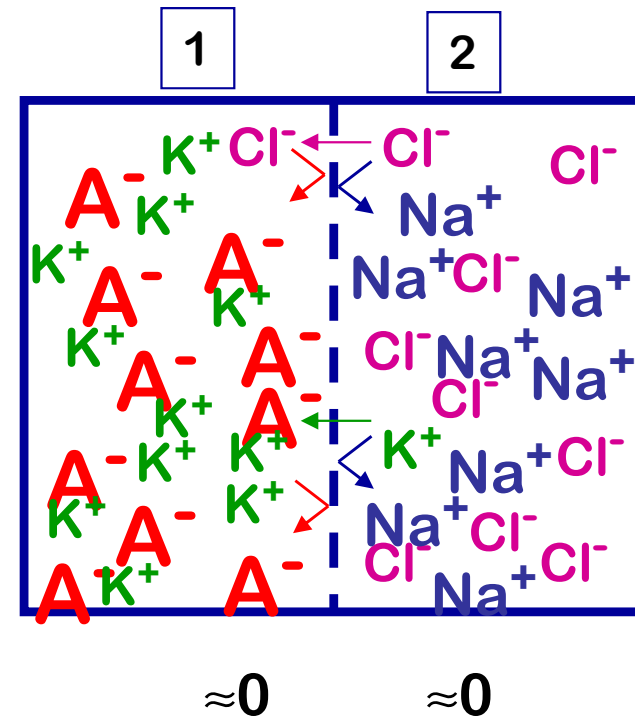
Les conditions:

- une solution ionique avec des ions diffusibles,  
**MAJORITE DES CHARGES NON DIFFUSIBLES**
- une membrane partiellement perméable



Etat initial

- neutralité électrique:  $\begin{cases} nb^+{}_1 = nb^-{}_1 \\ nb^+{}_2 = nb^-{}_2 \end{cases}$



Etat final

- neutralité électrique:  $\begin{cases} nb^+{}_1 \approx nb^-{}_1 \\ nb^+{}_2 \approx nb^-{}_2 \end{cases}$



## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.2. Equation de GOLDMANN

#### 2.2.1. Electroneutralité

##### 2.2.1.2. Observation expérimentale

Potentiel transmembranaire  $V_{in} - V_{ext} = E_m$

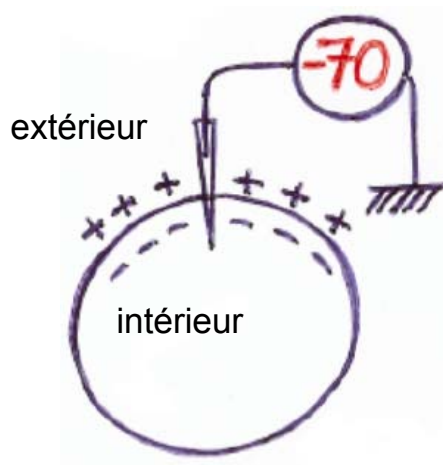
i : INTERIEUR négatif (protéines, groupements  $\text{COO}^-$ )

e : EXTERIEUR positif (ions positifs, sodium  $\text{Na}^+$ )

⇒ **POLARISATION**

Différence de potentiel exprimée en millivolts [mV]

Potentiel de repos transmembranaire (=pot. de membrane) est souvent  $\approx -70$  mV



#### CELLULES EXCITABLES

##### • musculaires

grenouille	-82 à -100 [mV]
rat	-100

##### • nerveuses

cerveau de chien	-90
calmar	-77
ecrevisse	-90
grenouille	-71

#### CELLULES NON EXCITABLES

hématies	-10
----------	-----

**Le potentiel de membrane est une caractéristique universelle des CELLULES VIVANTES et ne disparaît qu'avec la MORT.**

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.2. Equation de GOLDMANN

#### 2.2.1. Electroneutralité

##### 2.2.1.2. Observation expérimentale

Conditions d'une cellule en équilibre  $\Rightarrow$  électrostatique

- LIC et LEC sont des solutions ioniques avec des ions diffusibles
- une membrane partiellement perméable

### A. Combien de charges sont mises en jeu par le potentiel transmembranaire ?

Electrostatique:

$$Q = C \cdot V$$

$$\Rightarrow Q = C_s \cdot S \cdot E_m$$

Q = charge électrique [C]

C = capacité membranaire [F]

V = ddp [V]

S = surface qui laisse passer les charges [m<sup>2</sup>]

C<sub>s</sub> = capacité spécifique membranaire [F/m<sup>2</sup>]

$$E_m \approx 70\text{mV} = 7 \cdot 10^{-2}\text{V}$$

$$C_s \approx 2 \mu\text{F/cm}^2 = 2 \cdot 10^{-6} \text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{V}^{-1} / 10^{-4} \text{m}^2$$

$$S \approx r^2 \text{ avec } r = 0.1 \mu\text{m} = 10^{-7} \text{m}$$

$\Rightarrow$

$$Q \approx 7 \cdot 10^{-2} \times 2 \cdot 10^{-2} \times 10^{-14} [\text{V}] \cdot [\text{A} \cdot \text{s} \cdot \text{V}^{-1}] [\text{m}^2] [\text{m}^2]$$

$$Q \approx 1.4 \cdot 10^{-18} [\text{A} \cdot \text{s}] \Rightarrow Q_{Em} \propto 10^{-18} \text{C}$$

### B. Combien de charges (+) et charges (-) au total trouve-t-on dans une cellule ?

$$\Rightarrow Q_{TOT} \propto 10^{-11} \text{C}$$

$$\Rightarrow Q_{Em} / Q_{TOT} = 10^{-7} \approx \text{négligeable}$$

$\Rightarrow$

LIC et LEC sont "électroneutres"

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.2. Equation de GOLDMANN

#### 2.2.1. Electroneutralité

##### 2.2.1.3. Diffusion ionique

électroneutralité nb(+) = nb(-)	
1	2
$[Cl^-] = 0$ $[K^+] = 0.15M$ $[A^-] = 0.15M$	$[Cl^-] = 0.15M$ $[K^+] = 0.15M$
$\Rightarrow$	
$[Cl^-] = x$ $[K^+] = 0.15 + x$ $[A^-] = 0.15$	$[Cl^-] = 0.15 - x$ $[K^+] = 0.15 - x$
<u>Etat initial</u>	<u>Etat final</u>

Equilibre de DONNAN: tous les ions diffusibles sont à l'équilibre !!

$$\Delta E_K = \Delta E_{Cl} \Rightarrow [K]_1 [Cl]_1 = [K]_2 [Cl]_2$$

$$\Rightarrow (0.15 + x) (x) = (0.15 - x) (0.15 - x)$$

$$\Rightarrow x = 0.05 M \quad (\text{Loi de NERNST}) \Rightarrow \text{à } 37^\circ C \quad \Delta E = -18.5 [mV]$$

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.2. Equation de GOLDMANN

#### 2.2.1. Electroneutralité

##### 2.2.1.3. Diffusion ionique

Etat final

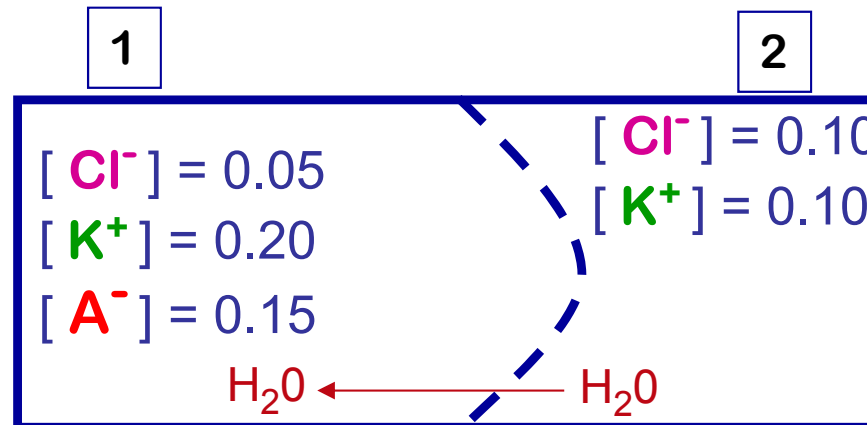
1	électroneutralité nb(+) = nb(-)	2
$[Cl^-] = 0.05$ $[K^+] = 0.20$ $[A^-] = 0.15$		$[Cl^-] = 0.10$ $[K^+] = 0.10$

Volumes des deux compartiments identiques:

⇒ osmolalité:                      400 mOsm                      200 mOsm

Il faut considérer le flux d' $H_2O$  ⇒ **PRESSION OSMOTIQUE** importante !!!

VRAI état final  
si la membrane n'est pas rigide



*Rappel:* pour les problèmes de pression osmotique !!

- masse atomique: Na=23 , K=39 , Mg=24.3 , Ca=40
- le volume du ion hydraté ↓ si sa masse atomique ↑

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.2. Equation de GOLDMANN

#### 2.2.2. Equation fondamentale

##### 2.2.2.1. Cas simple avec deux ions

- $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  caractérisés par leur perméabilités membranaires respectives  $P_{\text{Na}}$  et  $P_{\text{K}}$
- $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  caractérisés par  $z = 1$

- Perméabilité constante dans toute l'épaisseur de la membrane  $h$  :

$$P = D \alpha / h$$

#### Equation de **GOLDMANN**

$$V_{\text{in}} - V_{\text{ext}} = E_m = \frac{-RT}{F} \text{Log} \frac{P_{\text{K}}[\text{K}]_{\text{in}} + P_{\text{Na}}[\text{Na}]_{\text{in}}}{P_{\text{K}}[\text{K}]_{\text{ext}} + P_{\text{Na}}[\text{Na}]_{\text{ext}}}$$

$P$  = perméabilité membranaire

$D$  = coeff. de diffusion

$h$  = épaisseur de la membrane

$\alpha$  = solubilité membranaire

$z$  = électrovalence de l'ion

$$\begin{array}{ll} P_{\text{K}} = 0 & \rightarrow E_m = E_{\text{Na}} \\ P_{\text{Na}} = 0 & \rightarrow E_m = E_{\text{K}} \\ P_{\text{K}}, P_{\text{Na}} \neq 0 & \rightarrow E_m \text{ intermédiaire} \end{array}$$

Perméabilité constante dans toute l'épaisseur de la membrane:

La membrane cellulaire agit de manière "dialysante"  $\Rightarrow$  membrane poreuse inerte.

les ions passent **PASSIVEMENT** par des pores ayant  $\sim 0.4\text{nm}$  de  $\emptyset$

séparés par plusieurs dizaines de nm

$\Rightarrow$  surface des pores env.  **$10^{-6}$  de la surface cellulaire**

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.2. Equation de GOLDMANN

#### 2.2.2. Equation fondamentale

##### 2.2.2.2. Cas général

Equation de **GOLDMANN** pour les ions  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $Cl^-$

$$E_{in} - E_{ext} = E_m = \frac{RT}{F} \text{Log} \frac{P_K[K^+]_{ext} + P_{Na}[Na^+]_{ext} + P_{Cl}[Cl^-]_{in}}{P_K[K^+]_{in} + P_{Na}[Na^+]_{in} + P_{Cl}[Cl^-]_{ext}}$$

$T$  = température absolue [ $^{\circ}K$ ]

$37^{\circ}C = 310^{\circ}K$

$R$  = Cte. des gaz parfaits =  $8.314 [J \cdot ^{\circ}K^{-1} \cdot mol^{-1}]$

$[J] = [V \cdot A \cdot s]$

$N_A$  = nombre d'AVOGADRO =  $6 \cdot 10^{23} [mol^{-1}]$

$q$  = charge de l'électron =  $1.6 \cdot 10^{-19} [C]$

$[C] = [A \cdot s]$

$F$  = Cte. de FARADAY =  $N_A q = 9.652 \cdot 10^4 [A \cdot s \cdot mol^{-1}]$

$P_{ion}$  = perméabilités **relatives** des ions

$P_{Na} = 1 \quad P_K = 40 \quad P_{Cl} = 670$

**!! Attention !! Le signe (-) n'est plus dans l'équation, pourquoi?**

**Le compartiment avec l'anion non diffusible (c.à.d. les groupements  $COO^-$ ) est le compartiment intracellulaire et par convention les concentrations extracellulaires des cations sont au numérateur.**



## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.2. Equation de GOLDMANN

#### 2.2.2. Equation fondamentale

##### 2.2.2.3. Exemple: motoneurone spinal de mammifère

Concentrations:    [ ] mEq    [ ] mmole				
IONS	INTRA		EXTRA	
Na+	15	"	<u>150</u>	"
K+	<u>150</u>	"	<u>5.5</u>	"
Cl -	9	"	<u>125</u>	"
Ca++	2	1	5	2.5
Mg++	26	13	2	1
Anions Prot -	<u>155</u>	"	7	"
H <sup>+</sup>	0.0000631	"	0.0000398	"

- **Potentiel de DONNAN:** tous les ions diffusibles sont à l'équilibre !!

chercher un ion très perméable qui, à l'équilibre, interagit peu avec les autres électrolytes

$$\text{H}^+ \Rightarrow \text{potentiel d'équilibre (NERNST)} \Rightarrow E_H = -\frac{RT}{zF} \text{Log} \frac{[\text{H}]_{\text{intra}}}{[\text{H}]_{\text{extra}}}$$

$$[\text{H}] = 10^{-\text{pH}}$$

typiquement:  $\text{pH}_{\text{intra}}=7.2$   $\text{pH}_{\text{extra}}=7.4$   $\Rightarrow$   $E_H = -12.3 \text{ [mV] à } 37^\circ\text{C}$

- pH change f(température) et dépend du métabolisme
- selon le type cellulaire: cotransport et "pompes à H"

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.2. Equation de GOLDMANN

#### 2.2.2. Equation fondamentale

##### 2.2.2.3. Exemple: motoneurone spinal de mammifère

#### • Potentiel transmembranaire **GOLDMANN**:

$$E_m = \frac{RT}{F} \text{Log} \frac{P_K[K^+]_{\text{ext}} + P_{Na}[Na^+]_{\text{ext}} + P_{Cl}[Cl^-]_{\text{in}}}{P_K[K^+]_{\text{in}} + P_{Na}[Na^+]_{\text{in}} + P_{Cl}[Cl^-]_{\text{ext}}}$$

T = température absolue [°K]

37°C = 310°K

R = Cte. des gaz parfaits = 8.314 [J.°K<sup>-1</sup>.mol<sup>-1</sup>]

[J] = [V·A·s]

F = Cte. de FARADAY = N<sub>A</sub> q = 9.652 · 10<sup>4</sup> [A·s.mol<sup>-1</sup>]

P<sub>Na</sub> = 1    P<sub>K</sub> = 40    P<sub>Cl</sub> = 670

$$E_m = (8.314 \times 310) / 9.652 \cdot 10^4 \times \text{Log} \left( 40(5.5) + 1(150) + 670(9) \right) / \left( 40(150) + 1(15) + 670(125) \right)$$

$$E_m = 0.0267 \times \text{Log} (220 + 150 + 6030) / (6000 + 15 + 83750)$$

$$E_m = 0.0267 \times \text{Log} (6400 / 89765)$$

⇒

$$E_m = -0.0705 \text{ [V]} = -70.5 \text{ [mV]} \text{ à } 37^\circ\text{C}$$

#### **Potentiel de membrane (GOLDMANN) ≠ Potentiel d'équilibre (DONNAN)**

- il existe des transports actifs ("pompes à ions") et des transports facilités !!!
- le potentiel de Donnan participe au Pot. de Membrane pour environ 12mV

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.3. Théorie de HODGKIN, HUXLEY, KATZ (1952)

#### 2.3.1. Flux ioniques

##### 2.3.1.1. Notion de "driving force" (force motrice)

$$E_{\text{int}} - E_{\text{ext}} = E_m \quad [\text{mv}]$$

$$\text{"driving force"} = E_m - E_{\text{ion}}$$

	[ ] mEq		Gradient Chimique (Fick)	$E_{\text{ion}}$ (Nernst)	$E_m$	$E_m - E_{\text{ion}}$
	intra	extra				
$\text{K}^+$	150	5.5	+144.5	- 88.3	- 70.5	+17.8
$\text{Na}^+$	15	150	-135	+72.3		- 142.8
$\text{Cl}^-$	9	125	-116	- 70.2		- 0.3

1ère Loi de Fick  
 $J = -D \left( \frac{dC}{dx} \right)$

Loi de Nernst  
 $E_{\text{int}} - E_{\text{ext}} = - \left( \frac{RT}{zF} \right) \text{Log}(C_{\text{int}}/C_{\text{ext}})$

ION	GRADIENT CHIMIQUE	GRADIENT ELECTRIQUE
$\text{K}^+$	→ EXT	INT ←
$\text{Na}^+$	INT ←	INT ←
$\text{Cl}^-$	INT ←	→ EXT

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.3. Théorie de HODGKIN, HUXLEY, KATZ (1952)

#### 2.3.1. Flux ioniques

##### 2.3.1.2. Pompe ionique Na-K

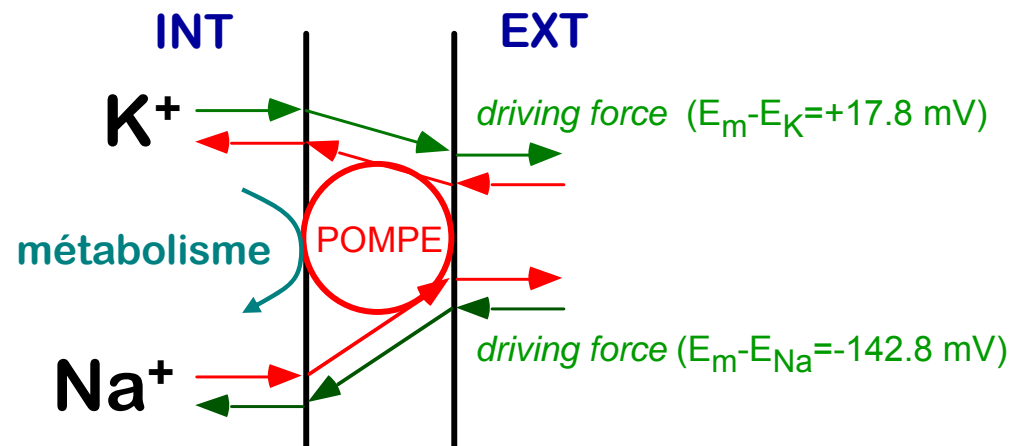
$K^+$ ,  $Cl^-$  : haute perméabilité des canaux  $\Rightarrow$  atteindre  $\approx$  équilibre electro-chimique

$Na^+$  : tendance à rentrer dans la cellule  $\Rightarrow$  annuler la ddp transmembranaire

Mais au REPOS la ddp transmembranaire ne varie presque pas, pourquoi ?

- très faible perméabilité au  $Na^+$  mais du Na entre quand même !!
- existence d'une **POMPE IONIQUE Na-K**

rentre  $K^+$  et sort  $Na^+$  : dans un rapport  $3Na^+ / 2K^+$   $\Rightarrow$  **pompe électrogénique**



La présence de la pompe  $\Rightarrow$  résistances variables au Na et K

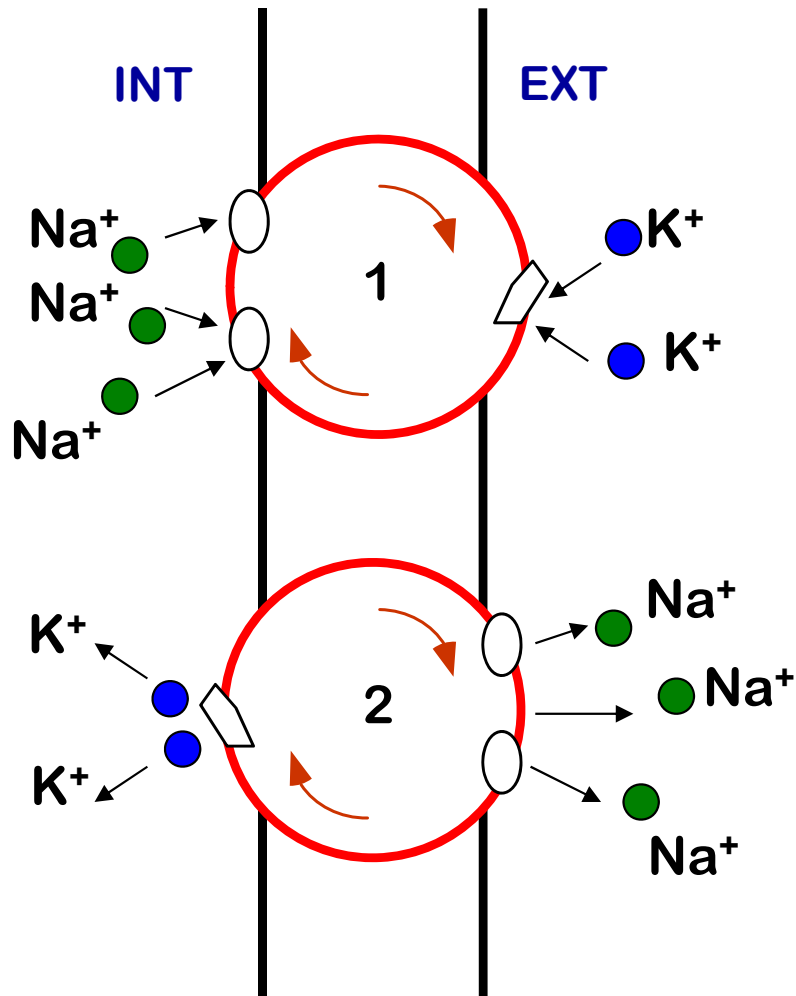
$E_L \Rightarrow$  courant de fuite ("Leakage") qui correspond généralement au flux de  $Cl^-$  et autres molécules  
(!! perméabilité très élevée)

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.3. Théorie de HODGKIN, HUXLEY, KATZ (1952)

#### 2.3.1. Flux ioniques

##### 2.3.1.2. Pompe ionique Na-K



1 PROTEINE PM ~600.000

- 2 sites actifs:

- fixation Na ← phosphorylation (endergonique)
- fixation K ← déphosphorylation (exergonique)

- consomme de l'énergie ← ATP

- environ 70% de ATP utilisé dans le cerveau et 20-30% dans les autres cellules
- bloqué par **CYANURE**

- a une activité enzymatique ATPasique:

- activé par **Na, K**
- inhibé par **CARDIOGLUCOSIDES (OUABINE)**

- cette protéine est ≠ des **CANAUX** à Na ou à K

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.3. Théorie de HODGKIN, HUXLEY, KATZ (1952)

#### 2.3.1. Flux ioniques

##### 2.3.1.3. Importance de $[K^+]$

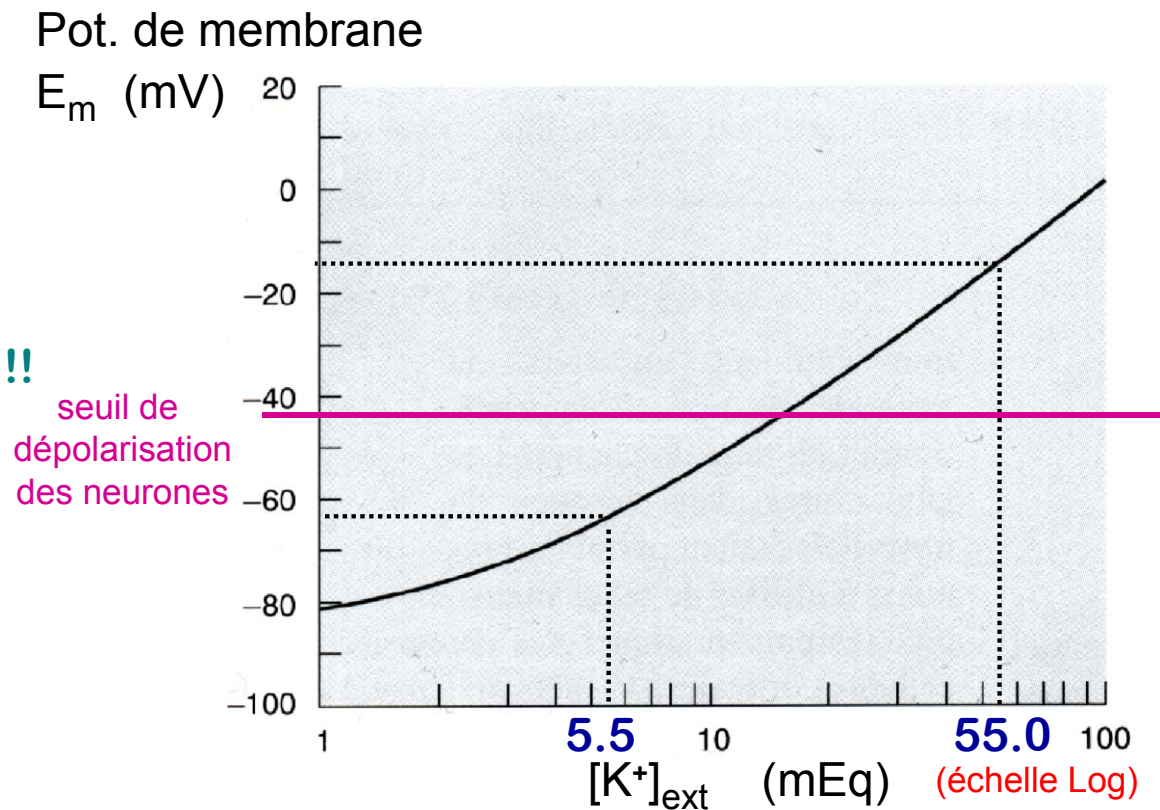
$K^+$ ,  $Cl^-$  : **haute perméabilité des canaux**  $\Rightarrow$  atteindre  $\approx$  équilibre electro-chimique  
 $Na^+$  : **faible perméabilité des canaux**

Mais au REPOS la driving force de  $Cl^-$  est presque nulle, c'est donc le  $K^+$  qui joue un rôle essentiel.

si  $[K^+]_{ext}$  5.5 mEq  $\rightarrow$  55 mEq

"choc potassique"

$\Rightarrow$  **dépolarisation de la cellule !!!**



## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

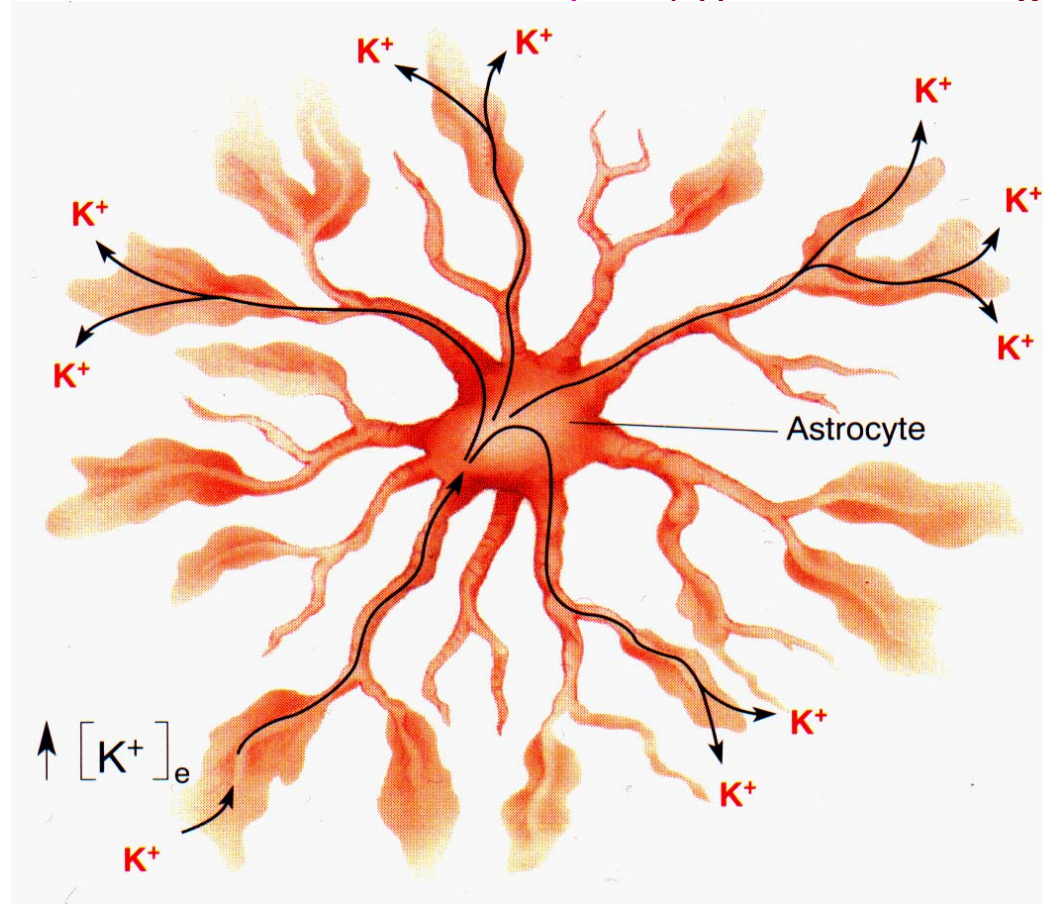
### 2.3. Théorie de HODGKIN, HUXLEY, KATZ (1952)

#### 2.3.1. Flux ioniques

##### 2.3.1.3. Importance de $[K^+]$

### La régulation de $[K^+]_{ext}$ est essentielle

- Empêcher la variabilité  $[K^+]_{ext} \Rightarrow$  **barrière hémato-encéphalique**
- Diminuer  $[K^+]_{ext} \Rightarrow$  l'un des rôles des **astrocytes** (type de cellules gliales)





## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

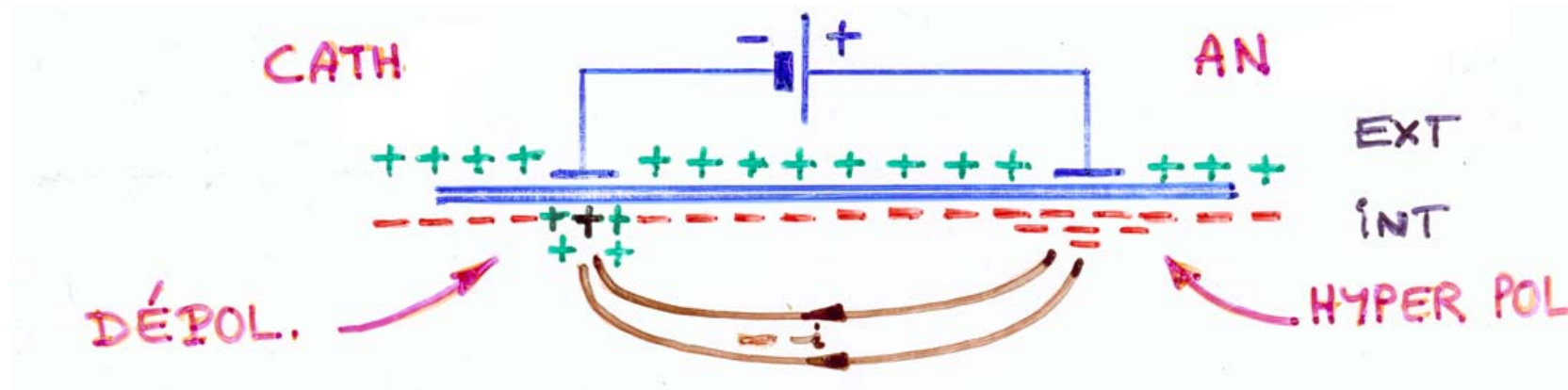
### 2.3. Théorie de HODGKIN, HUXLEY, KATZ (1952)

#### 2.3.2. Modèle électrique de la membrane

##### 2.3.2.1. Electrotonus

La stimulation électrique de la membrane (électrotonus) peut être effectuée par

- CATHODE: électrode négative(-) qui attire les cations (+)  $\Rightarrow$  cathelectrotonus  $\Rightarrow$  dépolarisation
- ANODE: électrode positive(+) qui attire les anions (-)  $\Rightarrow$  anelectrotonus  $\Rightarrow$  hyperpolarisation



Observation:  $|\text{cathelectrotonus}| \neq |\text{anelectrotonus}|$

$\Rightarrow$  La résistance membranaire dépend du sens du courant

$\Rightarrow$  PROPRIETE REDRESSEUSE DE LA MEMBRANE

Pour comprendre ce phénomène il faut un modèle électrique de la membrane



## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.3. Théorie de HODGKIN, HUXLEY, KATZ (1952)

#### 2.3.2. Modèle électrique de la membrane

##### 2.3.2.2. Circuit équivalent

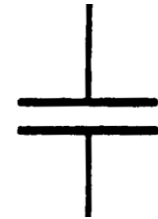
###### • UN ELEMENT DE MEMBRANE

###### DOUBLE COUCHE PHOSPHOLIPIDIQUE

C'est un diélectrique (isolant électrique)

⇒ **CONDENSATEUR**

$C_m$  = capacité membranaire [ $F \cdot m^{-1}$ ]  
[F] = [ $A \cdot s \cdot V^{-1}$ ]



###### PASSAGE DE CHARGES ELECTRIQUES

→ PROTEINES (pores, canaux, transporteurs)

conductance  $\propto$  perméabilité  
résistance = 1 / conductance

⇒ **RESISTANCE VARIABLE**

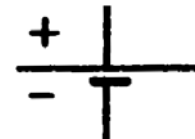
$r_m$  = résistivité membranaire [ $\Omega \cdot m$ ]



→ Potentiel d'équilibre  
pile électrique

⇒ **POTENTIEL DE REPOS**

$V_m$  = potentiel de membrane [V]



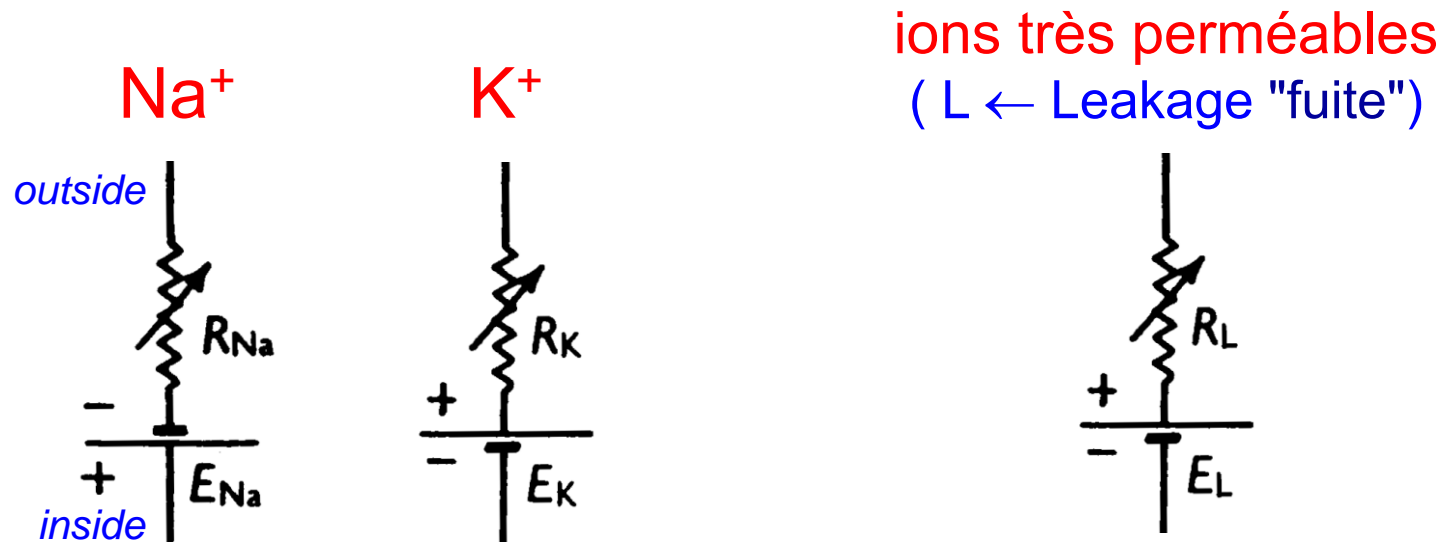
## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.3. Théorie de HODGKIN, HUXLEY, KATZ (1952)

#### 2.3.2. Modèle électrique de la membrane

##### 2.3.2.2. Circuit équivalent

- PRENONS EN COMPTE LES DIVERS COURANTS IONIQUES:



$R_{Na}$  = résistance au  $Na^+$

$E_{Na}$  = potentiel d'équilibre (Nernst) au  $Na^+$  ex: +72.3 mV)

$R_K$  = résistance au  $K^+$

$E_K$  = potentiel d'équilibre au  $K^+$  ex: -88.3 mV

$R_L$  = résistance de "fuite" (leaky current)

$E_L$  = potentiel de "fuite" (souvent assimilé au pot. équilibre du  $Cl^-$  ex: -70.5 mV )

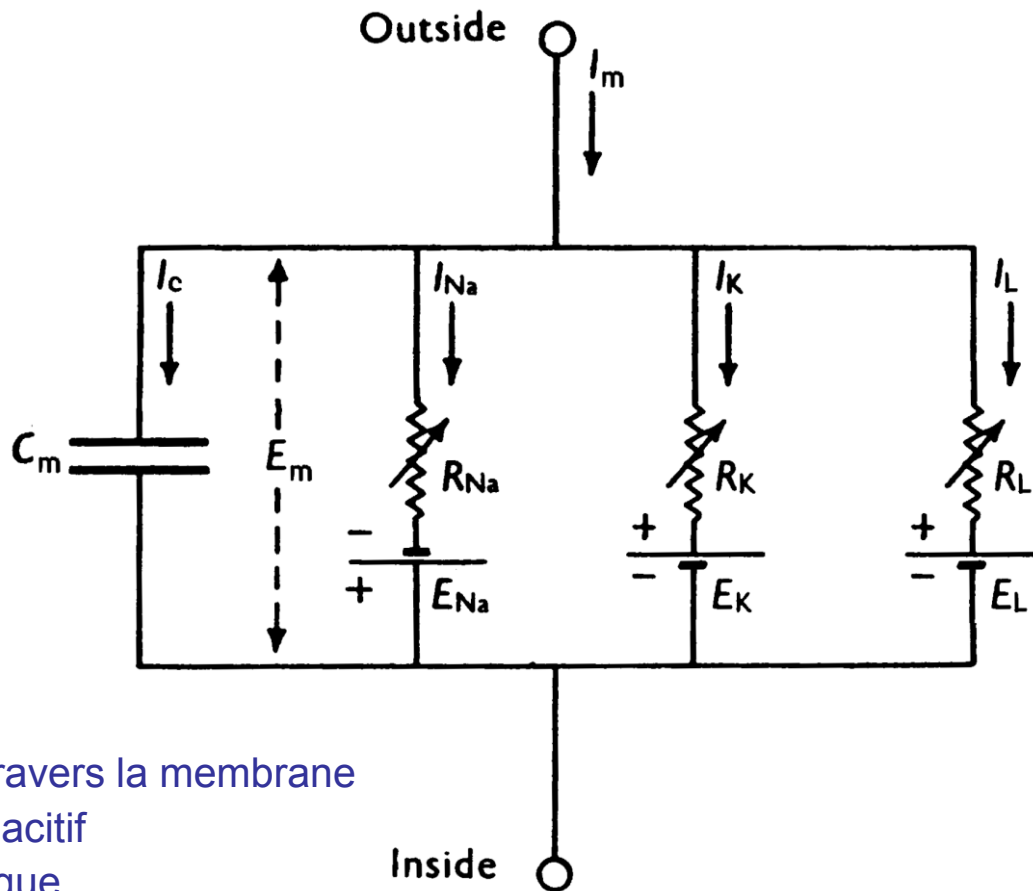
## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.3. Théorie de HODGKIN, HUXLEY, KATZ (1952)

#### 2.3.2. Modèle électrique de la membrane

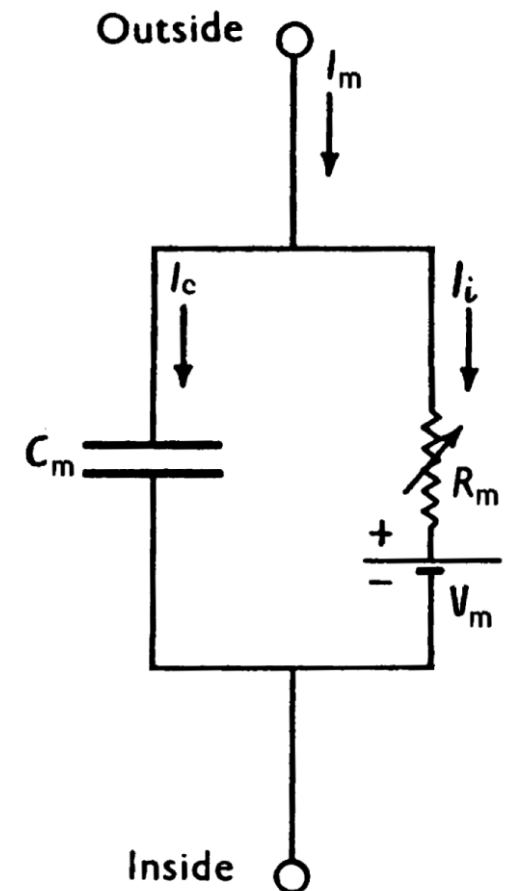
##### 2.3.2.2. Circuit équivalent

⇒ UN ELEMENT DE MEMBRANE



⇒

plus simplement



$I_m$  = courant à travers la membrane

$I_c$  = courant capacitif

$I_i$  = courant ionique

$V_m$  = potentiel transmembranaire

$I_{Na}$  = courant ionique de  $Na^+$

$I_K$  = courant ionique de  $K^+$

$I_L$  = courant de "fuite"

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.3. Théorie de HODGKIN, HUXLEY, KATZ (1952)

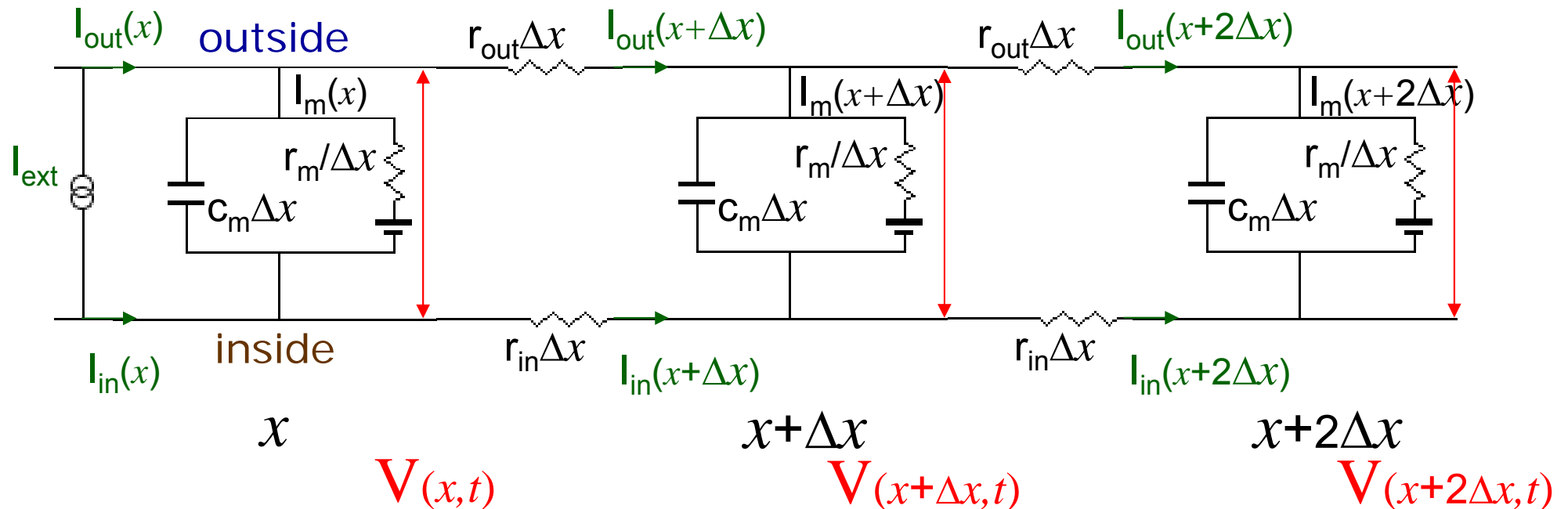
#### 2.3.3. Variations du potentiel de membrane

membrane  $\approx$  câble électrique



propriétés **PASSIVES**  
(pas d'apport supplémentaire d'énergie)

électrotonus



$\Delta x$  = longueur d'un bout de membrane

$r_m$  = résistivité membranaire [ $\Omega \cdot m$ ]

$C_m$  = capacité membranaire [ $F \cdot m^{-1}$ ] [ $F$ ] = [ $A \cdot s \cdot V^{-1}$ ]

$r_{out}$  = résistance longitudinale externe [ $\Omega \cdot m^{-1}$ ]

$r_{in}$  = résistance longitudinale interne [ $\Omega \cdot m^{-1}$ ]

$r_a$  = résistance axiale =  $r_{out} + r_{in}$  [ $\Omega \cdot m^{-1}$ ]

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.3. Théorie de HODGKIN, HUXLEY, KATZ (1952)

#### 2.3.3. Variations du potentiel de membrane

##### 2.3.3.1. Constante de temps

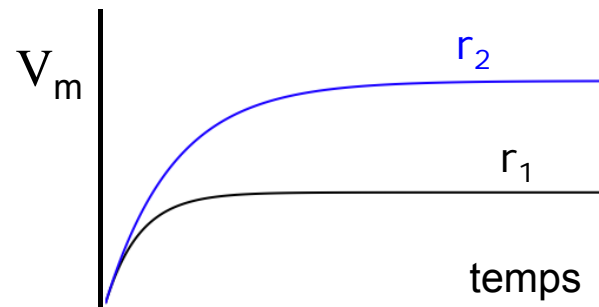
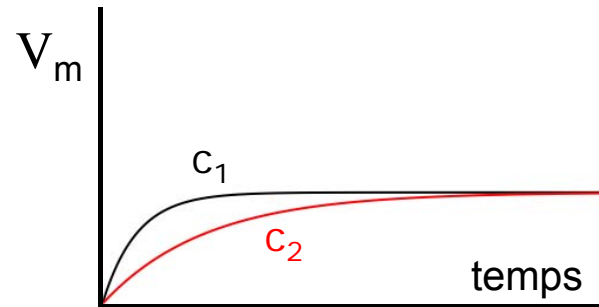
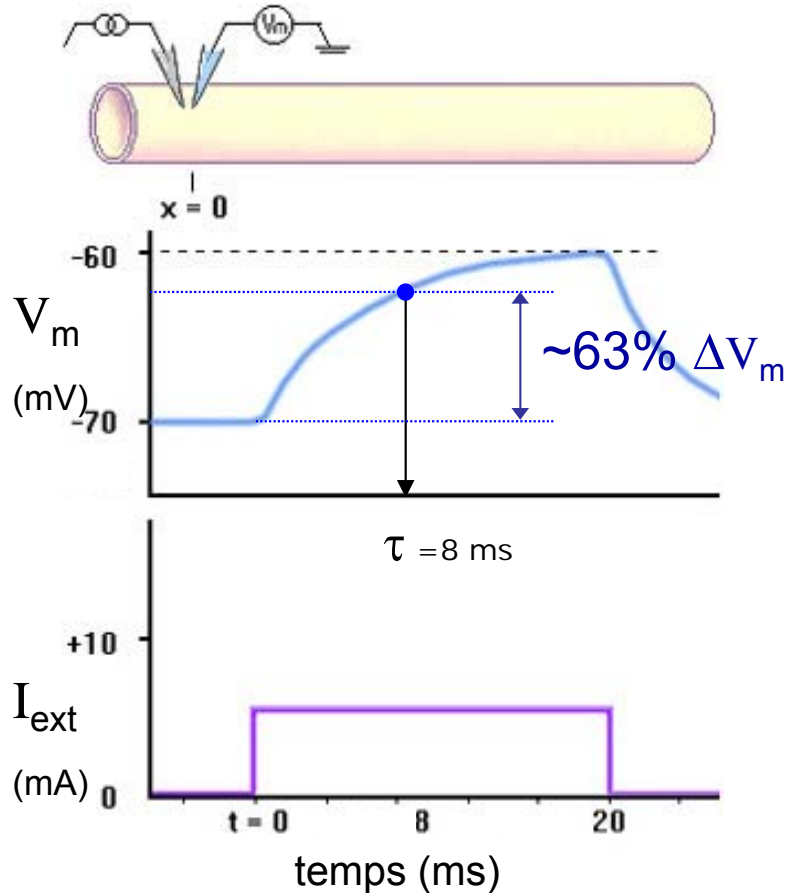
variation du potentiel au cours du temps

$\tau$  : constante de temps

$$\Delta V_m(t) = I_m R_m (1 - e^{-t/\tau})$$

$$\tau = r_m c_m$$

(par ex. de 1 à 20 ms)



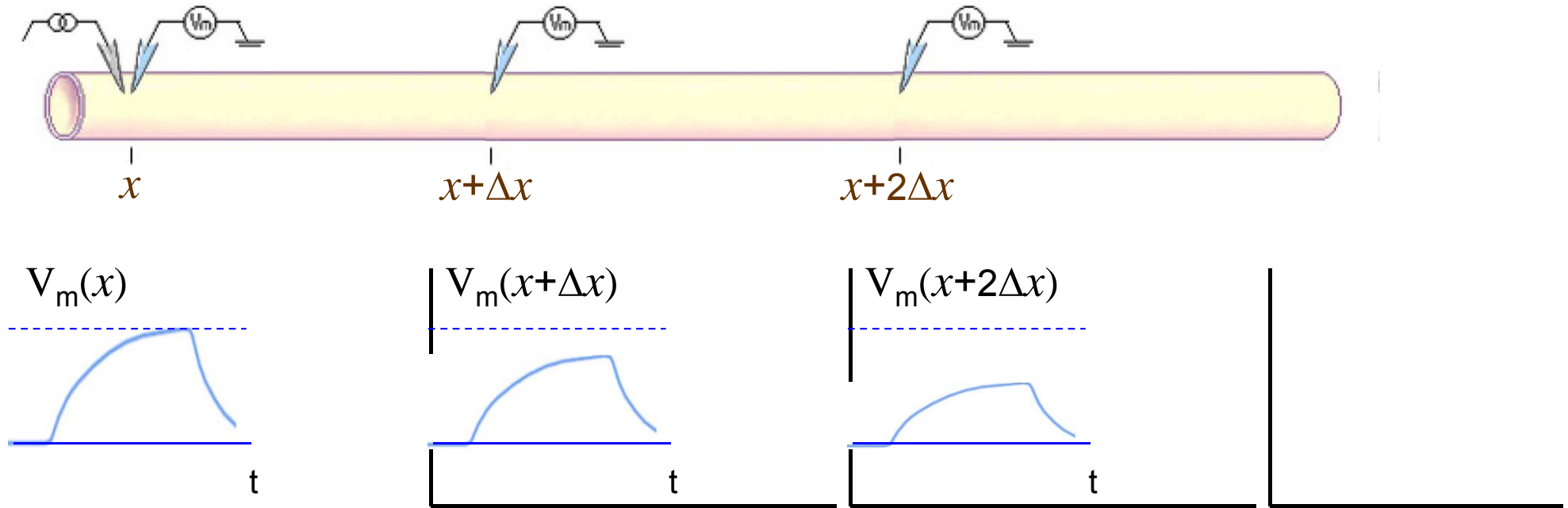
Circuit **RC** : propriétés capacitives  $\Rightarrow$  constante de temps

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

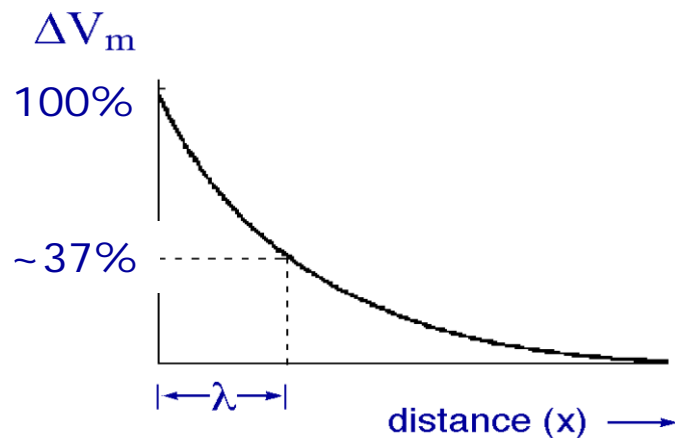
### 2.3. Théorie de HODGKIN, HUXLEY, KATZ (1952)

#### 2.3.3. Variations du potentiel de membrane

##### 2.3.3.2. Constante d'espace



Atténuation passive le long de la membrane  $\rightarrow$  propriétés de câble électrique



variation du potentiel dans l'espace

$\lambda$  : constante d'espace

$$\Delta V_m(x) = \Delta V_{m(x=0)} e^{-x/\lambda}$$

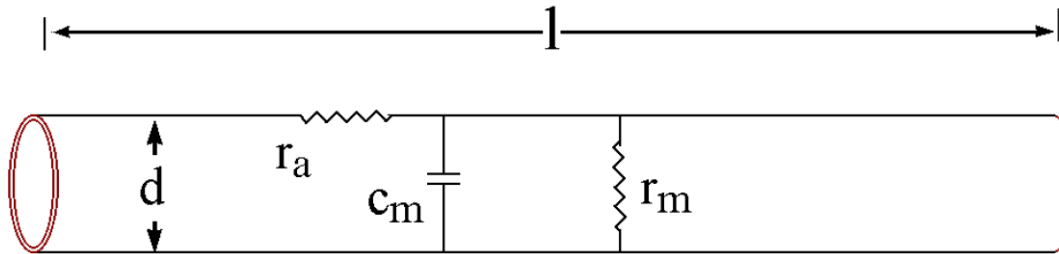
## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.3. Théorie de HODGKIN, HUXLEY, KATZ (1952)

#### 2.3.3. Variations du potentiel de membrane

##### 2.3.3.2. Constante d'espace

Propriétés de câble électrique



$R_a$  = résistance d'un élément de membrane [ $\Omega$ ]

$r_a$  = résistance axiale =  $r_{out} + r_{in}$  [ $\Omega \cdot m^{-1}$ ]

$r_m$  = résistivité membranaire [ $\Omega \cdot m$ ]

$c_m$  = capacité membranaire [ $F \cdot m^{-1}$ ]

$l$  = longueur du câble

$d$  = diamètre du câble

$$r_a \approx \frac{R_a \cdot l}{d^2}$$

$$[\Omega] = [V \cdot A^{-1}]$$

$$[F] = [A \cdot s \cdot V^{-1}]$$

$$\Delta V_m(x) = \Delta V_{(x=0)} \cdot e^{-x/\lambda}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{r_m}{r_a}}$$

(p.ex. de 0.1 à 1.0 mm)

Circuit **RC** : propriétés résistives  $\Rightarrow \lambda$  : **constante d'espace**

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.4. Transduction

#### 2.4.1. Mécanisme général

Stimulation = apport d'énergie

Différentes formes d'énergie sont transformées par le système nerveux

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

stimulus X → signal électrique spécifique

stimulus ⇔ structure du récepteur membranaire

Les récepteurs correspondent généralement à des structures spécialisées de la membrane cellulaire

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

→ langage commun pour tous les systèmes sensoriels

⇒ **TRANSDUCTION**



## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.4. Transduction

#### 2.4.2. Transduction sensorielle

##### 2.4.2.1. Stimulation

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

#### A. Intensité d'un stimulus

← quantité d'énergie reçue

← modalité sensorielle

#### B. Durée d'un stimulus

→ adaptation rapide, lente

→ réponse phasique: transitoirement au début ou à la fin de la stimulation

→ réponse tonique: soutenue pendant toute la durée de la stimulation

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.4. Transduction

#### 2.4.2. Transduction sensorielle

##### 2.4.2.2. 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**

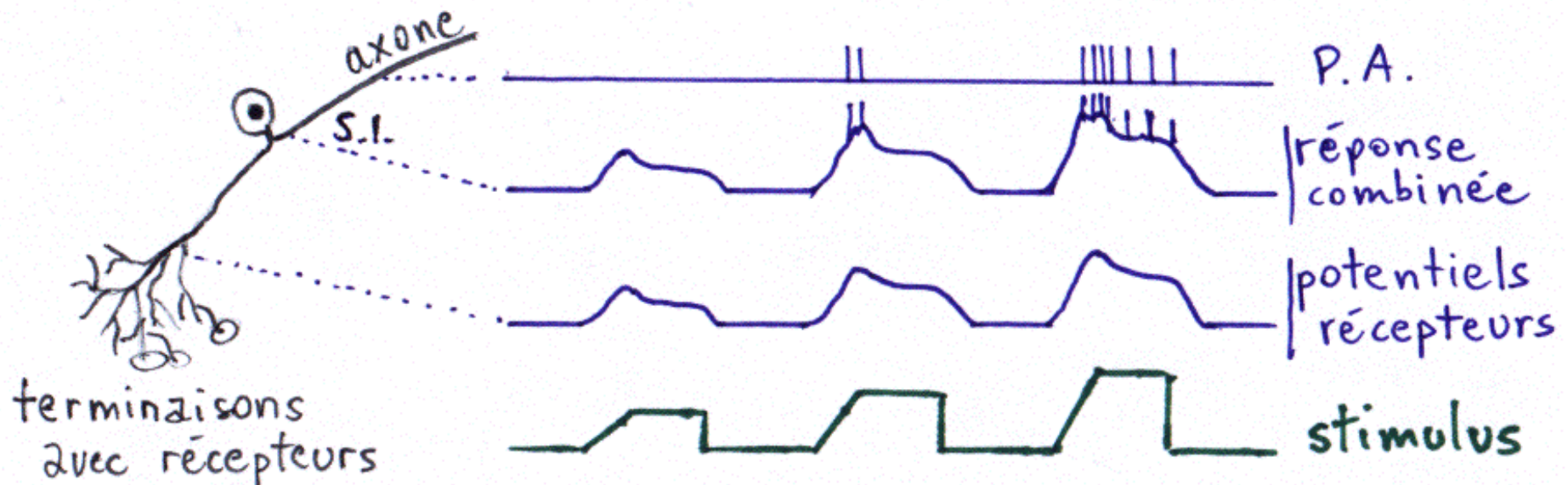
## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.4. Transduction

#### 2.4.2. Transduction sensorielle

##### 2.4.2.3. Transmission du signal

- dépolarisation de la membrane du récepteur → COURANTS LOCAUX
  - sommation des potentiels récepteurs
- ⇒ dépolarisation d'une structure membranaire particulière de la cellule sensorielle  
→ PA si **SEUIL** atteint



**CODAGE ANALOGIQUE ⇒ CODAGE DIGITAL**

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.4. Transduction

#### 2.4.2. Transduction sensorielle

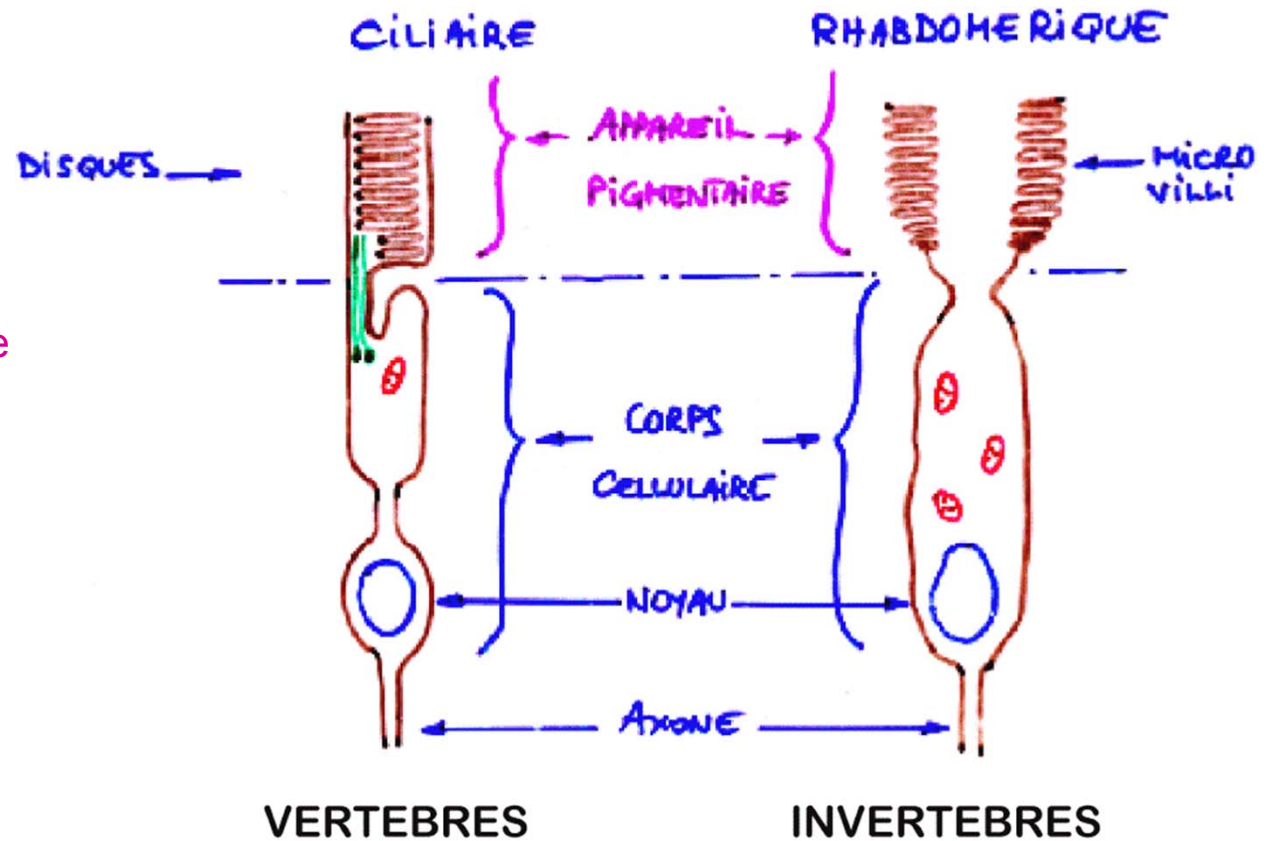
##### 2.4.2.4. Photoréception

Zone sensible = structure  
membranaire plissée

- en microvillosités
- en disques

⇒ ↑ surface membranaire exposée  
aux photons

⇔ amplification du signal



Pigment visuel {

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

Pigment visuel = convertisseur d'énergie: lumineuse → électrochimique

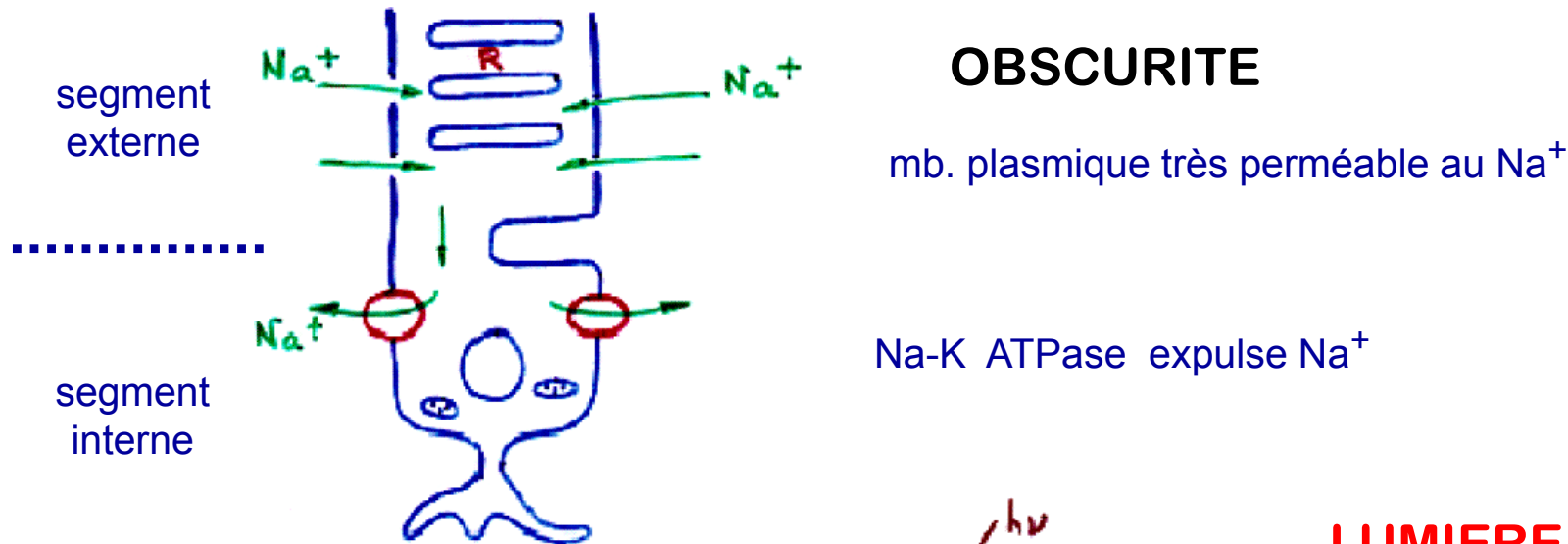
Ex. RHODOPSINE (P.M. 38000) (il y en a  $10^9$  par BATONNET)

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.4. Transduction

#### 2.4.2. Transduction sensorielle

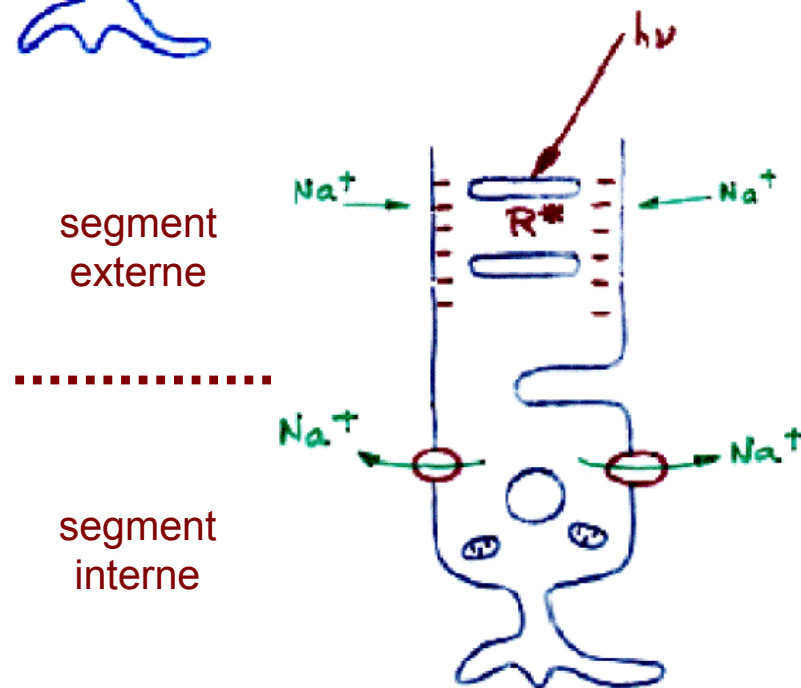
##### 2.4.2.4. Photoréception



### OBSCURITE

mb. plasmique très perméable au  $\text{Na}^+$

Na-K ATPase expulse  $\text{Na}^+$



### LUMIERE

Amplification biochimique:

1  $h\nu$  bloque le flux de  $10^6 \text{ Na}^+$

perméabilité au  $\text{Na}^+$  devient nulle

⇒ hyperpolarisation du segment externe...

... qui se propage au segment interne  
comment se transmet-il le signal?

$\text{Ca}^{2+}$  ?, GMPc ?

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.4. Transduction

#### 2.4.2. Transduction sensorielle

##### 2.4.2.4. Photoréception

#### (1) RHODOPSINE PHOTOLYSEE

- active par collisions successives 100 molécules d'une protéine de la mb. des Disques: la TRANSDUCINE ( $\approx$ 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  $\text{Na}^+$ .
- Hydrolyse GMPc  $\Rightarrow$  fermeture des canaux  $\Rightarrow$  hyperpolarisation de la mb. plasmique  $\Rightarrow$  Pot. Récepteur

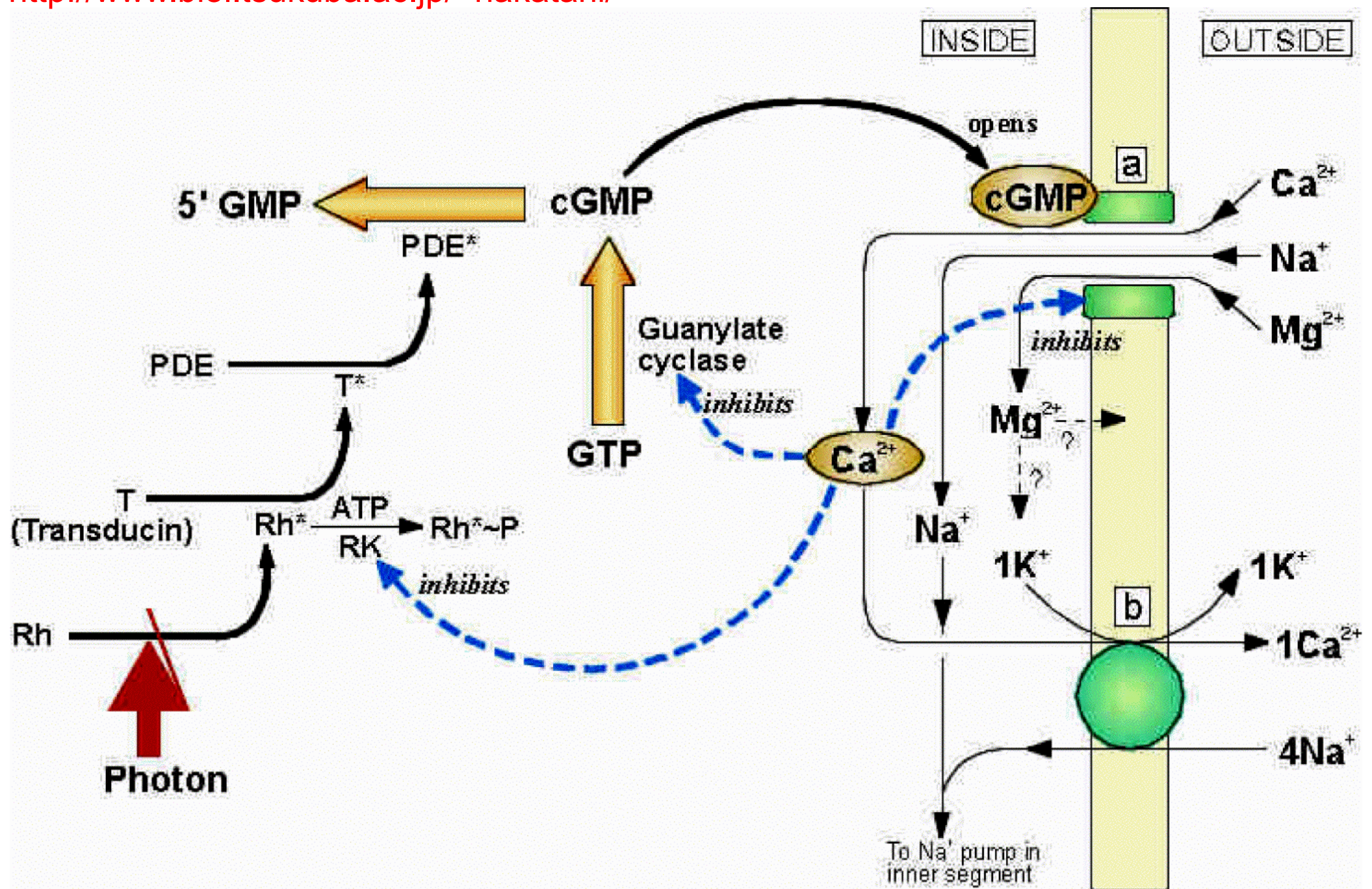
#### (5) ENERGIE D'HYDROLYSE DU GTP

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

#### (6) $\text{Ca}^{2+}$

- jouerait un rôle dans l'adaptation





a: cGMP-gated channel, b: Na<sup>+</sup>-Ca<sup>2+</sup>/K<sup>+</sup> exchanger, Rh: rhodopsin, Rh<sup>\*</sup>: activated rhodopsin, T: transducin(G-protein), T<sup>\*</sup>: activated transducin, PDE: phosphodiesterase, PDE<sup>\*</sup>: activated phosphodiesterase.

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.4. Transduction

#### 2.4.2. Transduction sensorielle

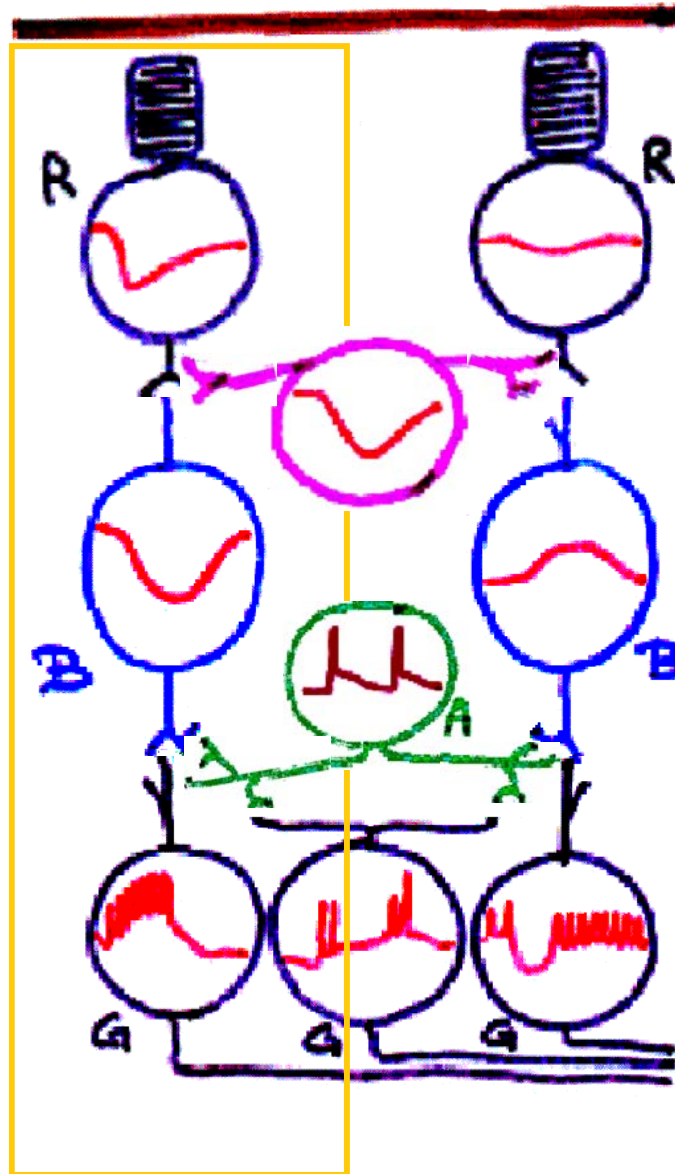
##### 2.4.2.4. Photoréception

La cellule photoréceptrice (bâtonnet/cône) **n'a pas de P.A.**

Réponse **GRADUELLE** à la lumière (potentiel récepteur) qui dépend du nb. de  $h\nu$  absorbés

Lumière

$h\nu$



EPITH. PIGMENTAIRE

RECEPTEURS

C. HORIZONTALE

C. BIPOLAIRE

C. AMACRINE

C. GANGLIONNAIRE

NERF OPTIQUE



## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.4. Transduction

#### 2.4.3. Transduction synaptique

##### 2.4.3.1. Fixation NEUROMEDIATEUR-RECEPTEUR

Année 2010 : nombre de neurotransmetteurs connus > 100

⇒ centaines de récepteurs différents

- Effets des récepteurs:

⇒ ↑PERMEABILITE → COURANT IONIQUE

→  $\text{Na}^+$  → dépolarisation = EXCITATION

→  $\text{Cl}^-$  → hyperpolarisation = INHIBITION

- Catégories de récepteurs:

→ Récepteurs canaux

→ Récepteurs couplés aux protéines G

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.4. Transduction

#### 2.4.3. Transduction synaptique

##### 2.4.3.1. Fixation NEUROMEDIATEUR-RECEPTEUR

### Destruction ENZYMATIQUE du médiateur

C'est une étape essentielle, sinon le récepteur reste bloqué !!

→ liberté du RECEPTEUR  
= réversibilité de l'effet.

Exemple: Acétylcholine-estérase (AChE)

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.4. Transduction

#### 2.4.3. Transduction synaptique

##### 2.4.3.2. Récepteurs canaux

Canaux ioniques activés par la fixation de neurotransmetteurs

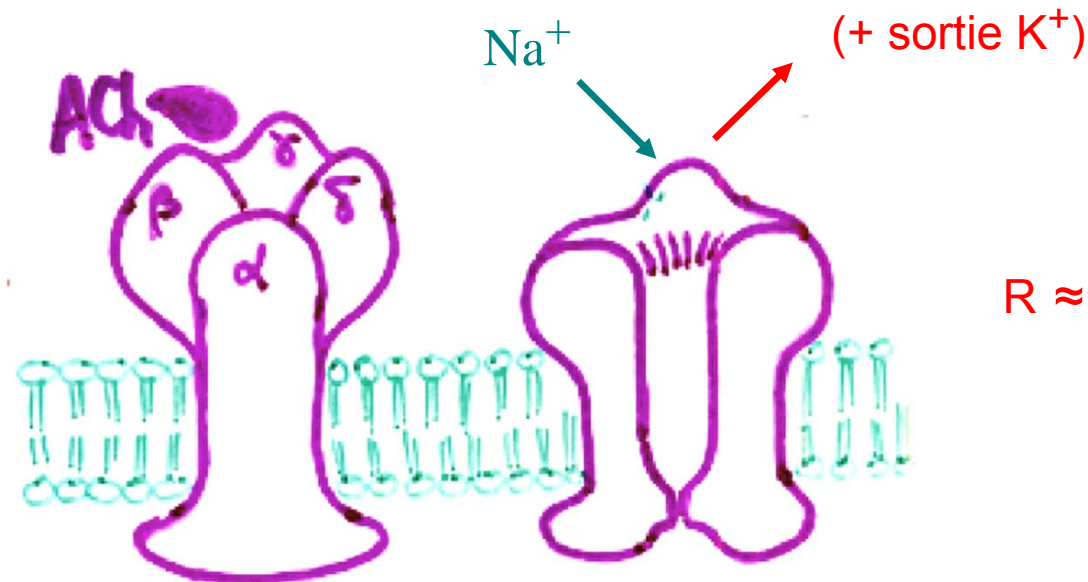
→ 4 sous-unités différentes (= 5 PR car 1 sous-unité répétée 2 fois)  
s'associent pour former 1 canal ex. récepteur ACh :  $\alpha_2\beta\gamma\delta$

1. Fixation de ACh sur des sites spécifiques de la partie extracellulaire du canal
2. changements conformationnels (torsion des sous-unités)
3. pore fermé → pore ouvert (en quelques  $\mu\text{s}$ )

entrée  $\text{Na}^+$

→ dépolarisation

→ EXCITATION



$R \approx 100 \, \Omega/\text{mm}^2$

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.4. Transduction

#### 2.4.3. Transduction synaptique

##### 2.4.3.2. Récepteurs canaux

→ Faible sélectivité ionique (bien inférieure aux canaux voltage-dépendants)

Récepteur Glu : → AMPA : perméable à  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$   
→ NMDA : perméable à  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  et  $\text{Ca}^{++}$  :>>>> **Toxicité**

**NMDA-R : voltage-dépendant**

⇒ si  $V_m = -65 \text{ mV}$  ⇒ NMDA-R reste fermé même après fixation de Glu !!

⇒ dépolarisation et fixation de Glu doivent coïncider pour ⇒ ouverture NMDA

Récepteur Gly → perméable à  $\text{Cl}^-$

Récepteur  $\text{GABA}_A$  → perméable à  $\text{Cl}^-$

→ sites spécifiques de fixation à d'autres substances

barbituriques (ex. phénobarbital) ⇒ ↑ durée d'ouverture des canaux

benzodiazépines (ex. diazépam) ⇒ ↑ fréquence d'ouverture

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.4. Transduction

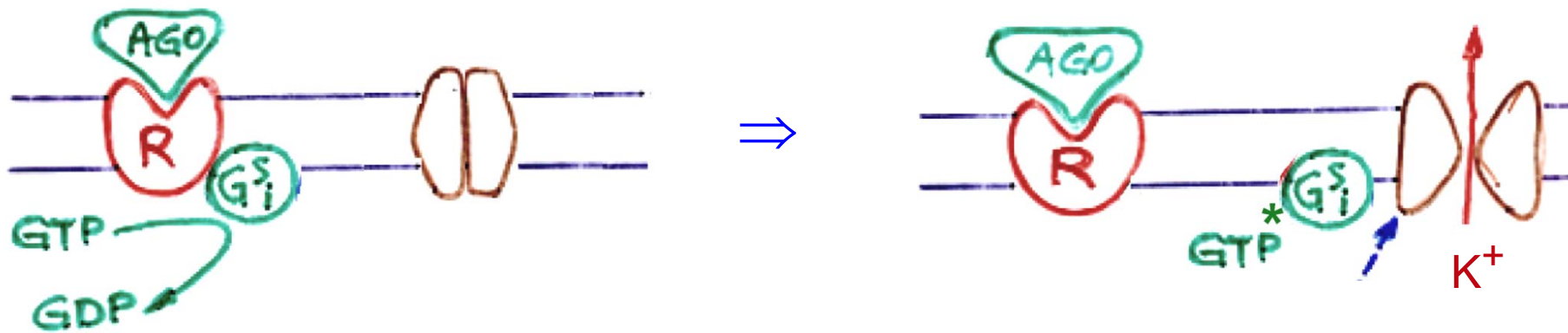
#### 2.4.3. Transduction synaptique

##### 2.4.3.3. Récepteurs couplés aux protéines G

### A. MESSAGER UNIQUE récepteur activé $\Rightarrow$ activation protéine G

Alfred G. Gilman (Prix Nobel 1994)  
Martin Rodbell

$\Rightarrow \uparrow$  conformation  $\Rightarrow \uparrow$  conductance



AGO : agoniste

R : Récepteur

G<sub>i</sub><sup>s</sup> : G-Binding Protein (STIM, INHIB)

voie "rapide"

$\rightarrow$  30-100 ms après fixation du transmetteur

Récepteur ACh (muscarinique)  $\rightarrow$  perméable à K<sup>+</sup>

Récepteur GABA<sub>B</sub>  $\rightarrow$  perméable à K<sup>+</sup>

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.4. Transduction

#### 2.4.3. Transduction synaptique

##### 2.4.3.3. Récepteurs couplés aux protéines G

### B. SECOND MESSENGER

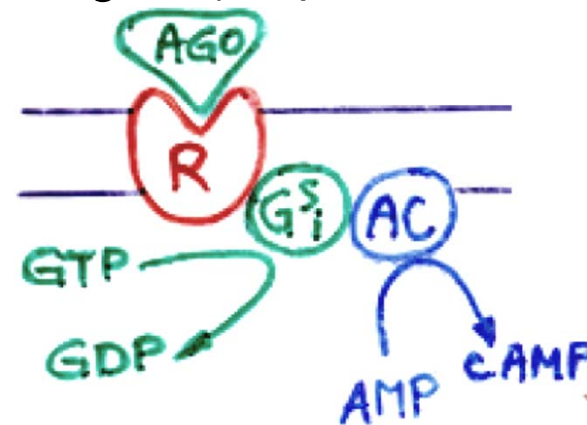
récepteur activé  $\Rightarrow$  activation protéine G  
 $\Rightarrow$  activation adényl cyclase  
 $\Rightarrow \uparrow\downarrow [cAMP]_i$   
 $\Rightarrow$  cascade des seconds messagers (ex. protéine kinase)

AGO : agoniste

R : Récepteur

AC : Adenyl Cyclase

$G_i^s$  : G-Binding Protein (STIM, INHIB)



voie “**lente**”

- minutes après fixation du transmetteur
- amplification de la réponse

**EFFETS PHYSIOLOGIQUES**

Récepteur NA  $\beta$  - adrénergique  $\Rightarrow \uparrow$  activité Adenylcyclase  $\Rightarrow \uparrow [cAMP]_i$

Récepteur NA  $\alpha_2$ - adrénergique  $\Rightarrow \downarrow$  activité Adenylcyclase  $\Rightarrow \downarrow [cAMP]_i$

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.4. Transduction

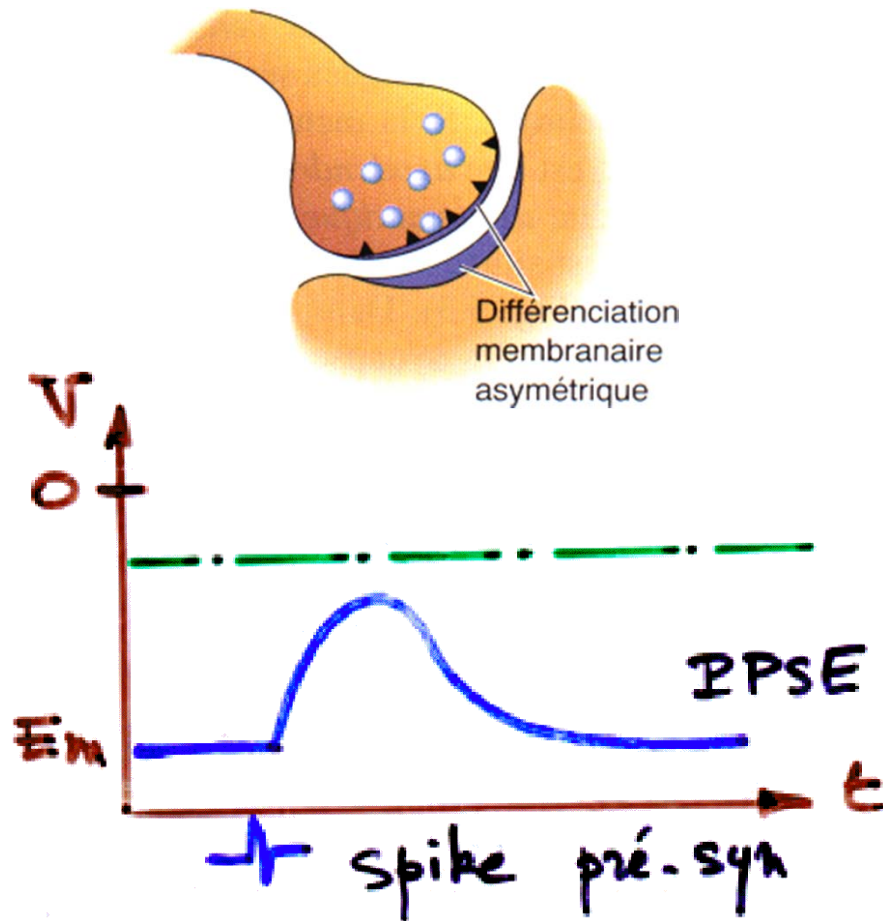
#### 2.4.3. Transduction synaptique

##### 2.4.3.4. Potentiel post-synaptique

##### A. Potentiel post-synaptique excitateur (PPSE)

#### Synapses excitatrices

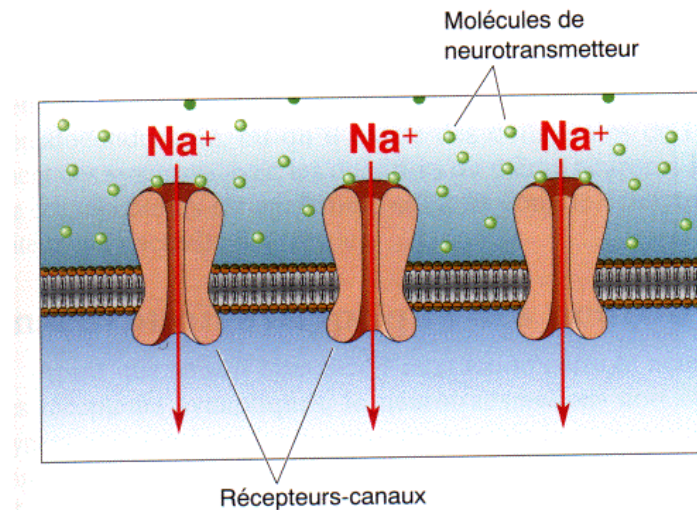
Souvent morphologie **asymétrique**  
(synapse de Gray de type I)



#### Glutamate, Aspartate, ACh

→ entrée  $\text{Na}^+$  ou CATIONS

→ dépolarisation de la mb. post-syn.



⇒ excitabilité membranaire



## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.4. Transduction

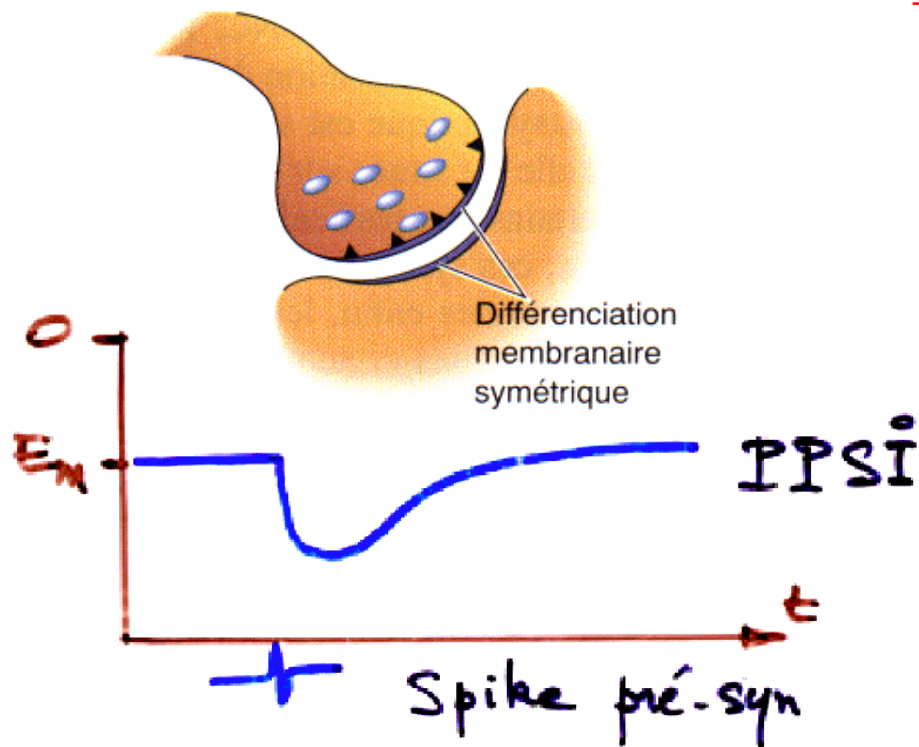
#### 2.4.3. Transduction synaptique

##### 2.4.3.4. Potentiel post-synaptique

### B. Potentiel post-synaptique inhibiteur (PPSI)

#### Synapses inhibitrices

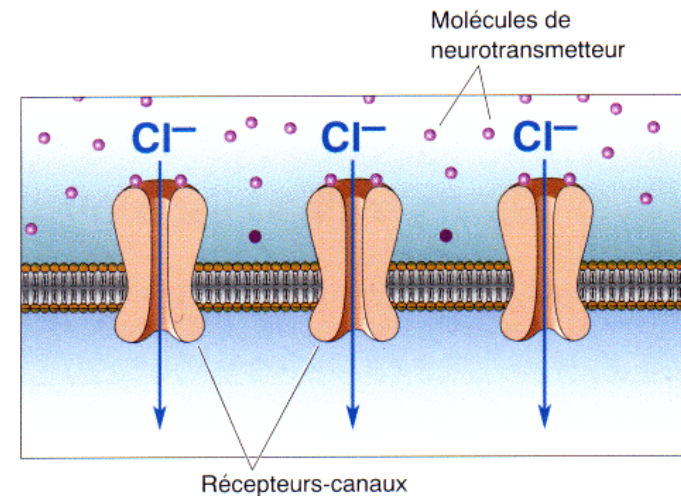
Souvent morphologie **symétrique**  
(synapse de Gray de type II)



GABA, Glycine, Dopamine, Substance P,  
Norépinephrine, Sérotonine

→ entrée  $\text{Cl}^-$  ou ANIONS

→ hyperpolarisation de la mb. post-syn.



⇒ excitabilité membranaire

Attention à la différence entre PPSE et PPSI !!

On ne peut pas hyperpolariser plus bas que le  $E_{\text{Cl}}$  (pot. d'équilibre du  $\text{Cl}^-$ )



## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.4. Transduction

#### 2.4.4. Sommation

##### 2.4.4.1. Sommation algébrique

Potentiels récepteurs  
Potentiels postsyn. } Potentiels analogiques résultant d'une transduction

Propriétés de cable soient respectées  
Pas de non linéarités voltage-dépendantes



dépolarisations  
+  
hyperpolarisations

Dans ces conditions exclusivement la sommations des potentiels est possible

⇒ opération linéaire

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

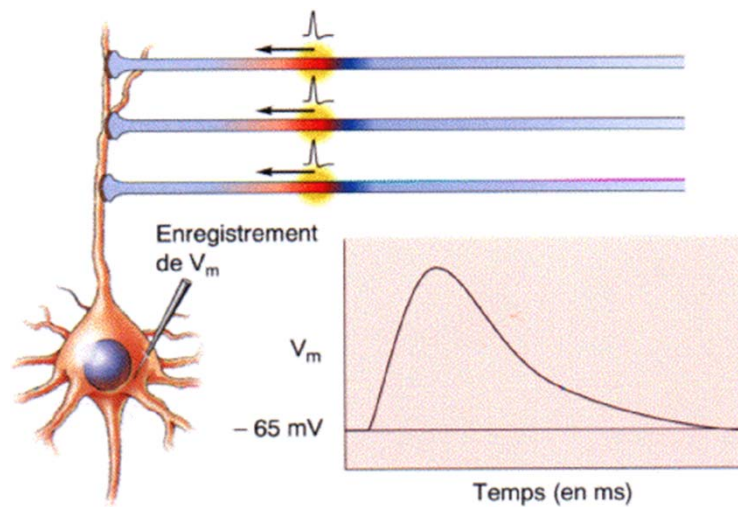
### 2.4. Transduction

#### 2.4.4. Sommation

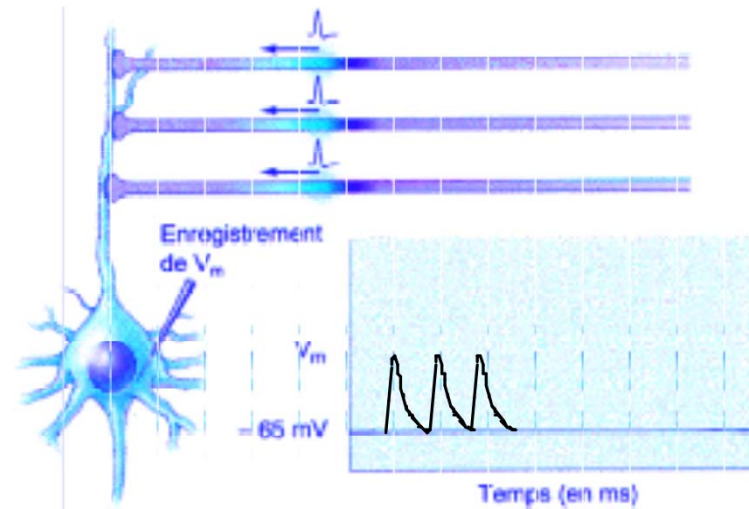
##### 2.4.4.2. Sommation spatiale

Effet de la constante d'espace  $\lambda$

**Sommation** si valeur  $\lambda$   
est grande



**Pas de sommation** si valeur  $\lambda$   
est insuffisante



## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

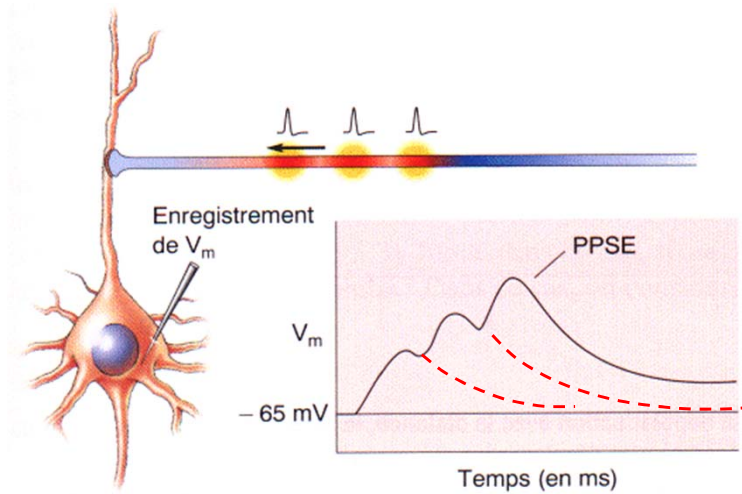
### 2.4. Transduction

#### 2.4.4. Sommation

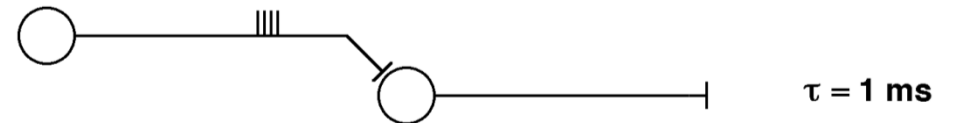
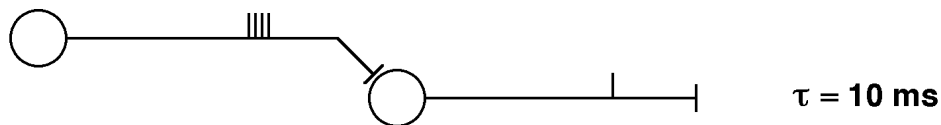
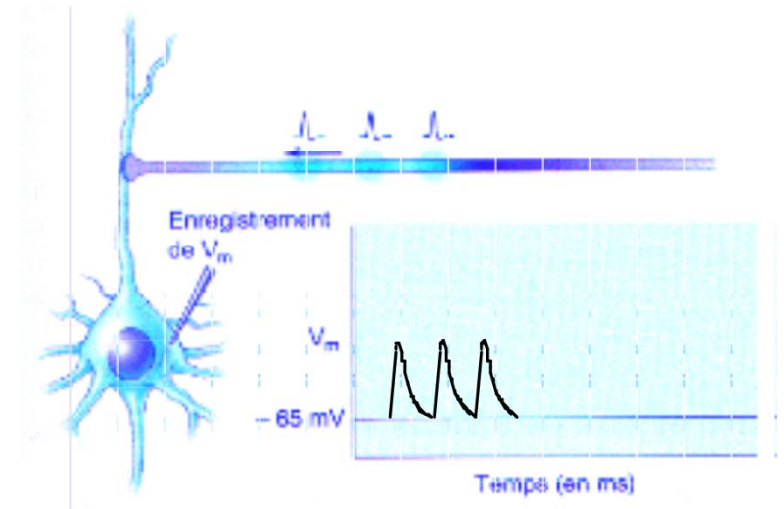
##### 2.4.4.3. Sommation temporelle

Effet de la constante de temps  $\tau$

**Sommation** si valeur  $\tau$   
est grande



**Pas de sommation** si valeur  $\tau$   
est insuffisante



## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

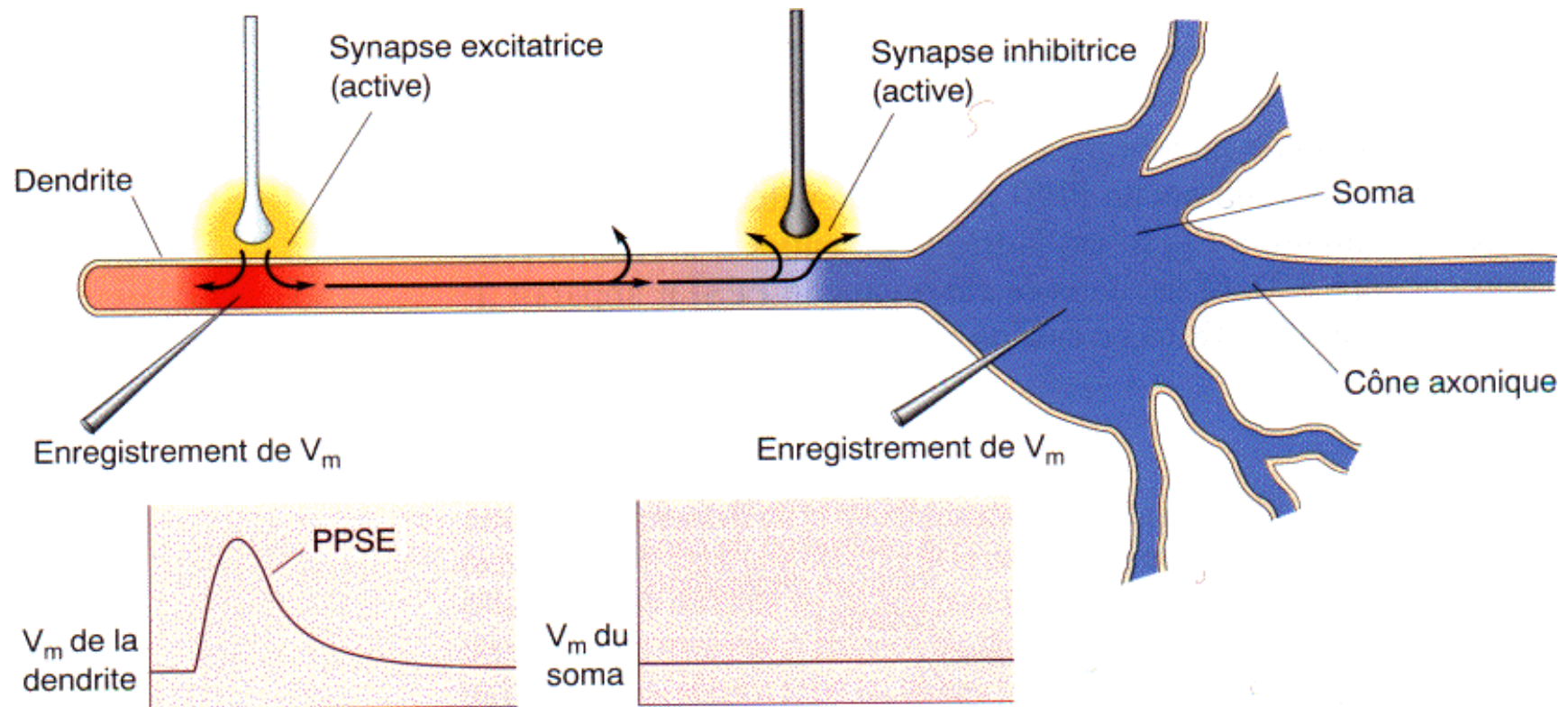
### 2.4. Transduction

#### 2.4.4. Sommutation

##### 2.4.4.4. Inhibition de barrière

Synapses inhibitrices souvent localisées proximales au corps cellulaire empêchent la propagation des courants excitateurs vers le corps cellulaire

⇒ effet de **barrière** (*shunting inhibition*) ⇒ **PAS DE SOMMATION**



## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

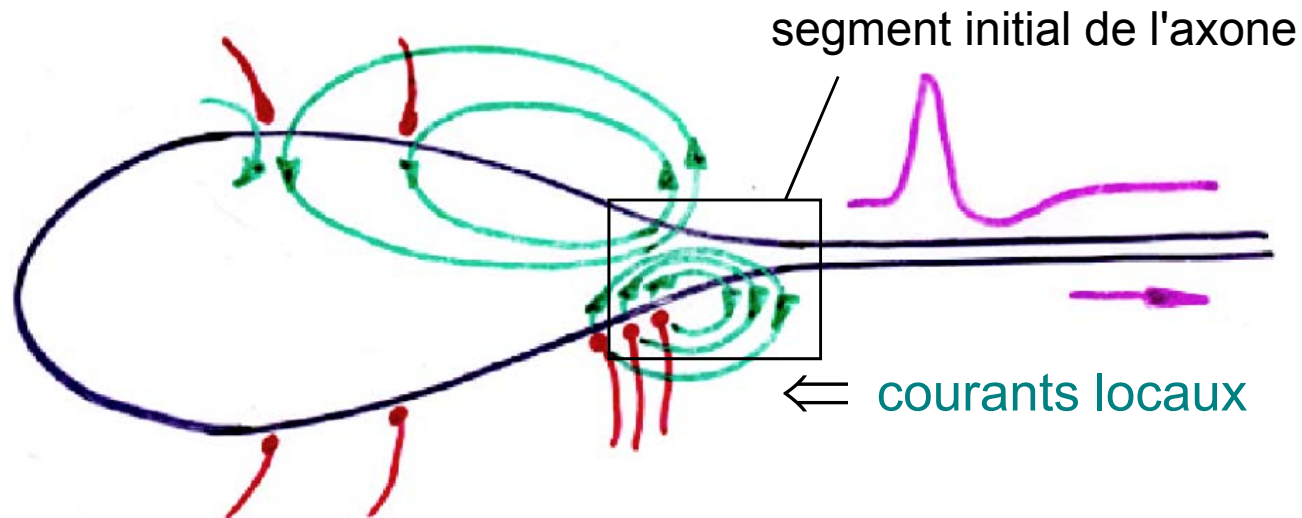
### 2.5. Potentiel d'action

#### 2.5.1. Courants ioniques

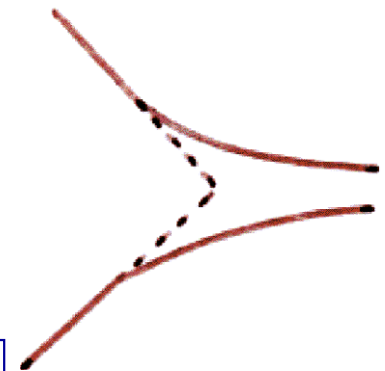
##### 2.5.1.1. Courants locaux

- $PM_{SI}$  = Pot. de Membrane résultant de l'intégration des potentiels post-synaptiques

- seuil local
- de  $E_m \leftarrow$  des  $[Na, K, Cl]$  de part et d'autre de la membrane
- du PPS résultant de l'action de toutes les synapses



- **Rétrécissement:**  $\Rightarrow \downarrow$  surface membranaire  
 $\Rightarrow \uparrow$  densité des courants locaux sortant  
( $\leftarrow$  angle au sommet, et non  $\emptyset$  de l'AXONE)  
 $\Rightarrow \uparrow$  **dépolarisation**



Les conductances ioniques ( $\propto$  perméabilité) varient avec le potentiel

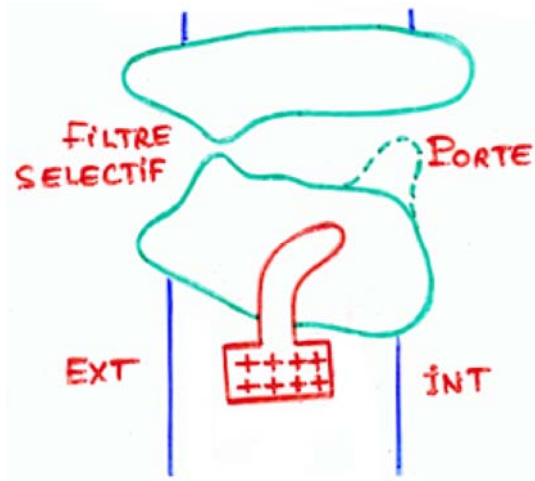
## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.5. Potentiel d'action

#### 2.5.1. Courants ioniques

##### 2.5.1.2. Canaux ioniques voltage-dépendants

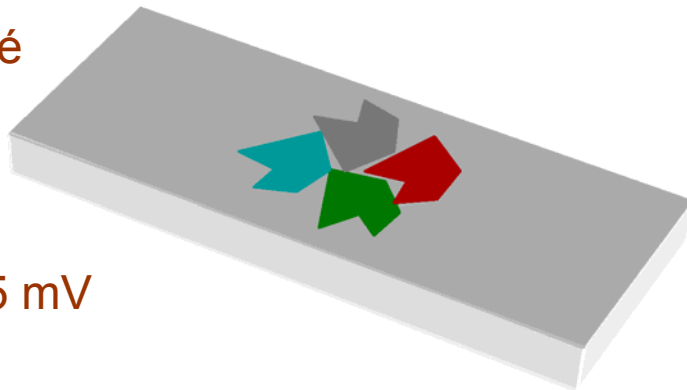
### canal sodique Na:



- 1 seule PR
  - 4 domaines qui sont réunis et qui forment, entre eux, 1 pore
  - 6 hélices  $\alpha$  transmb.  $\Rightarrow$  changements conformationnels
- ouverture "tout ou rien" déclenchée par **DEPOLARISATION**  
 $\rightarrow$  active senseur chargé +
- sélectif pour  $\text{Na}^+$
- inhibée par **TETRODOTOXINE (TTX)**  
et pas par  $\alpha$ -BUNGAROTOXINE

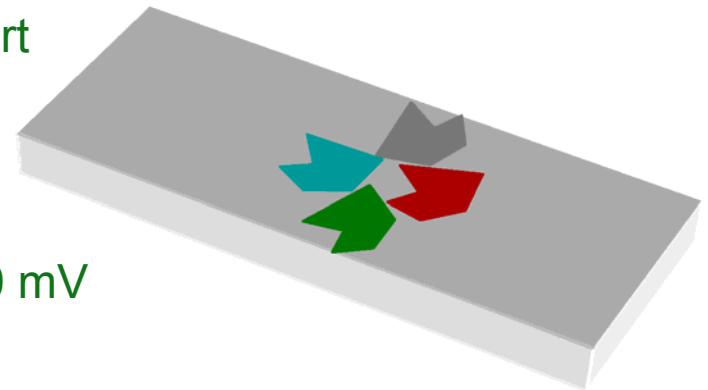
pore fermé

$$V_m = -65 \text{ mV}$$



pore ouvert

$$V_m = -40 \text{ mV}$$



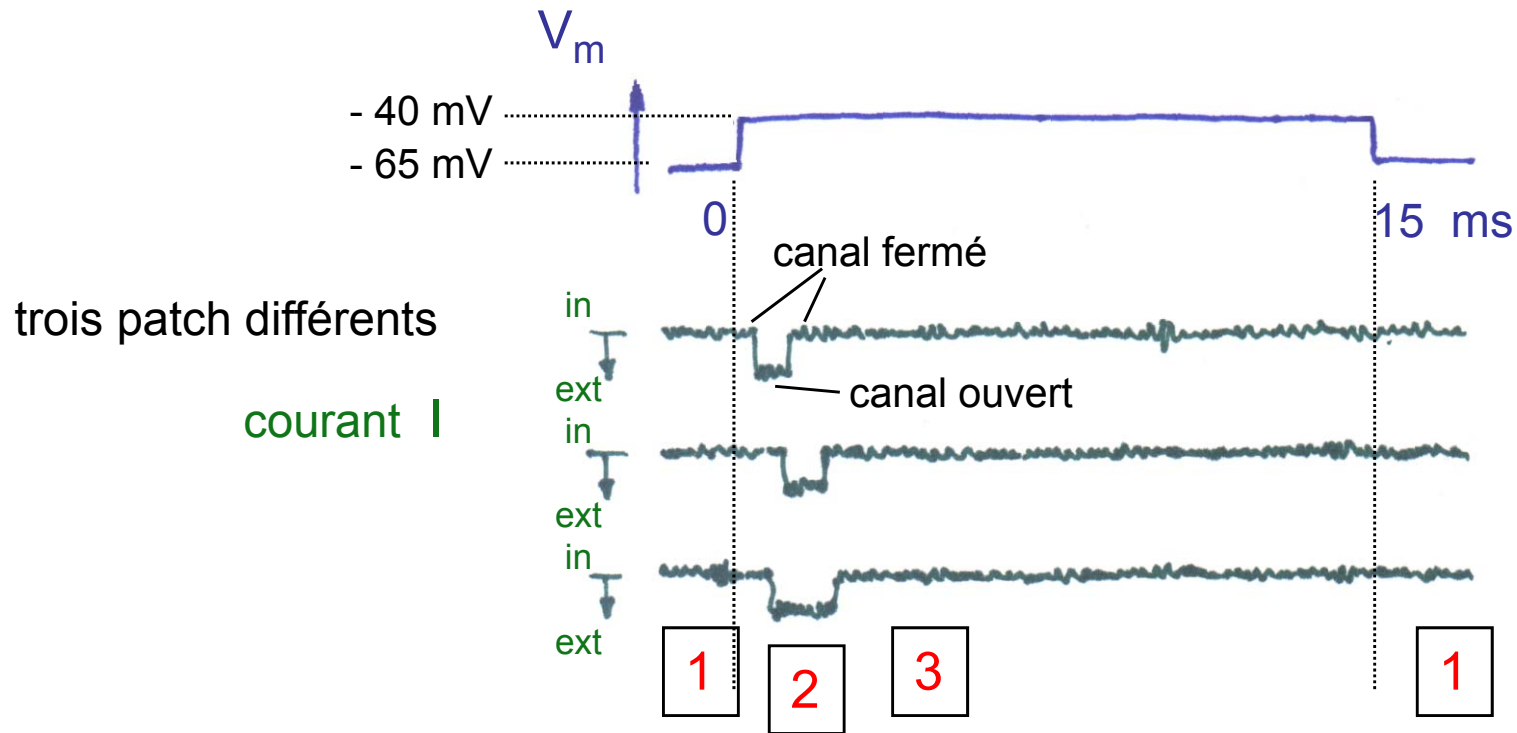


## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.5. Potentiel d'action

#### 2.5.1. Courants ioniques

##### 2.5.1.2. Canaux ioniques voltage-dépendants



Les **canaux Na** voltage dépendants passent par **3 états**:

- **fermé + activable**
- **ouvert** : canaux s'ouvrent rapidement ( $\mu s$ ) et restent ouverts env. 1 ms
- **fermé + inactivable**: canaux se referment même si la dépolarisation continue
- repolarisation  $\Rightarrow$  changements conformationnels qui remettent les canaux à l'état initial

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.5. Potentiel d'action

#### 2.5.1. Courants ioniques

##### 2.5.1.2. Canaux ioniques voltage-dépendants

### canal potassique K:

- sélectif pour  $K^+$
  - il existe plusieurs PR mais toutes ayant une structure similaire
  - 4 sous-unités polypeptidiques distinctes, associées pour former 1 pore
- ⇒ cinétique coopérative
- ouverture "tout ou rien" déclenchée par DEPOLARISATION mais:
    - ouverture retardée (env. 1 ms) après la depolarisation
    - les canaux peuvent se rouvrir avant de revenir au  $V_{\text{repos}}$

### canal calcique Ca:

- sélectif pour  $Ca^{++}$
- semblables aux canaux sodiques
- deux localisations principales :
  - **synapse**: canaux Ca voltage-dépendants  $\Rightarrow \uparrow [Ca^{++}]_{\text{int}} \Rightarrow$  libération transmetteur
  - **soma et dendrites proximales** : bistabilité des neurones (n. du thalamus entre autres)
    - décharges de PA isolés (PA "sodiques") ou en bouffées (PA "calciques")



## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.5. Potentiel d'action

#### 2.5.2. Cycle de l'excitabilité membranaire

##### 2.5.2.1. Déclenchement du P.A.

$$g_{ion} = f(V_m)$$

$$V_m = f(g_{ion})$$

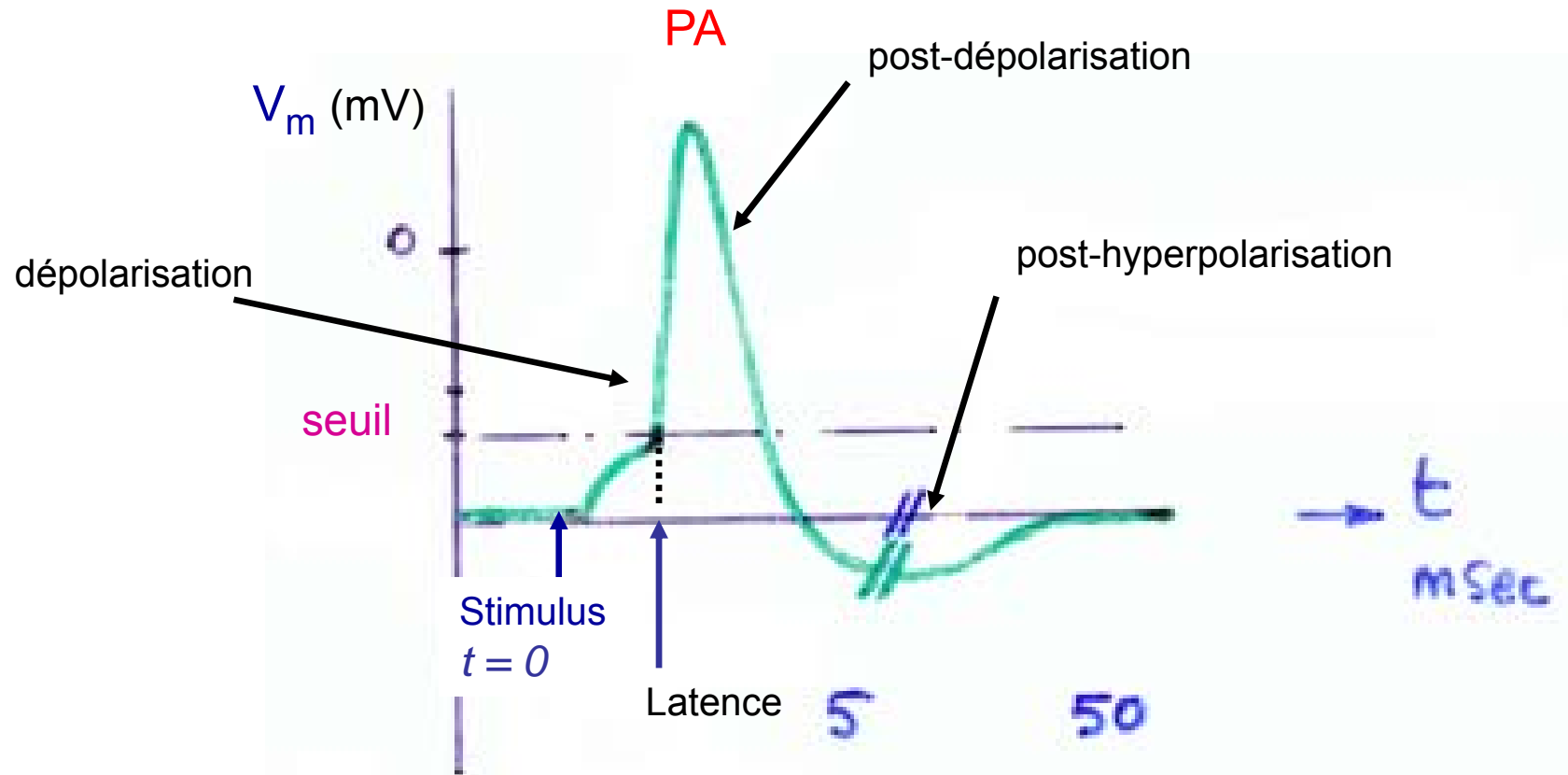
???  $\Rightarrow$  pour déclencher un PA il faut un apport d'énergie

Stimulus = apport d'énergie (électrochimique, mécanique) qui modifie la perméabilité membranaire

$\Leftrightarrow$  modifie les  $g_{ion}$   $\rightarrow$  **seuil** : définition fonctionnelle

intensité du stimulus  $<$  seuil  $\rightarrow$  stimulus infraliminaire ou subliminaire  $\Rightarrow$  pas de PA

intensité du stimulus  $>$  seuil  $\rightarrow$  stimulus supraliminaire  $\Rightarrow$  déclenchement de PA



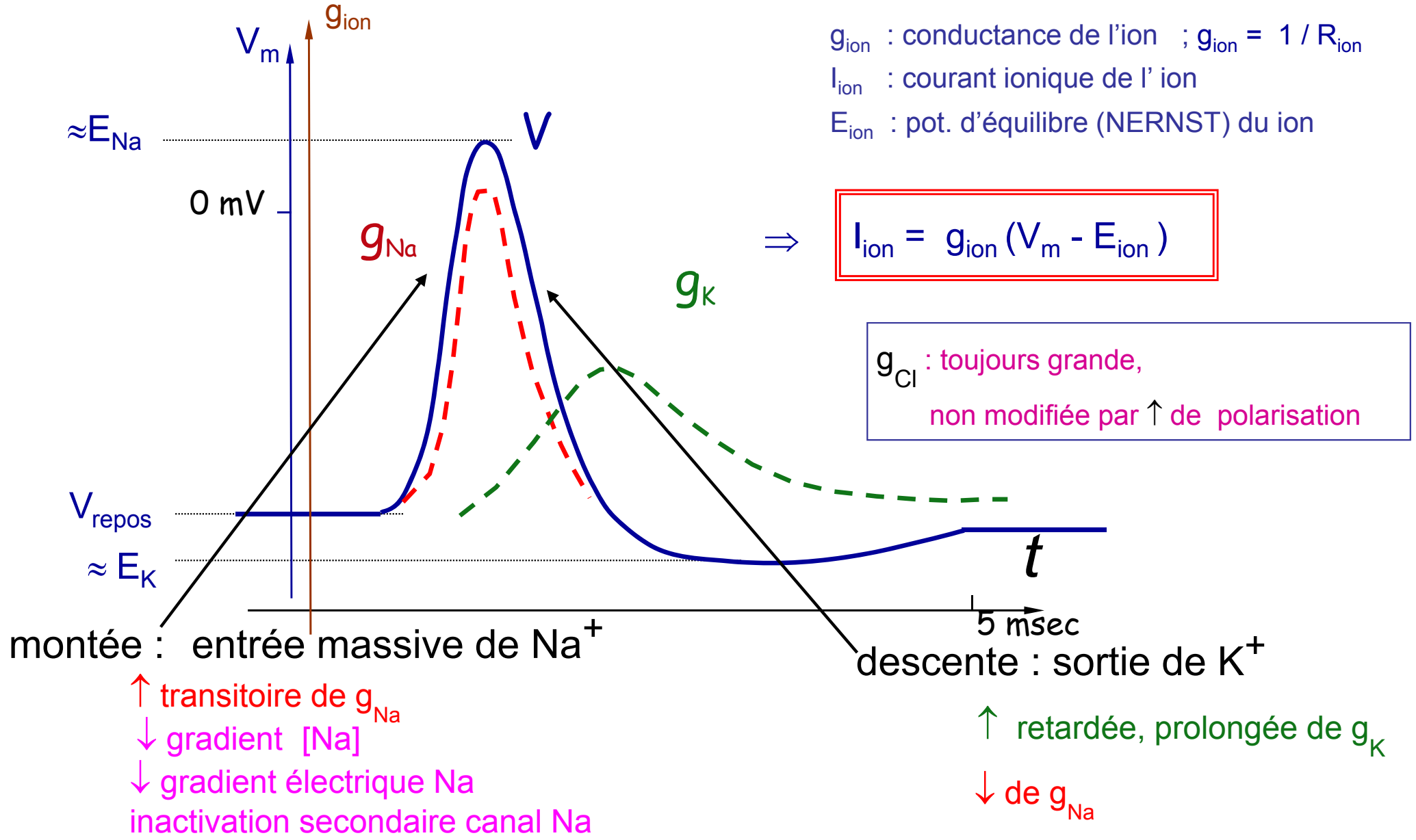
## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.5. Potentiel d'action

#### 2.5.2. Cycle de l'excitabilité membranaire

##### 2.5.2.1. Déclenchement du P.A.

Les conductances ioniques ( $\propto$  perméabilité) varient avec le potentiel

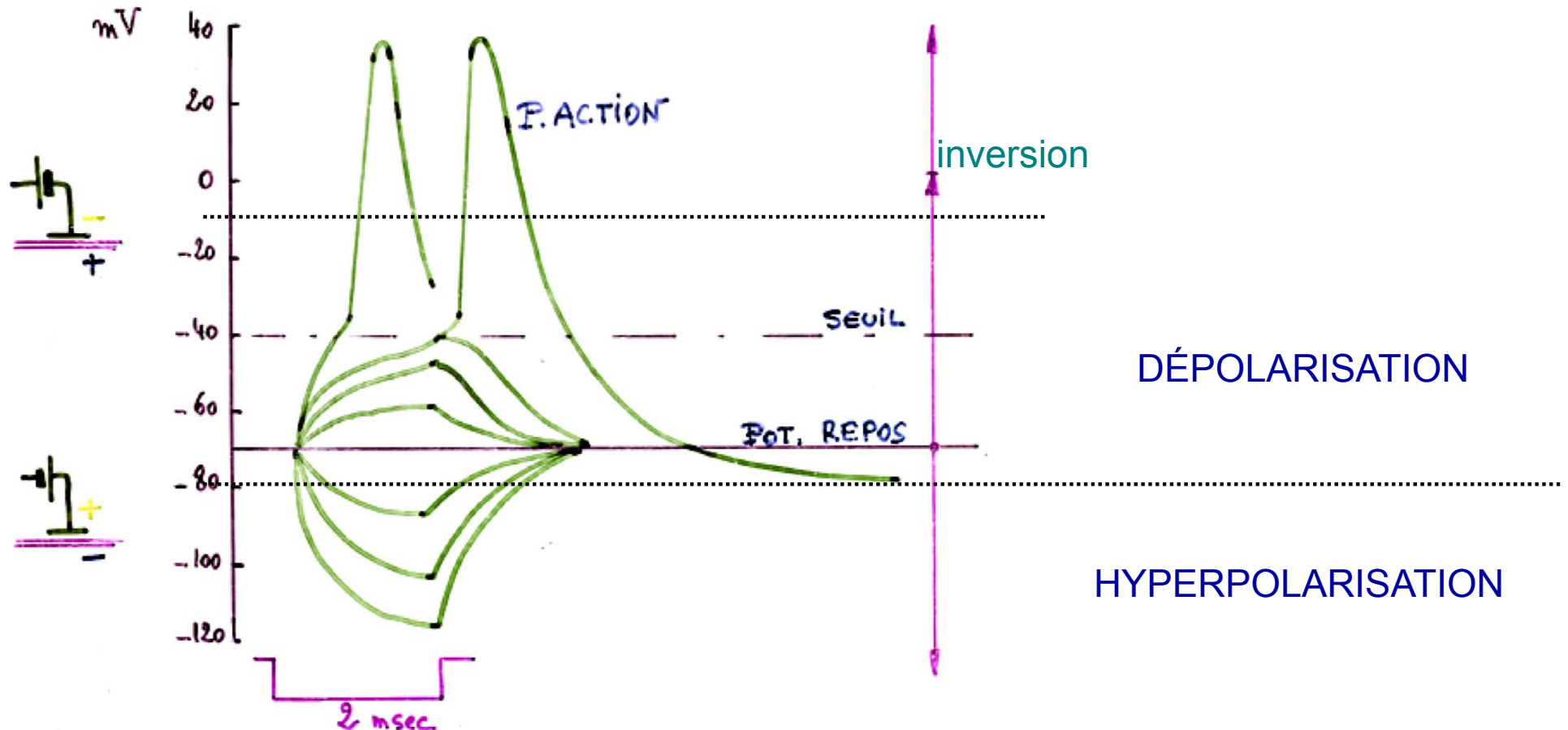


## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.5. Potentiel d'action

#### 2.5.2. Cycle de l'excitabilité membranaire

##### 2.5.2.1. Déclenchement du P.A.



La forme du PA reflète les caractéristiques membranaires d'une cellule donnée:

→ propriétés actives de la membrane: ⇒ le PA est régénéré

→ le PA se propage identique à lui-même : tous les PA auront la même forme

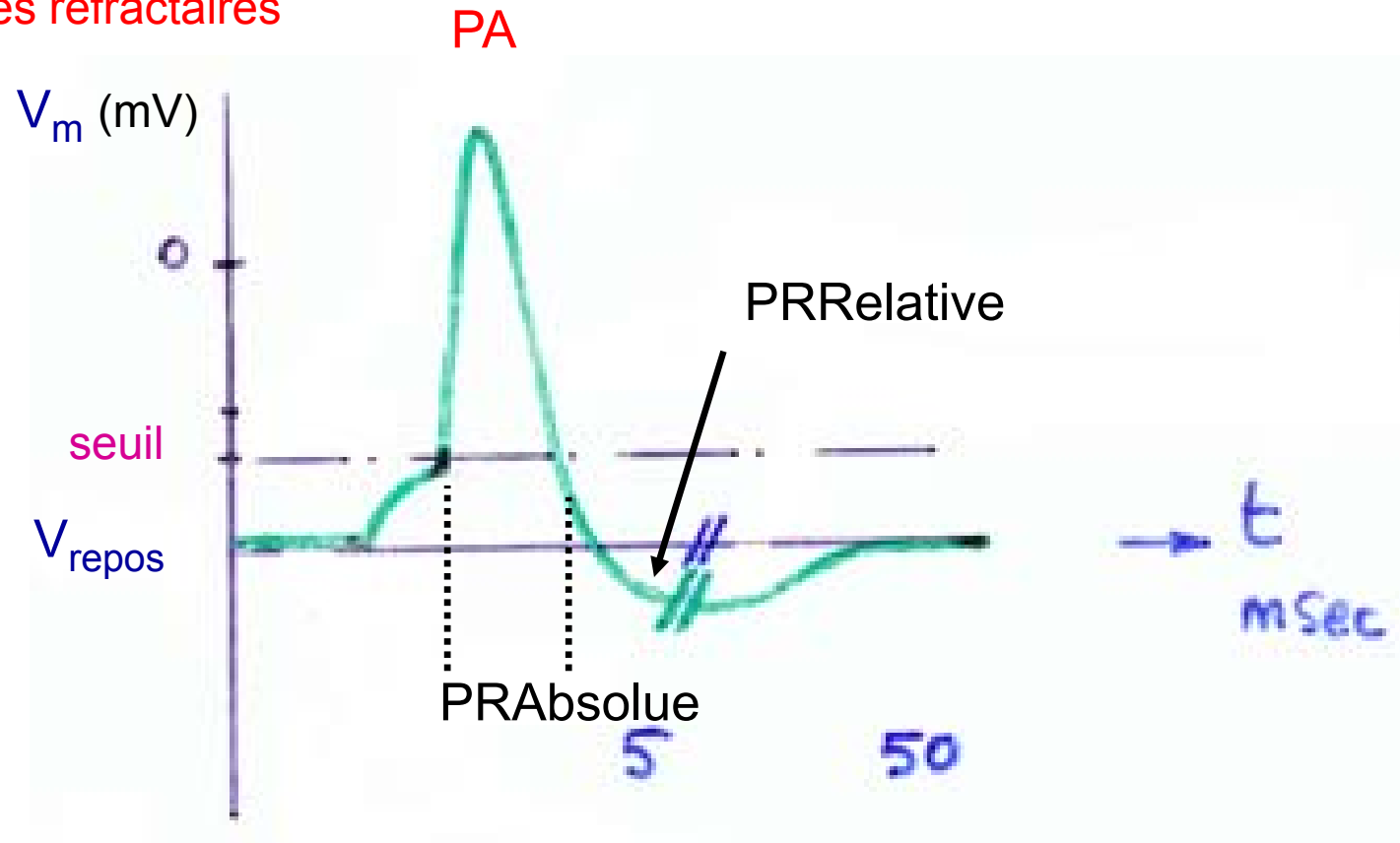
• propriétés passives : ⇒ propagation du courant électrique suit les lois du câble  
⇒ le potentiel est atténué dans l'espace → cte d'espace  $\lambda$

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.5. Potentiel d'action

#### 2.5.2. Cycle de l'excitabilité membranaire

##### 2.5.2.2. Périodes réfractaires



PRA: intervalle pendant lequel l'**inexcitabilité est totale**, quel que soit l'intensité de stim.

durée = [1,3] msec

→ les **canaux Na voltage-dépendants** sont déjà ouverts ou bien fermés+inactivables

→ **fréquence limite** : PRA = 2 ms →  $f_{\text{limite}} = 500$  PA/seconde

PRR: → dès que des **canaux Na voltage-dépendants** sont fermés+activables

mais les **canaux K voltage-dépendants ouverts** ⇒  $V_m$  est hyperpolarisé

⇒ ↑ énergie de stimulation pour atteindre le seuil

⇒ **inexcitabilité partielle** durée = [2 , dizaines] ms

## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.5. Potentiel d'action

#### 2.5.3. Propagation conservative du PA

##### 2.5.3.1. Dans les fibres nues

P. ACTION

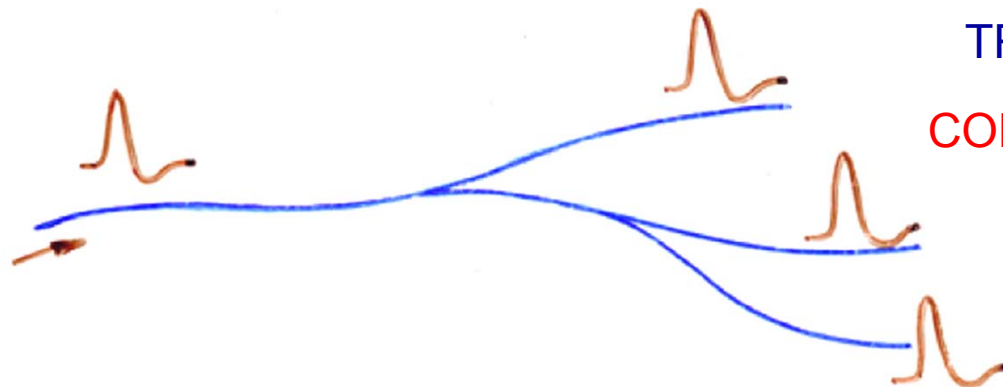
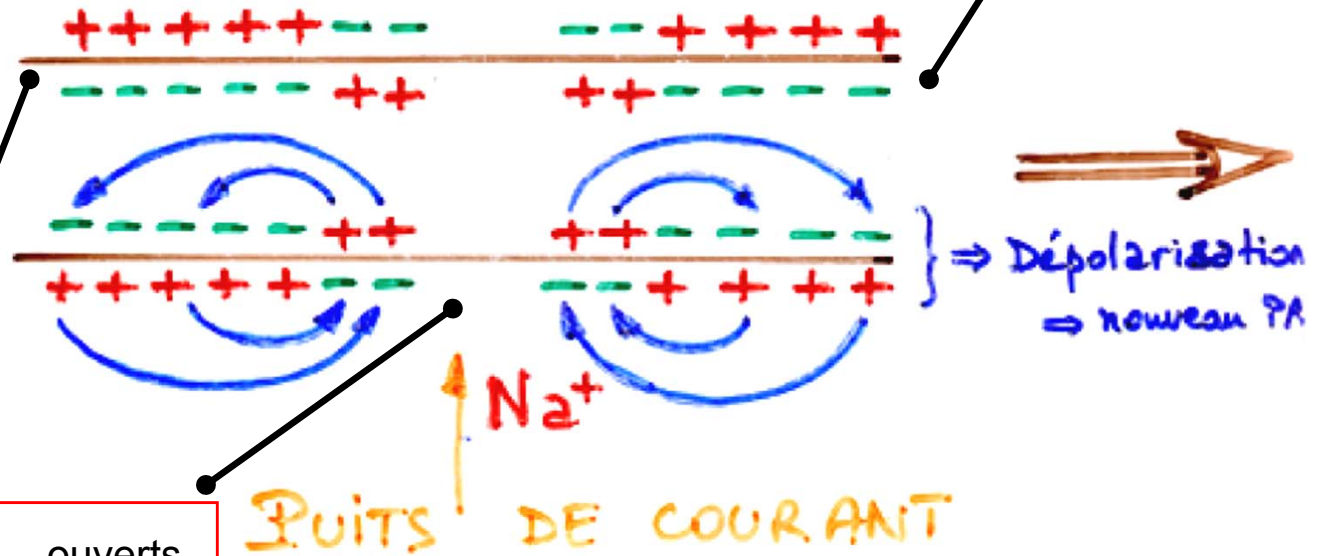
PROPAGATION NON DECREMENTIELLE

Une impulsion électrique se propage le long d'une membrane grâce à des COURANTS LOCAUX

ARRIERE = canaux  $Na_{(V)}$  fermés+inactivables  $\Rightarrow$  PRA

canaux  $Na_{(V)}$  ouverts

AVANT = canaux  $Na_{(V)}$  fermés+activables



TRANSMISSION HI- FI DE L'INFORMATION

CONSERVATIVE: - SUR GRANDES DISTANCES  
- AUX EMBRANCHEMENTS

SPIKE = IMPULSION BINAIRE  
= [0] ou [1]

Remarque: si  $V_m < V_{seuil}$  la propagation électrique est décrémenteielle  $\leftarrow$  propriétés de câble

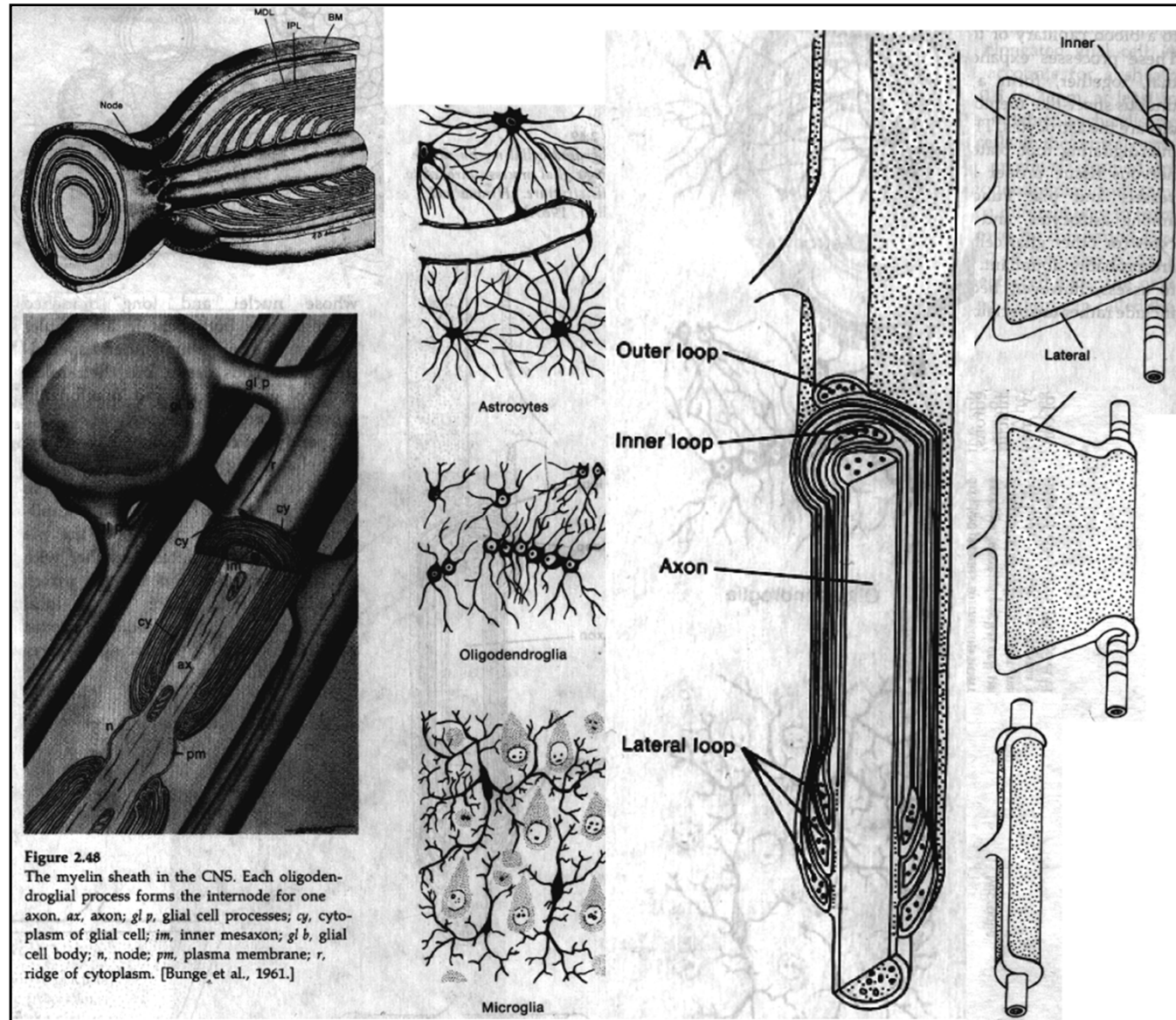


## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.5. Potentiel d'action

#### 2.5.3. Propagation conservative du PA

##### 2.5.3.2. Dans les fibres myélinisées

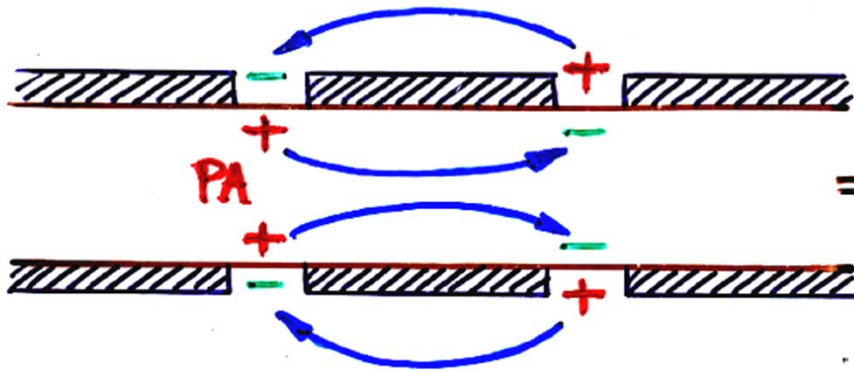


## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.5. Potentiel d'action

#### 2.5.3. Propagation conservative du PA

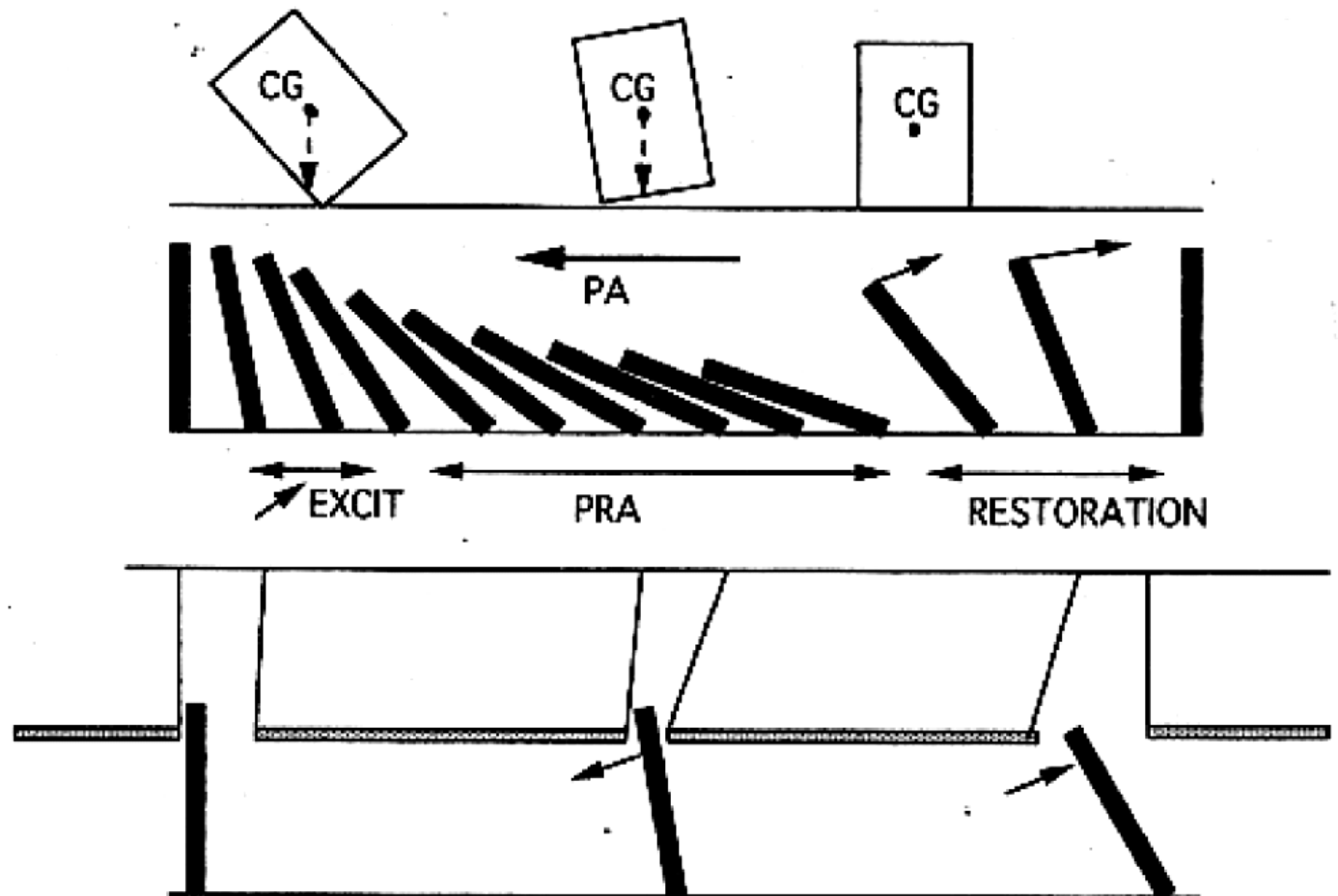
##### 2.5.3.2. Dans les fibres myélinisées



Le PA saute d'un nœud à l'autre :

- ECONOMIE D'ENERGIE
- RAPIDITE DE PROPAGATION

Dans une fibre **MYELINISEE**:  
courants locaux ne sont possibles  
qu'au niveau des zones dénudées  
**NŒUDS DE RANVIER**



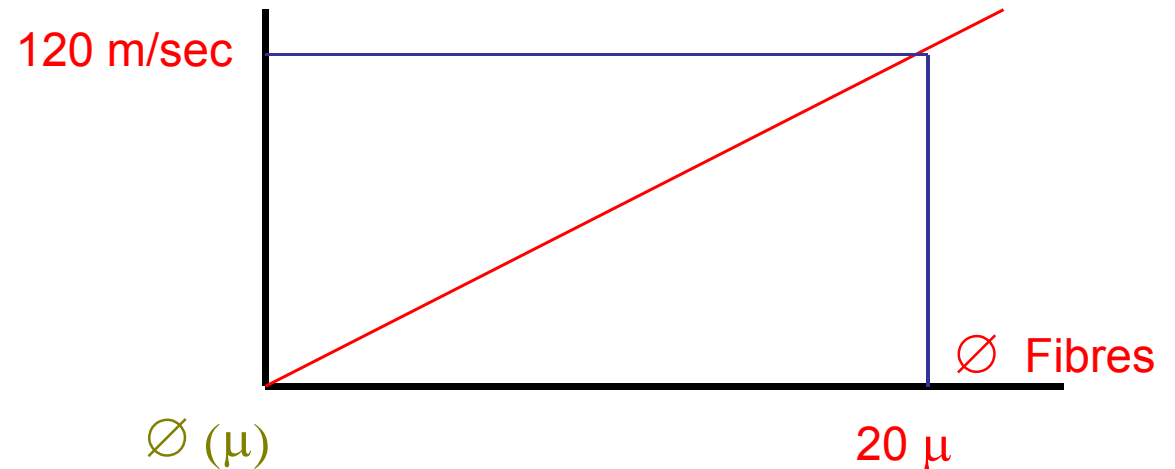
## 2. POTENTIEL DE MEMBRANE

### 2.5. Potentiel d'action

#### 2.5.3. Propagation conservative du PA

##### 2.5.3.3. Vitesse de conduction

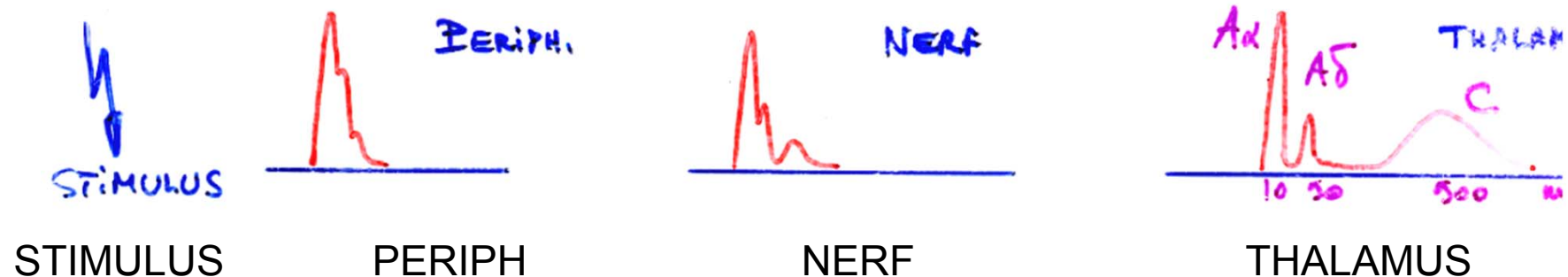
- AUGMENTE AVEC LE  $\rightarrow \emptyset$
- ACCRUE PAR LA MYELINISATION



TYPE	VITESSE	Ø (µ)
A α	70-120	12-20
A δ	12-30	2-5
C	0,6-2,2	0,3-1,4

Dans un NERF, fibres de  $\neq \emptyset$

$\Rightarrow$  Les INFORMATIONS véhiculées par les fibres d'un même nerf et correspondant à un même stimulus arriveront au CERVEAU à des moments différents: (ex : Tact et Douleur).





# Mentions légales

L'ensemble de ce document relève des législations française et internationale sur le droit d'auteur et la propriété intellectuelle. Tous les droits de reproduction de tout ou partie sont réservés pour les textes ainsi que pour l'ensemble des documents iconographiques, photographiques, vidéos et sonores.

Ce document est interdit 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 I.

L'utilisation de ce document est strictement réservée à l'usage privé des étudiants inscrits en Première Année Commune des Etudes de Santé (PACES) à l'Université Joseph Fourier (UJF) Grenoble I, et non destinée à une utilisation collective, gratuite ou payante.