

UE3-1 : Biophysique

Chapitre 2 : **Potentiel de membrane**

Pr. François ESTEVE, Pr. Alessandro VILLA

Année universitaire 2014/2015

Université Joseph Fourier (UJF) Grenoble I - Tous droits réservés

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. Sommatation

2.5. Potentiel d'action

2.5.1. Courants ioniques

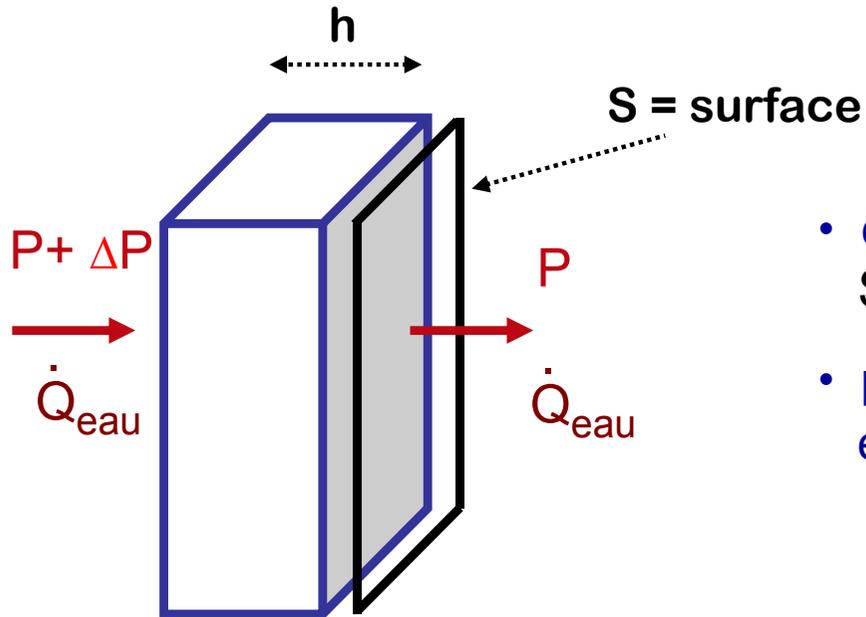
2.5.2. Cycle de l'excitabilité membranaire

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}_{eau} il faut exercer une pression supplémentaire ΔP

Loi de DARCY (1856)

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

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

ΔP = pression [Pascal]

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

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

ζ : 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 / volume

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

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

\Rightarrow

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

T cte $\rightarrow d_{\text{eau}} = \text{Cte.}$

\Rightarrow

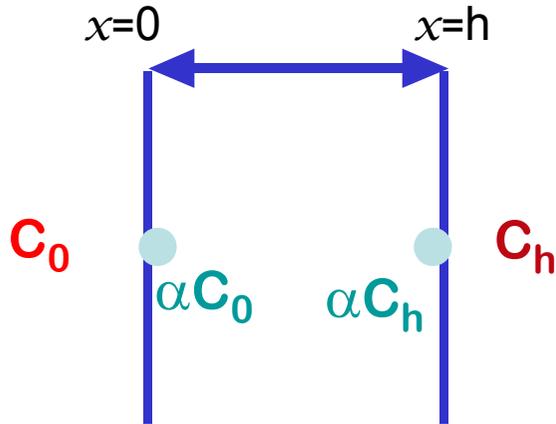
$$\frac{J_{\text{eau}}}{d_{\text{eau}}} = L \frac{\Delta P}{h} = P_{\text{eau}} \quad [\text{m.s}^{-1}] \quad (3)$$

Perméabilité membranaire de l'eau P_{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 $\Delta C = C_0 - C_h$

• α = 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⁻¹]

(4)

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

$$P = D \alpha / h$$

(5)

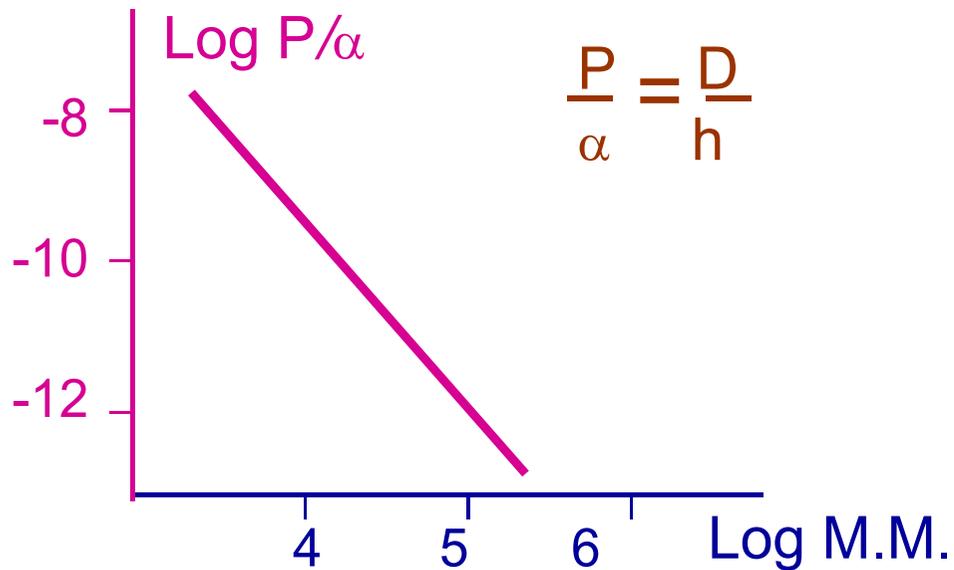
2. POTENTIEL DE MEMBRANE

2.1. Perméabilité membranaire

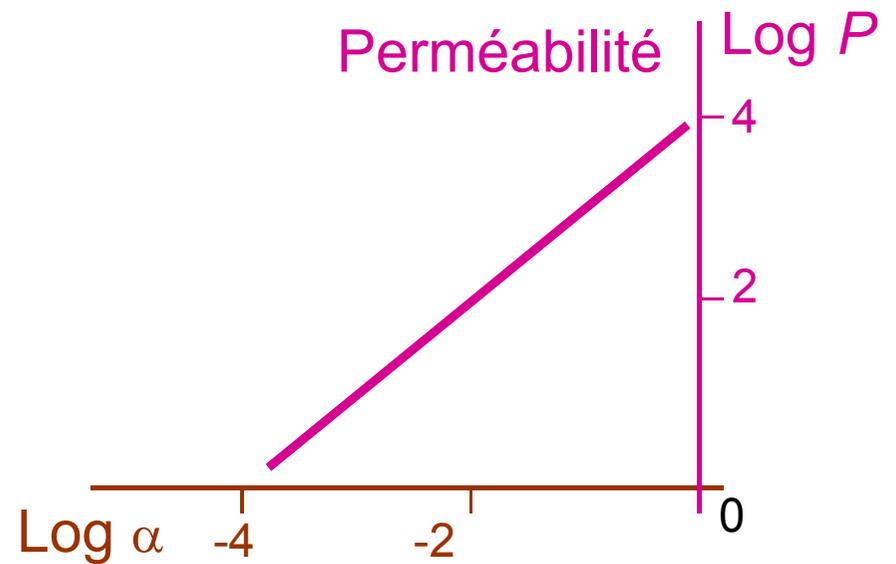
2.1.2. Solutés

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



α = coefficient de partage huile/eau
(\propto sol. membranaire)

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 ⁻¹]
H ₂ O	300 ms	10 ⁻⁵
Cl ⁻	3 jours	
Na ⁺ , K ⁺	1 an	
urée		3·10 ⁻⁹
Glucose	30 min	10 ⁻⁹

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.)

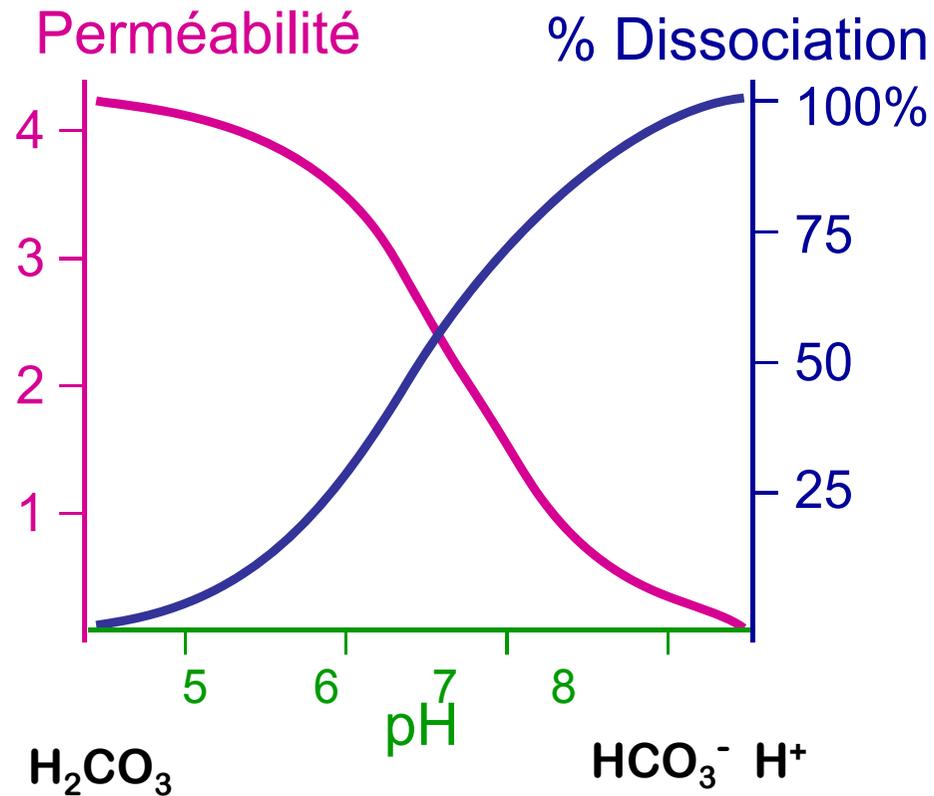
La perméabilité à l'eau ← f() physiologique: hormone antidiurétique (ADH) ⇒ perméabilité ↑

2. POTENTIEL DE MEMBRANE

2.1. Perméabilité membranaire

2.1.3. Effet de la dissociation

Exemple de soluté ionisable: H_2CO_3



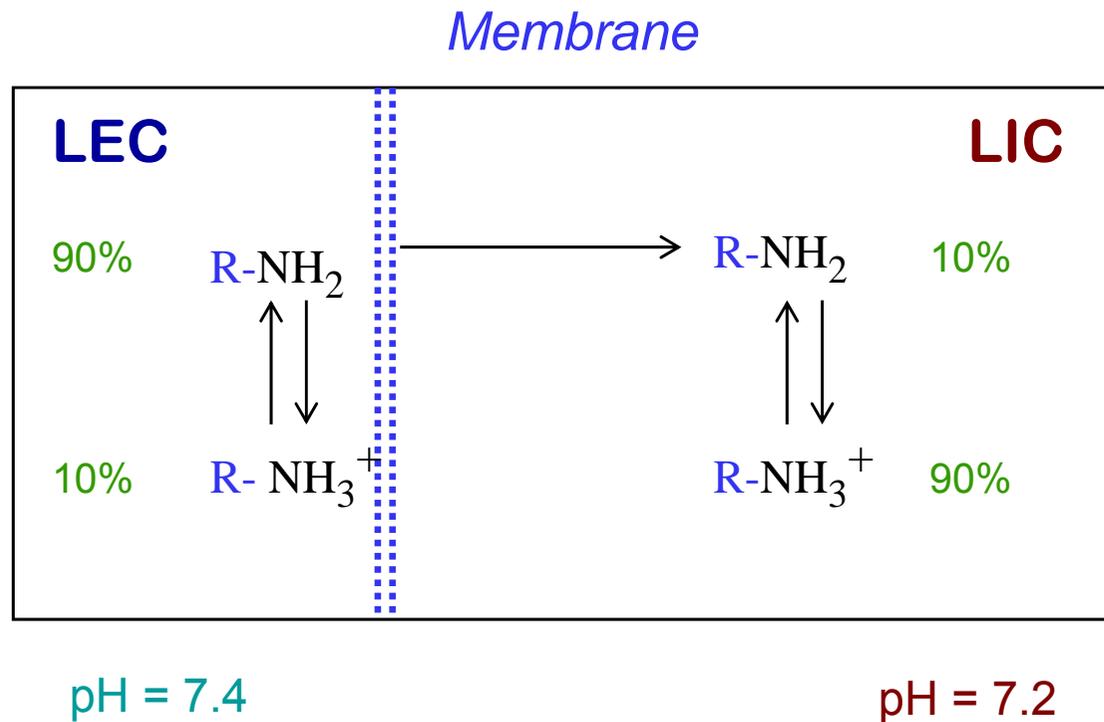
ionisation (\propto dissociation) \uparrow
 \Rightarrow perméabilité \downarrow

2. POTENTIEL DE MEMBRANE

2.1. Perméabilité membranaire

2.1.3. Effet de la dissociation

Exemple: médicament $R-NH_2$



médicament basique $R-NH_2$ dont le $pK_b = 7.3$

2. POTENTIEL DE MEMBRANE

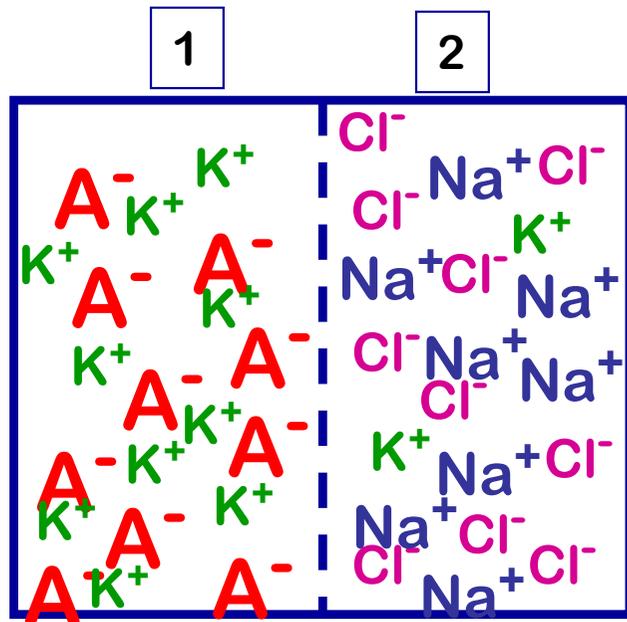
2.2. Equation de GOLDMANN

2.2.1. Electroneutralité

2.2.1.1. Principe général

Les conditions:

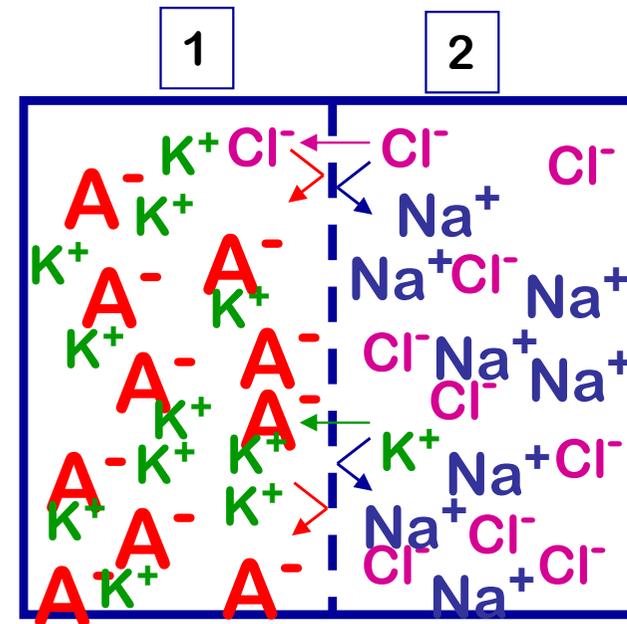
- une solution ionique avec des ions diffusibles,
MAJORITE DES CHARGES NON DIFFUSIBLES
- une membrane partiellement perméable



0 0

Etat initial

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



≈0 ≈0

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

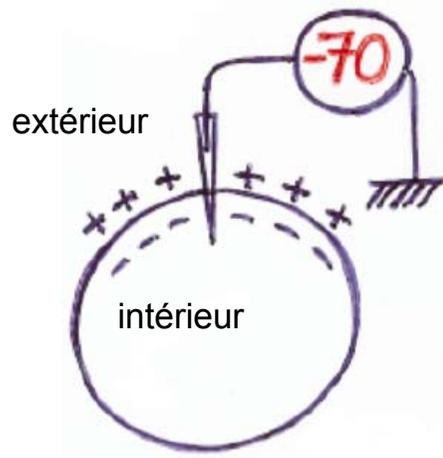
i : INTERIEUR négatif (protéines, groupements COO⁻)

e : EXTERIEUR positif (ions positifs, sodium Na⁺)

⇒ □ **POLARISATION**

Différence de potentiel exprimée en millivolts [mV]

Potentiel de repos transmembranaire (=pot. de membrane) est souvent ≈ -70 mV



CELLULES EXCITABLES

- musculaires

grenouille -82 à -100 [mV]

rat -100

- nerveuses

cervelet 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 [m²]

C_s = capacité spécifique membranaire [F/m²]

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

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

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

\Rightarrow

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

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

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

Etat final

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

Volumes des deux compartiments identiques:

⇒ osmolalité: 400 mOsm 200 mOsm

Il faut considérer le flux d'H₂O ⇒ **PRESSION OSMOTIQUE** importante !!!

VRAI état final
si la membrane n'est pas rigide

1		2
[Cl ⁻] = 0.05		[Cl ⁻] = 0.10
[K ⁺] = 0.20		[K ⁺] = 0.10
[A ⁻] = 0.15		
	H ₂ O ←	→ H ₂ O

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

- Na^+ et K^+ caractérisés par leur perméabilités membranaires respectives P_{Na} et P_{K}
- Na^+ et 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
 α = 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 "dyalisante" \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 [°K]

37°C = 310°K

R = Cte. des gaz parfaits = 8.314 [J.°K⁻¹.mol⁻¹]

[J] = [V·A·s]

N_A = nombre d'AVOGADRO = 6 · 10²³ [mol⁻¹]

q = charge de l'électron = 1.6 · 10⁻¹⁹ [C]

[C] = [A·s]

F = Cte. de FARADAY = N_Aq = 9.652 · 10⁴ [A·s·mol⁻¹]

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

P_{Na} = 1 P_K = 40 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

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

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

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

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 $f(\text{température})$ 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**:

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

T = température absolue [°K]

37°C = 310°K

R = Cte. des gaz parfaits = 8.314 [J.°K⁻¹.mol⁻¹]

[J] = [V·A·s]

F = Cte. de FARADAY = N_Aq = 9.652 · 10⁴ [A·s.mol⁻¹]

P_{Na} = 1 P_K = 40 P_{Cl} = 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_{ion} (Nernst)	E_m	$E_m - E_{\text{ion}}$
	intra	extra				
K^+	150	5.5	+144.5	- 88.3	- 70.5	+17.8
Na^+	15	150	-135	+72.3		- 142.8
Cl^-	9	125	-116	- 70.2		- 0.3

1ère Loi de Fick
 $J = -D (dC/dx)$

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

ION	GRADIENT CHIMIQUE	GRADIENT ELECTRIQUE
K^+	→ EXT	INT ←
Na^+	INT ←	INT ←
Cl^-	INT ←	→ EXT

2. POTENTIEL DE MEMBRANE

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

2.3.1. Flux ioniques

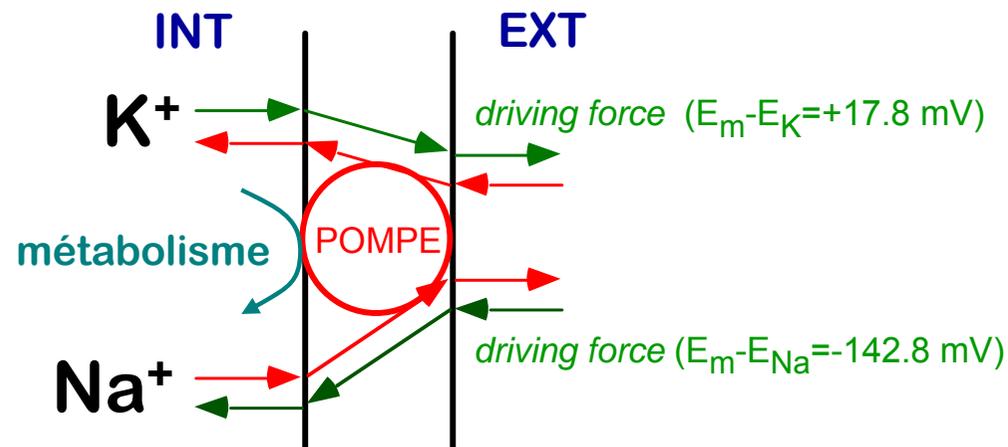
2.3.1.2. Pompe ionique Na-K

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

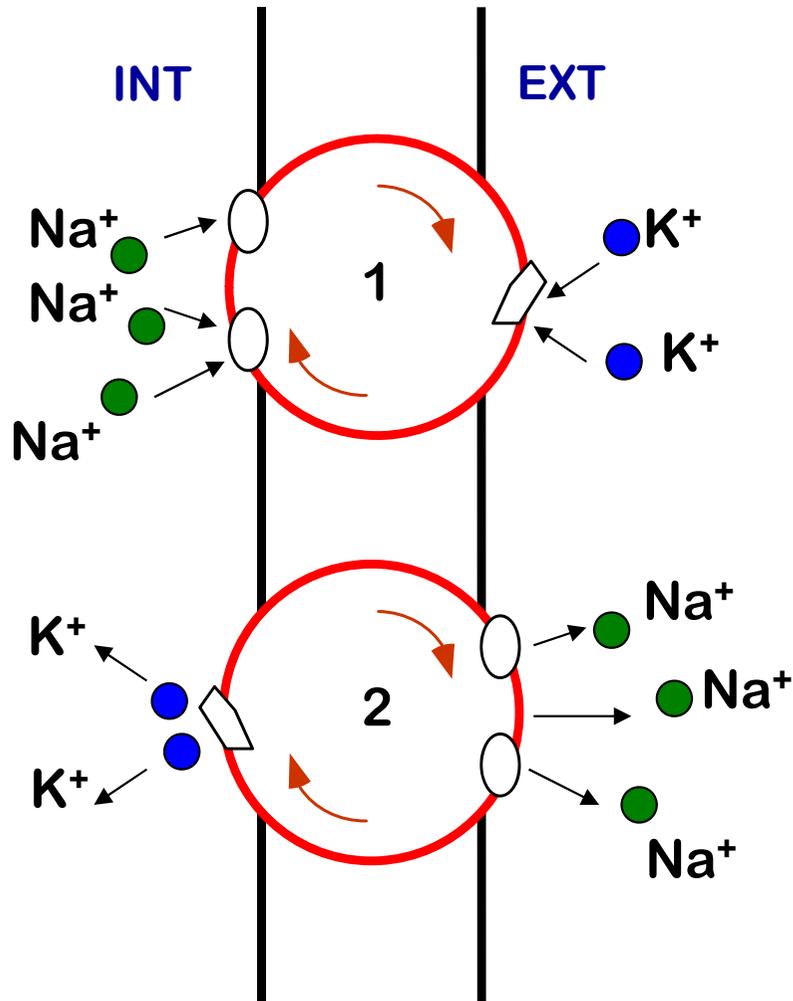
$E_L \Rightarrow$ courant de fuite ("Leakage") qui correspond généralement au flux de Cl^- et autres molécules
(!! perméabilité très élevée)

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)

- consommation 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 $[K^+]$

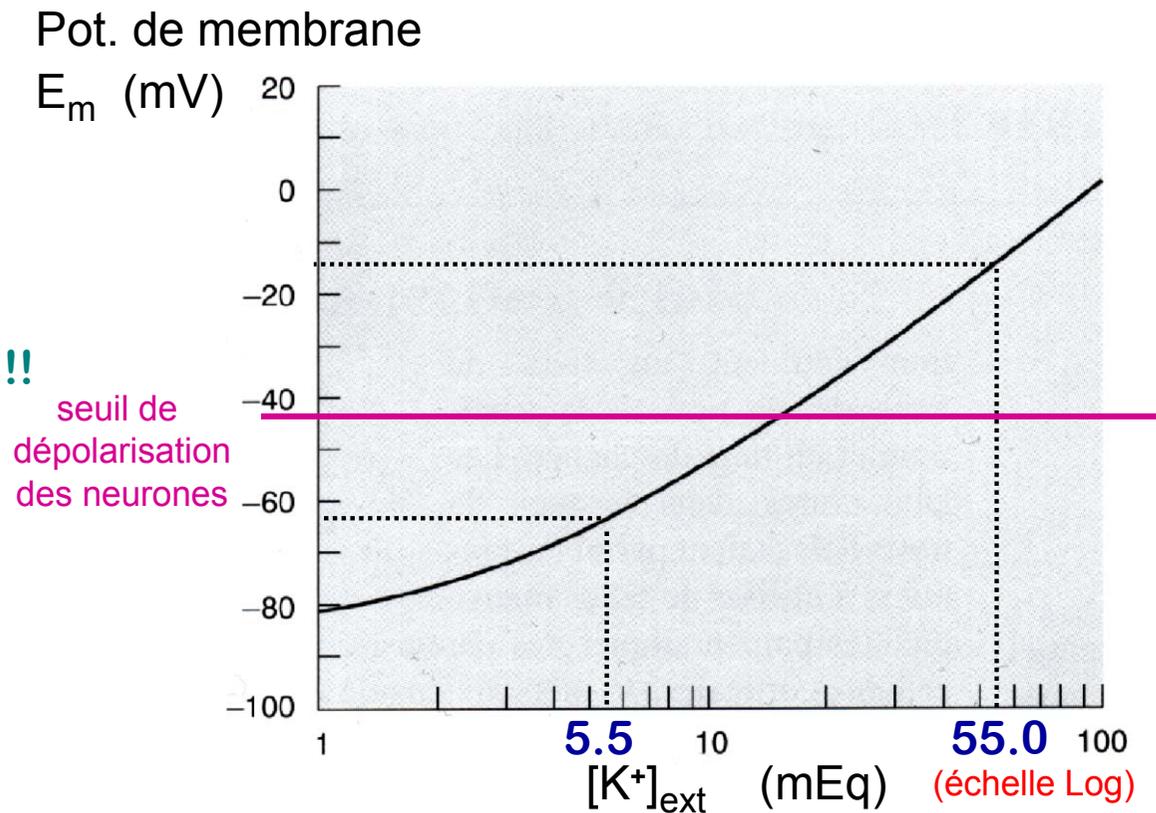
K^+ , Cl^- : haute perméabilité des canaux \Rightarrow atteindre \approx équilibre electro-chimique
 Na^+ : faible perméabilité des canaux

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

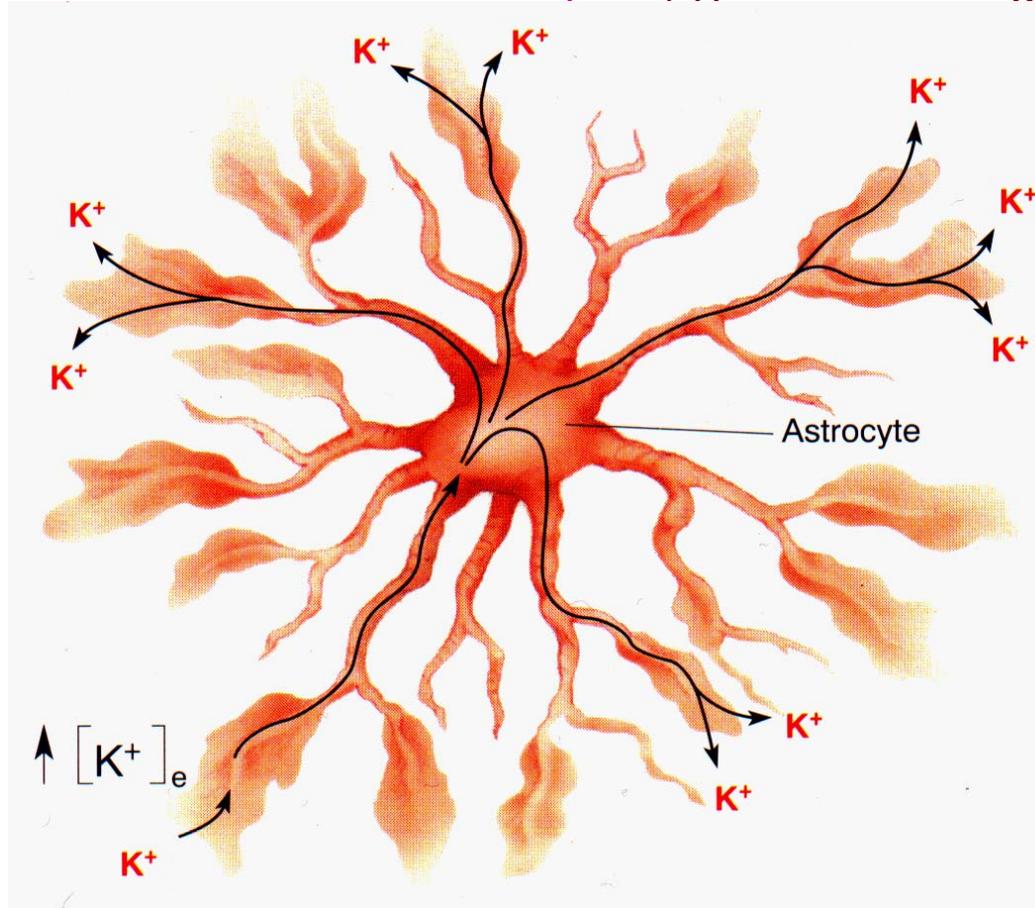
2.3. Théorie de HODGKIN, HUXLEY, KATZ (1952)

2.3.1. Flux ioniques

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

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

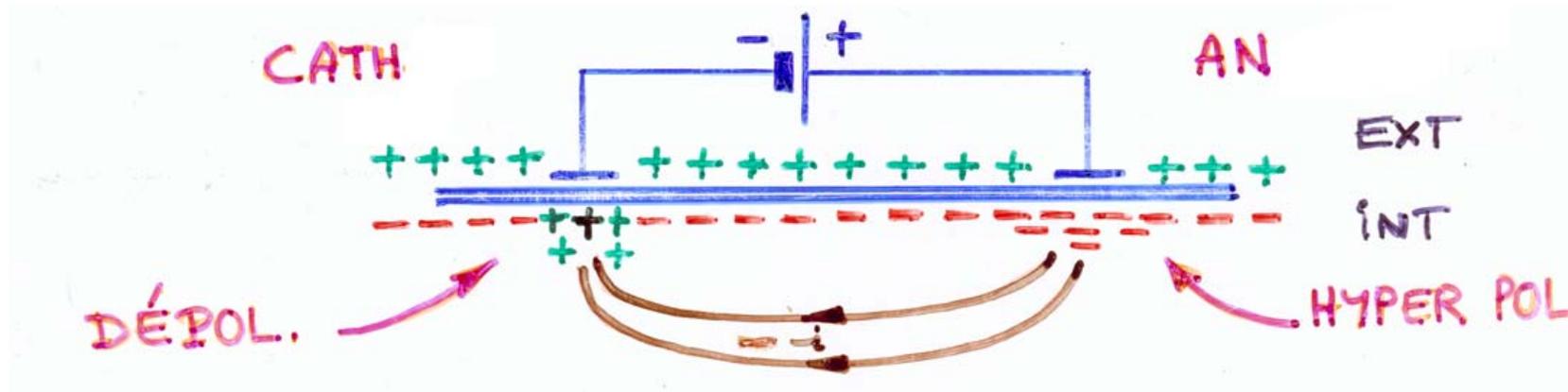
2.3. Théorie de HODGKIN, HUXLEY, KATZ (1952)

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

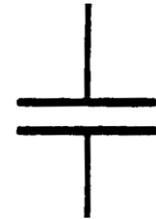
- UN ELEMENT DE MEMBRANE

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**

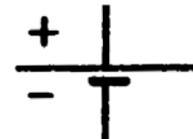
r_m = résistivité membranaire [$\Omega \cdot m$]



→ Potentiel d'équilibre
pile électrique

⇒ **POTENTIEL DE REPOS**

V_m = potentiel de membrane [V]



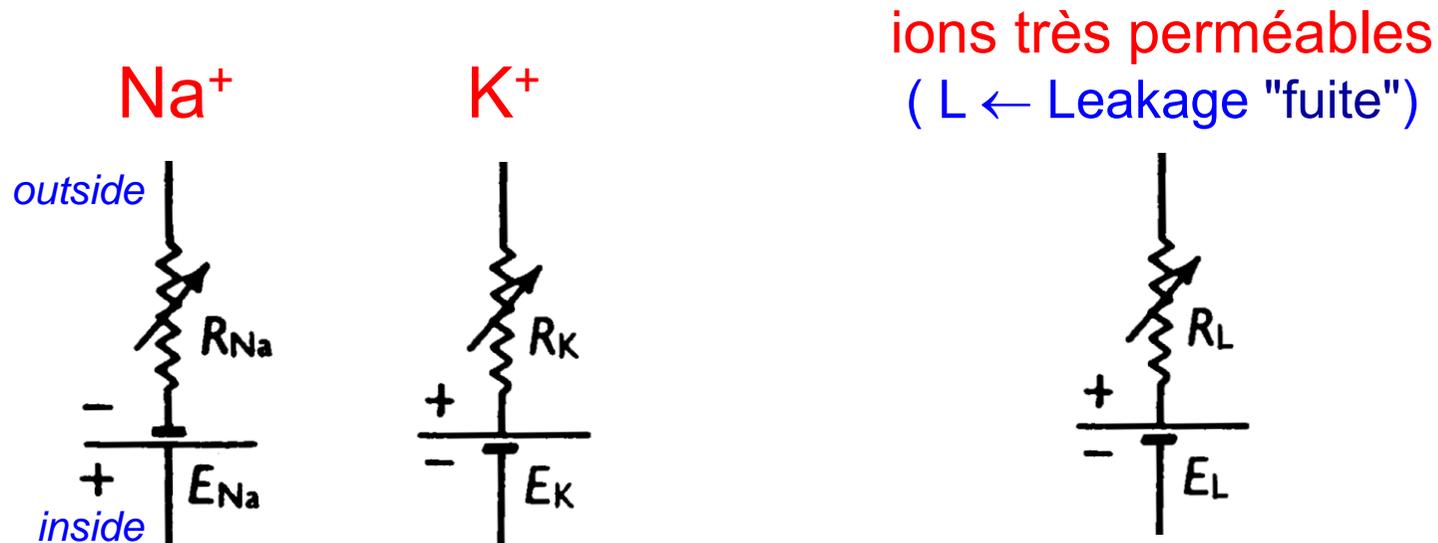
2. POTENTIEL DE MEMBRANE

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)

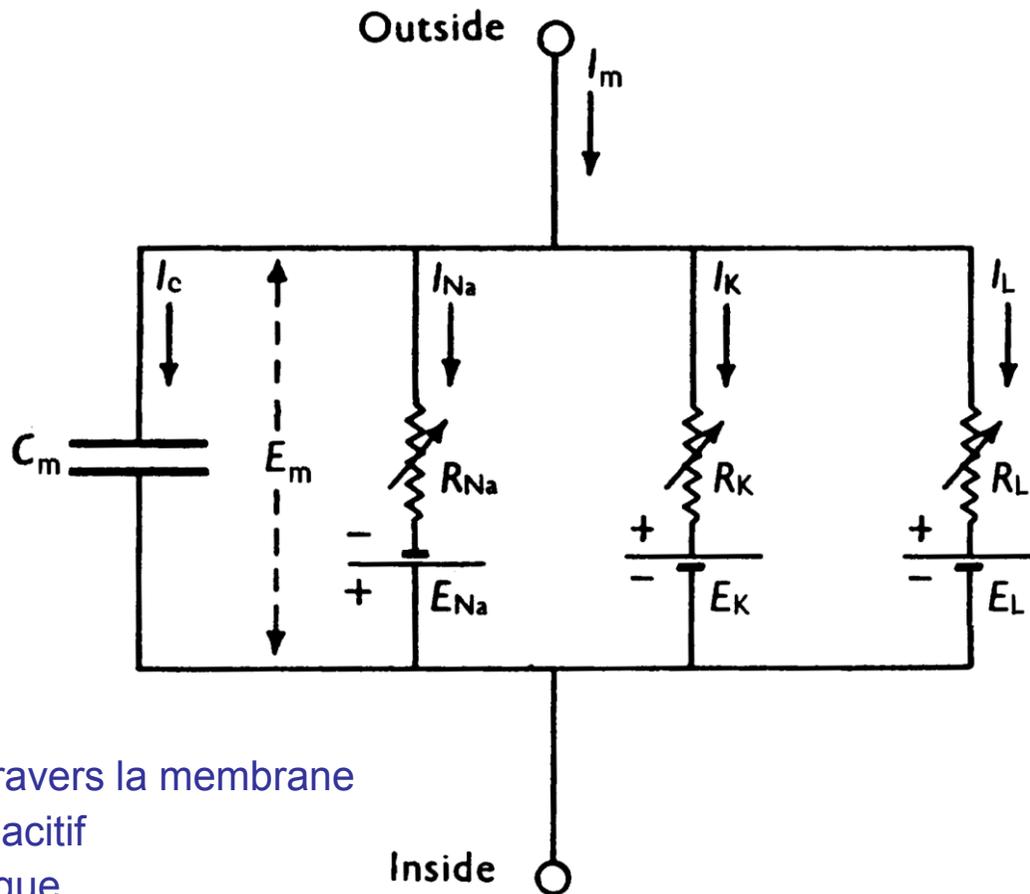
2. POTENTIEL DE MEMBRANE

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

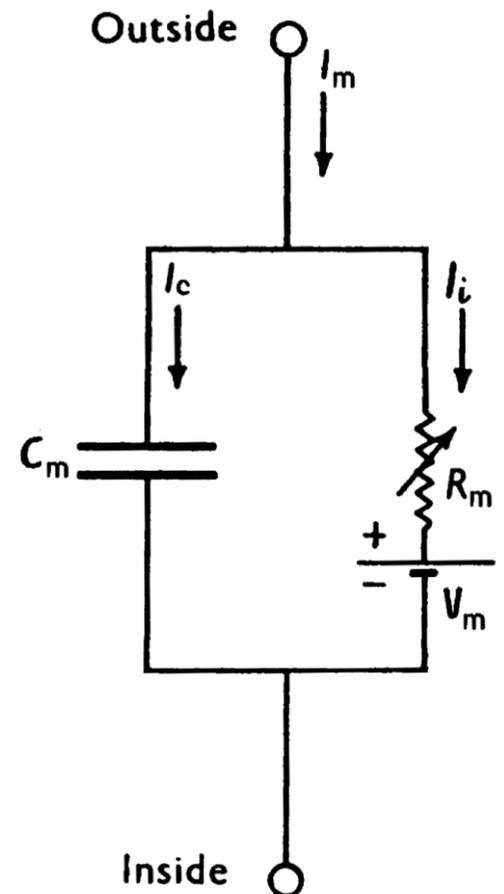
2.3.2. Modèle électrique de la membrane

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)

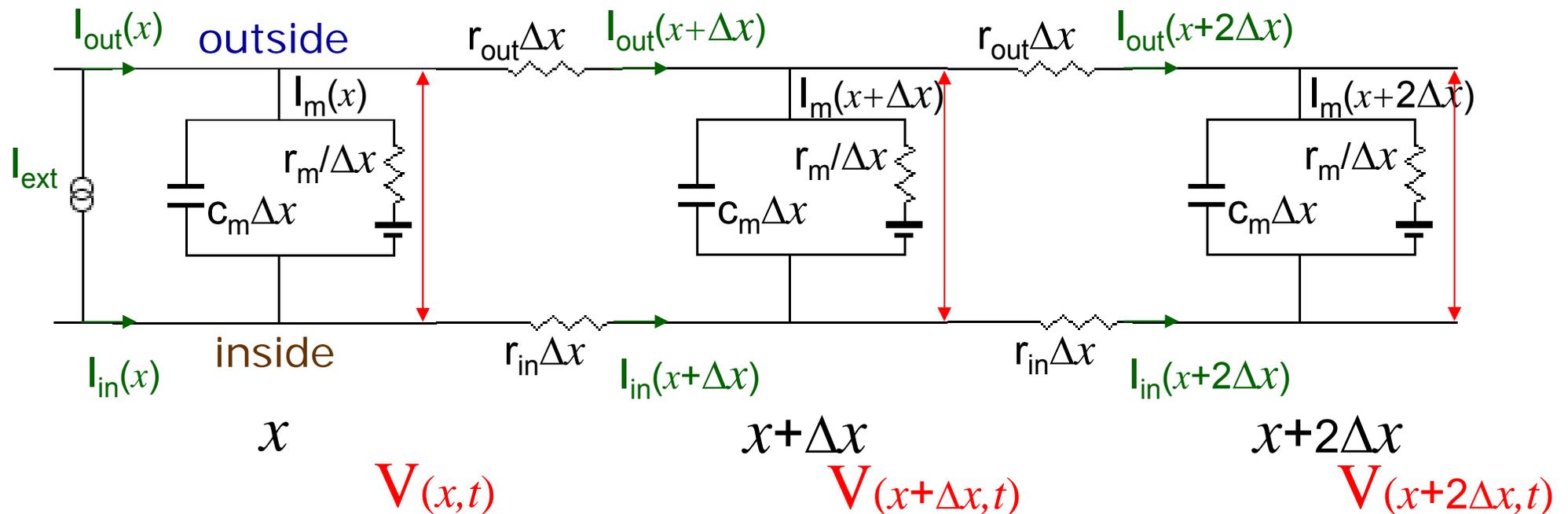
2.3.3. Variations du potentiel de membrane

membrane \approx câble électrique



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

électrotonus



Δx = 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

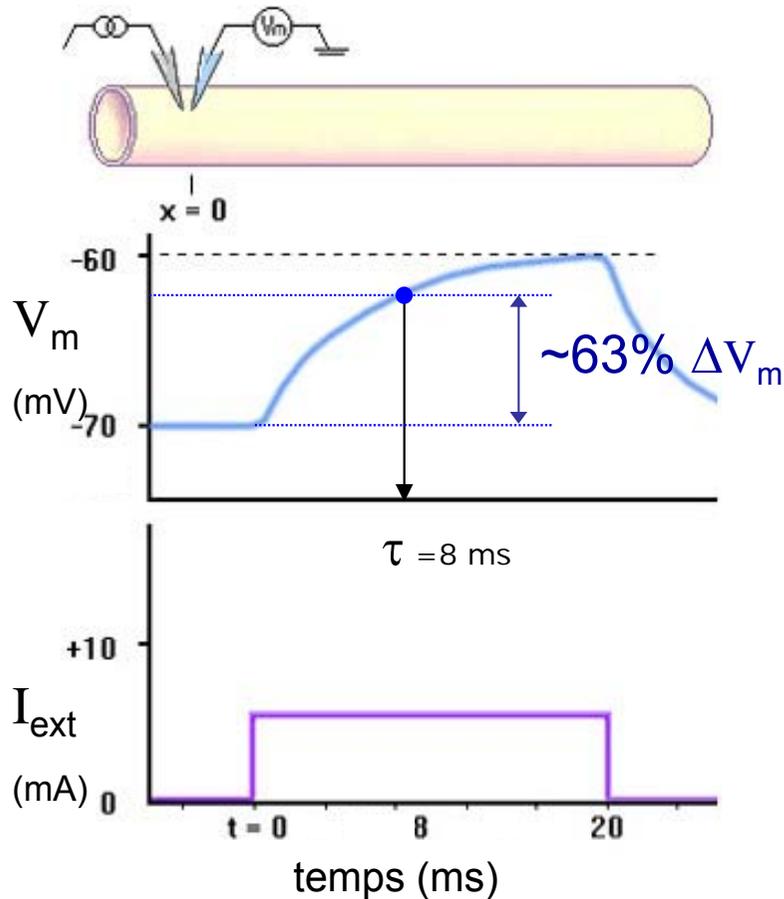
2.3. Théorie de HODGKIN, HUXLEY, KATZ (1952)

2.3.3. Variations du potentiel de membrane

2.3.3.1. Constante de temps

variation du potentiel au cours du temps

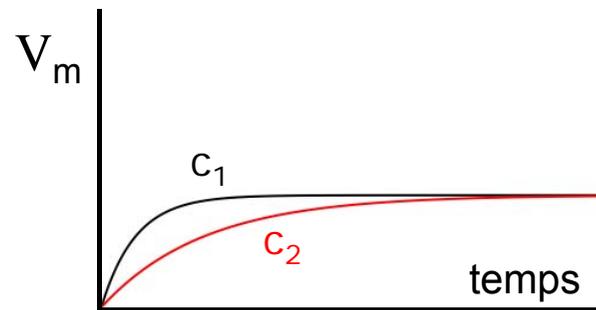
τ : constante de temps



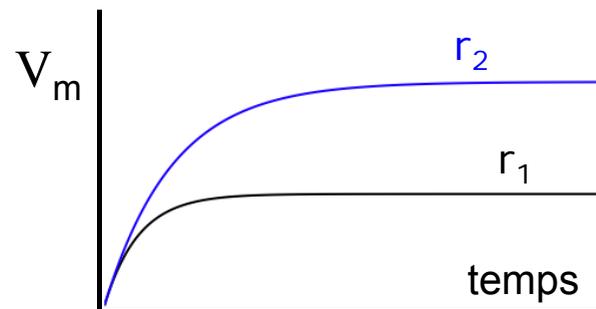
$$\Delta V_m(t) = I_m R_m (1 - e^{-t/\tau})$$

$$\tau = r_m c_m$$

(par ex. de 1 à 20 ms)



$$\begin{aligned} c_2 &> c_1 \\ r_1 &= \text{constante} \\ \Rightarrow \Delta V_2 &= \Delta V_1 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} r_2 &> r_1 \\ c_1 &= \text{constante} \\ \Rightarrow \Delta V_2 &> \Delta V_1 !! \end{aligned}$$

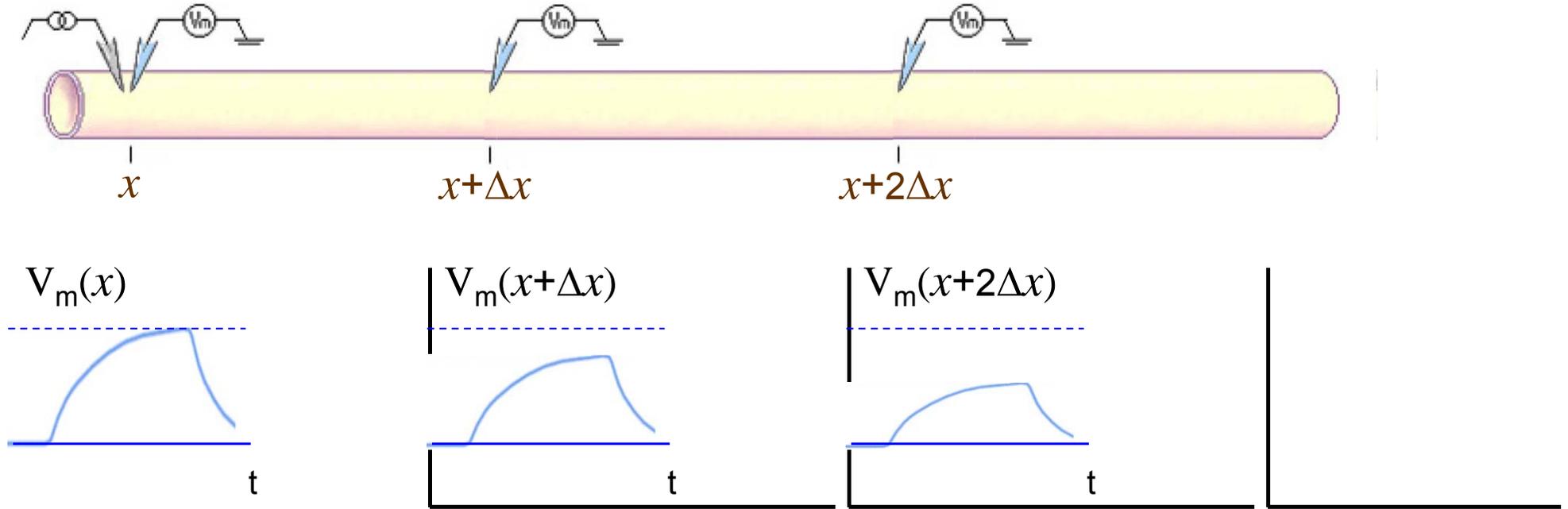
Circuit RC : propriétés capacitives \Rightarrow constante de temps

2. POTENTIEL DE MEMBRANE

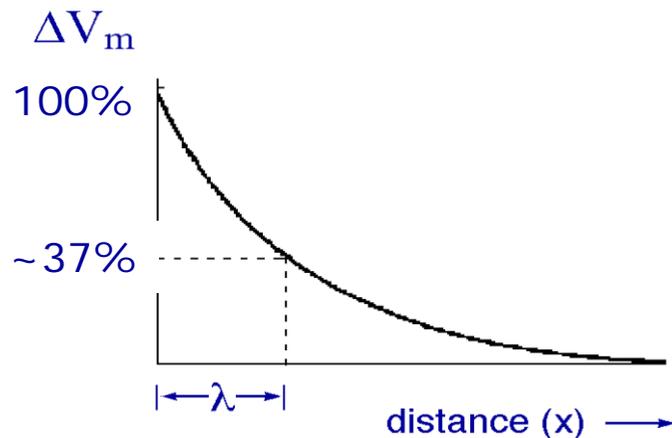
2.3. Théorie de HODGKIN, HUXLEY, KATZ (1952)

2.3.3. Variations du potentiel de membrane

2.3.3.2. Constante d'espace



Atténuation passive le long de la membrane → propriétés de câble électrique



variation du potentiel dans l'espace

λ : constante d'espace

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

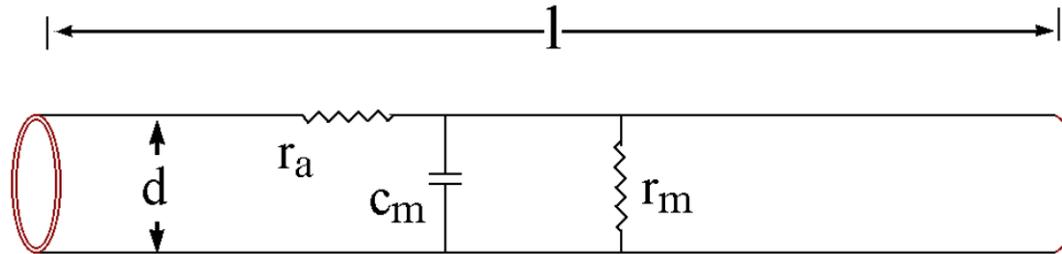
2. POTENTIEL DE MEMBRANE

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 [Ω]

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

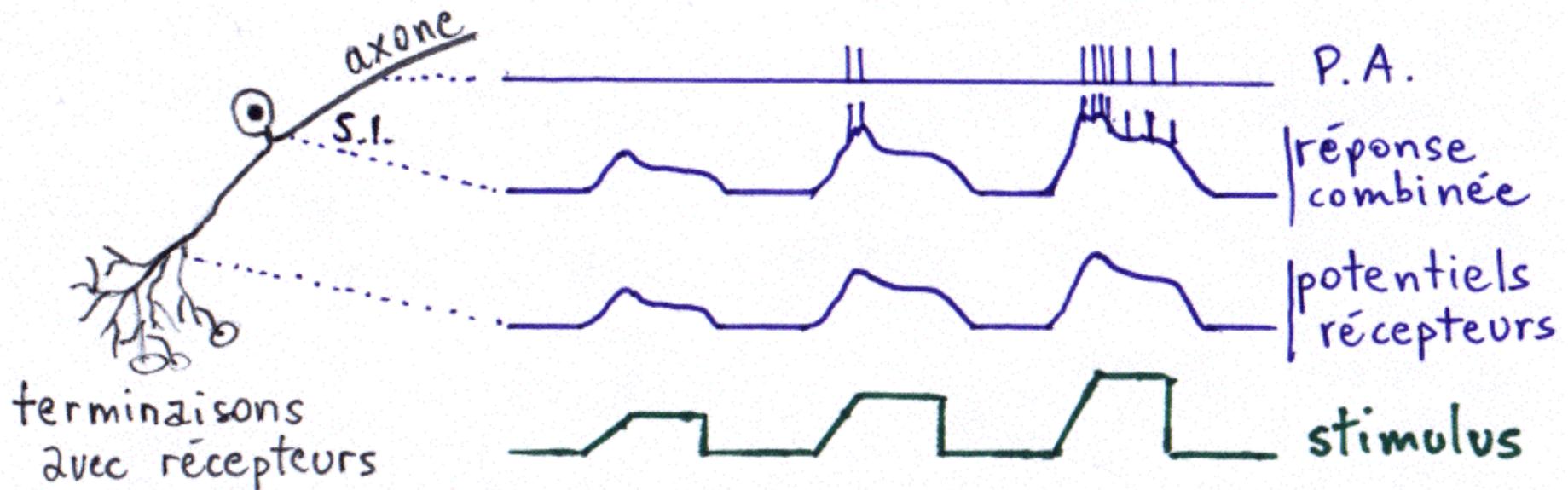
2. POTENTIEL DE MEMBRANE

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

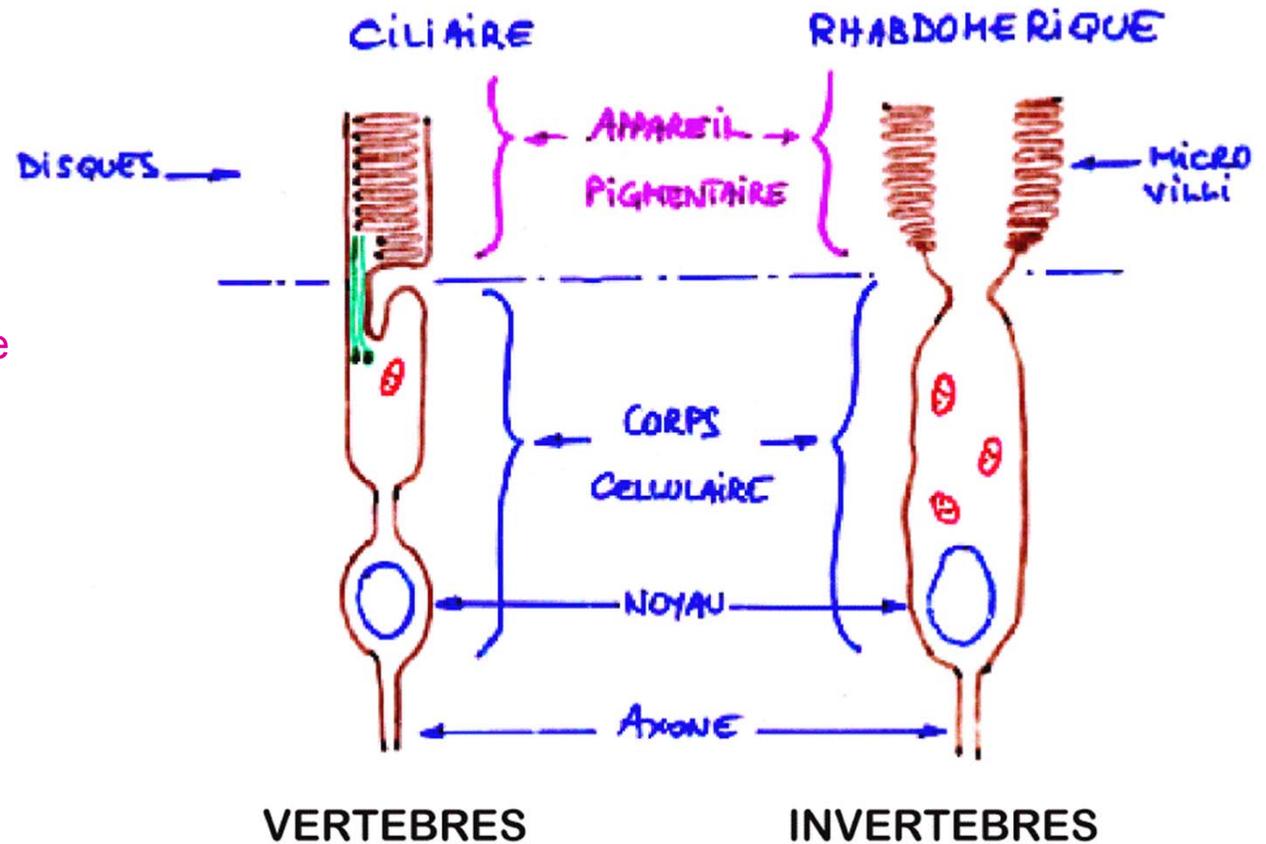
2.4.2.4. Photoréception

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

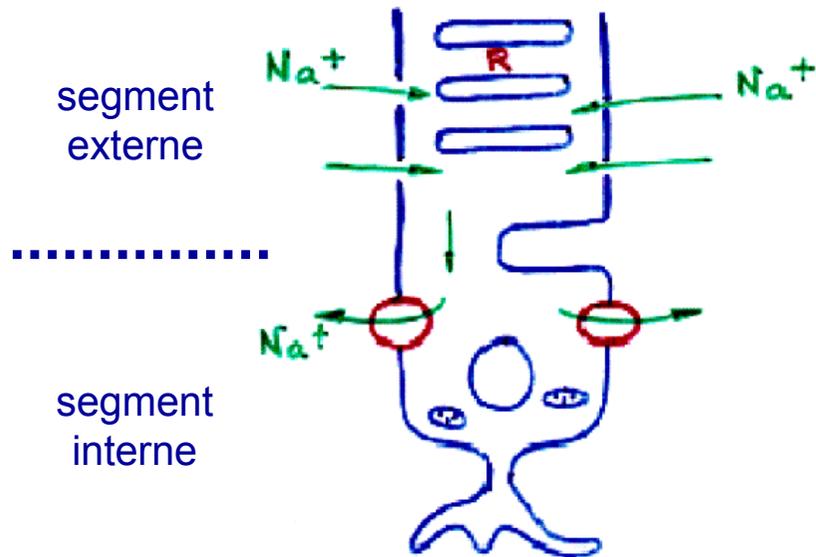
Ex. RHODOPSINE (P.M. 38000) (il y en a 10^9 par BATONNET)

2. POTENTIEL DE MEMBRANE

2.4. Transduction

2.4.2. Transduction sensorielle

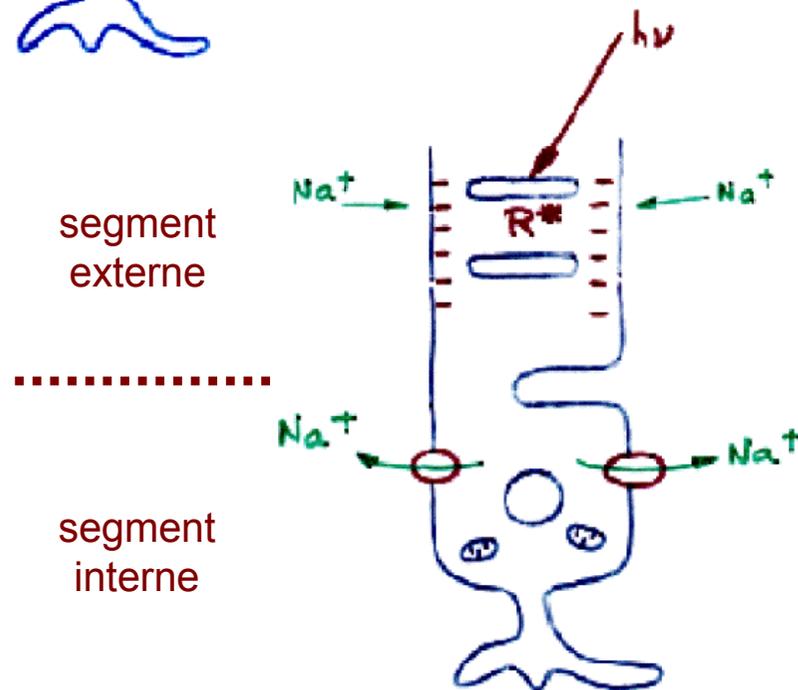
2.4.2.4. Photoréception



OBSCURITE

mb. plasmique très perméable au Na^+

Na-K ATPase expulse Na^+



LUMIERE

Amplification biochimique:

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

perméabilité au Na^+ devient nulle

⇒ hyperpolarisation du segment externe...

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

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

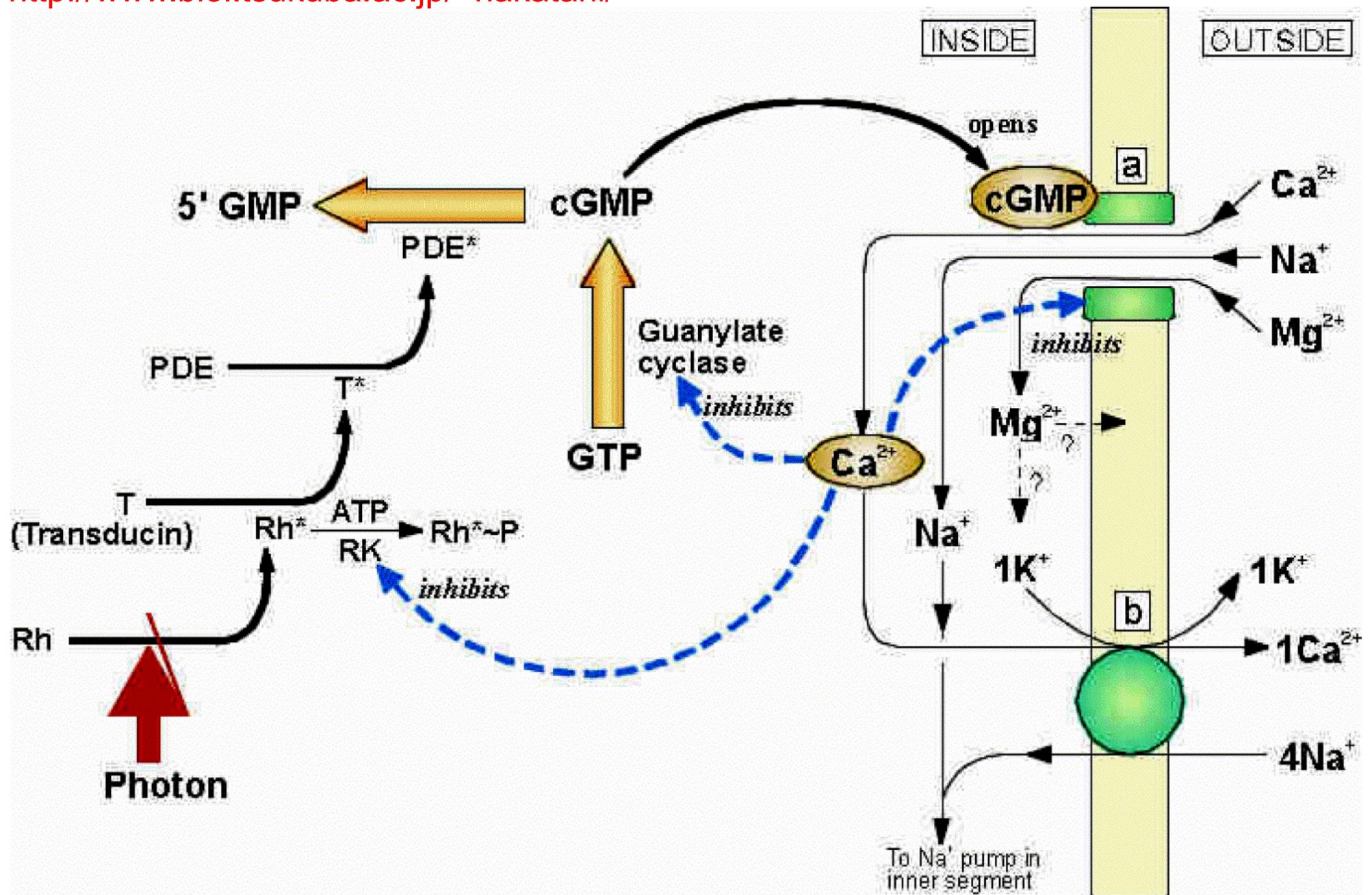
- nécessaire à l'ouverture des canaux Na^+ .
- Hydrolyse GMPc \Rightarrow fermeture des canaux \Rightarrow hyperpolarisation de la mb. plasmique \Rightarrow Pot. Récepteur

(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



a: cGMP-gated channel, b: Na⁺-Ca²⁺/K⁺ exchanger, Rh: rhodopsin, Rh*: activated rhodopsin, T: transducin(G-protein), T*: activated transducin, PDE: phosphodiesterase, PDE*: activated phosphodiesterase.

2. POTENTIEL DE MEMBRANE

2.4. Transduction

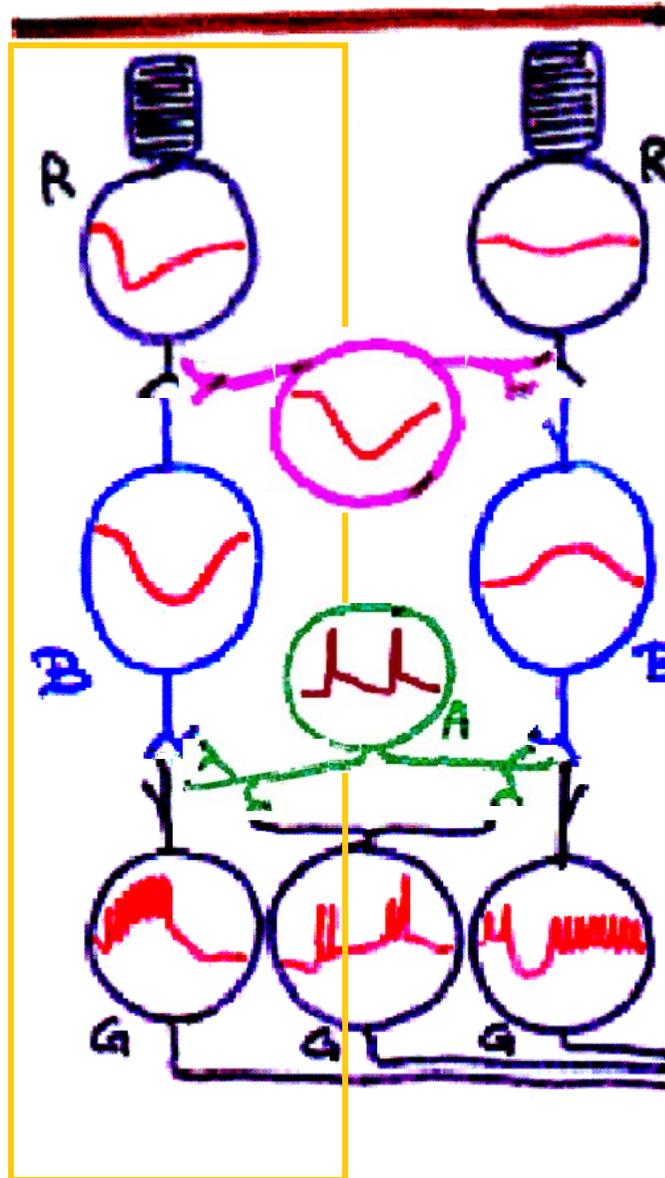
2.4.2. Transduction sensorielle

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

→ Na^+ → dépolarisation = EXCITATION

→ 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

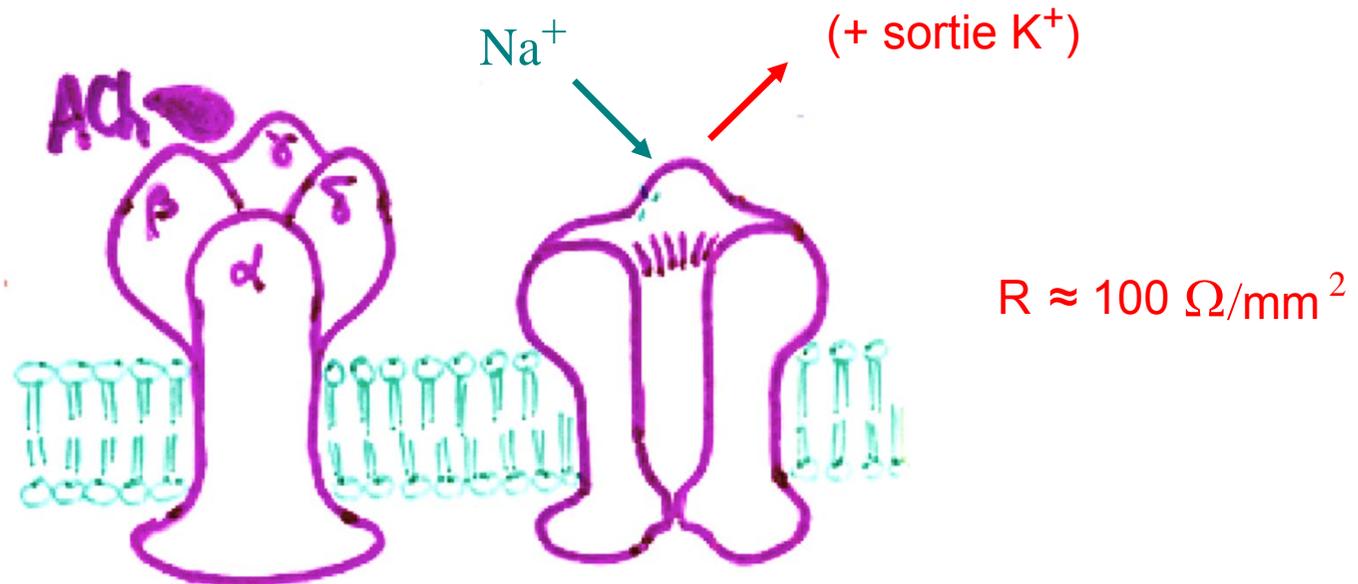
→ 4 sous-unités différentes (= 5 PR car 1 sous-unité répétée 2 fois)
s'associent pour former 1 canal ex. récepteur ACh : $\alpha_2\beta\gamma\delta$

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 μs)

entrée Na^+

→ dépolarisation

→ EXCITATION



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 Na^+ , K^+

→ NMDA : perméable à Na^+ , K^+ et 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 Cl^-

Récepteur GABA_A → perméable à 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

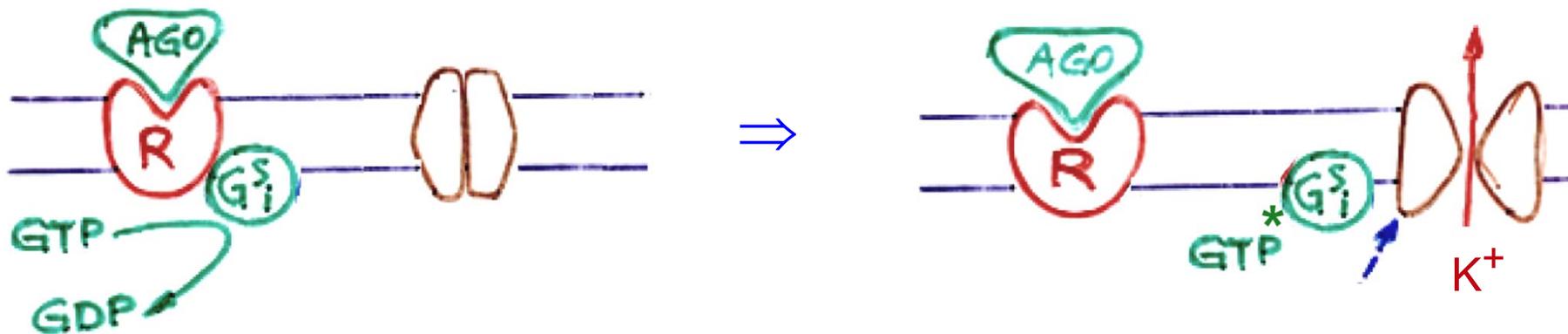
2.4.3. Transduction synaptique

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

voie "rapide"

\rightarrow 30-100 ms après fixation du transmetteur

Récepteur ACh (muscarinique) \rightarrow perméable à K^+

Récepteur GABA_B \rightarrow perméable à K^+

2. POTENTIEL DE MEMBRANE

2.4. Transduction

2.4.3. Transduction synaptique

2.4.3.3. Récepteurs couplés aux protéines G

B. SECOND MESSENGER

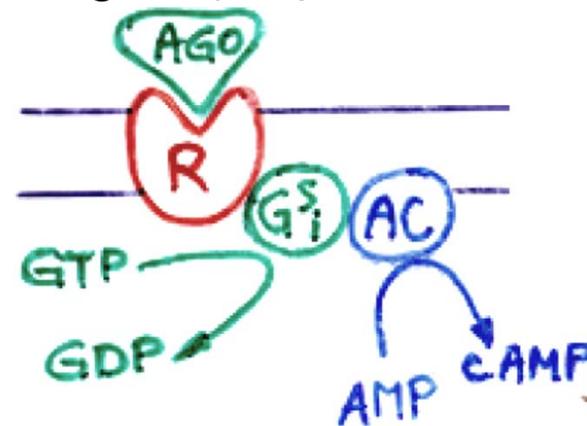
récepteur activé \Rightarrow activation protéine G
 \Rightarrow activation adényl cyclase
 $\Rightarrow \uparrow\downarrow [cAMP]_i$
 \Rightarrow cascade des seconds messagers (ex. protéine kinase)

AGO : agoniste

R : Récepteur

AC : Adényl Cyclase

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



voie "lente"

- minutes après fixation du transmetteur
- amplification de la réponse

EFFETS PHYSIOLOGIQUES

Récepteur NA β - adrénergique $\Rightarrow \uparrow$ activité Adénylcyclase $\Rightarrow \uparrow [cAMP]_i$

Récepteur NA α_2 - adrénergique $\Rightarrow \downarrow$ activité Adénylcyclase $\Rightarrow \downarrow [cAMP]_i$

2. POTENTIEL DE MEMBRANE

2.4. Transduction

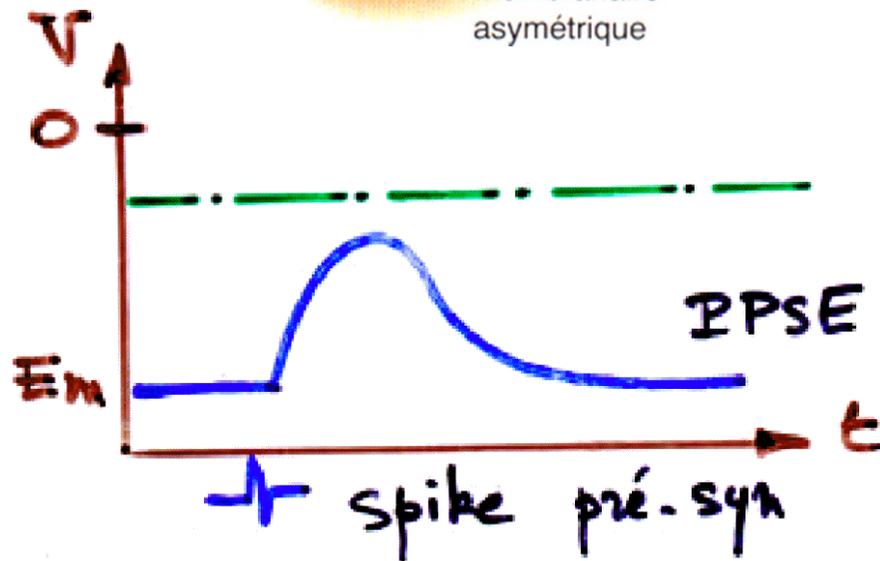
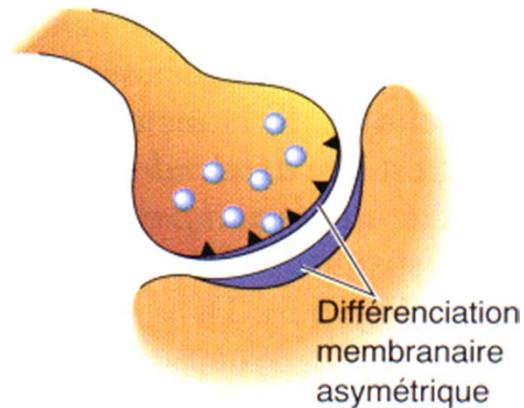
2.4.3. Transduction synaptique

2.4.3.4. Potentiel post-synaptique

A. Potentiel post-synaptique excitateur (PPSE)

Synapses excitatrices

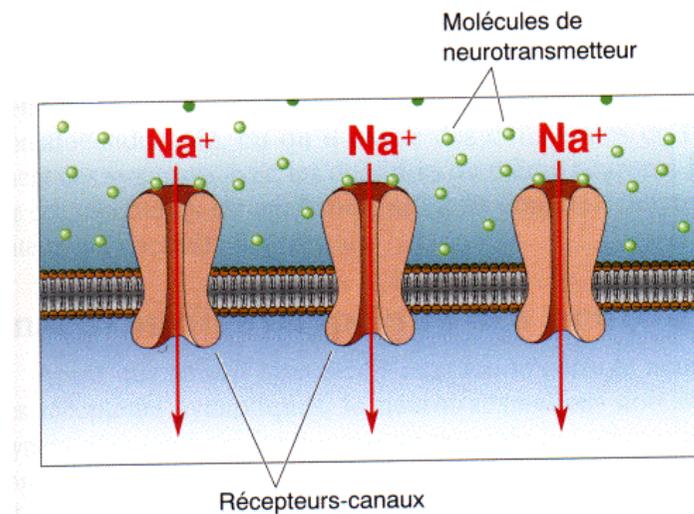
Souvent morphologie **asymétrique**
(synapse de Gray de type I)



Glutamate, Aspartate, ACh

→ entrée 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)

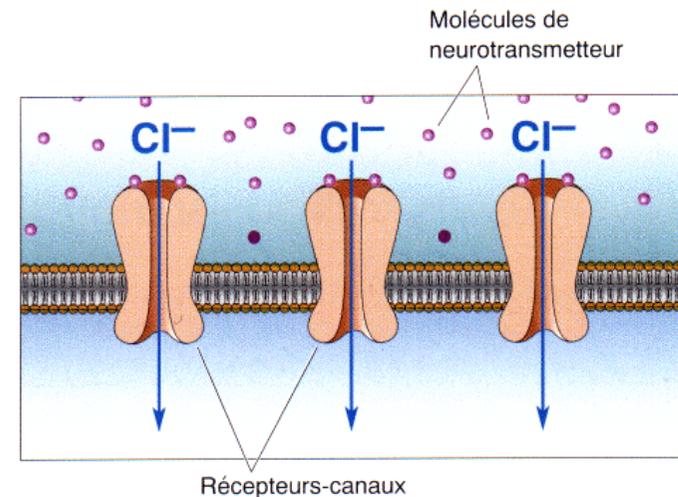
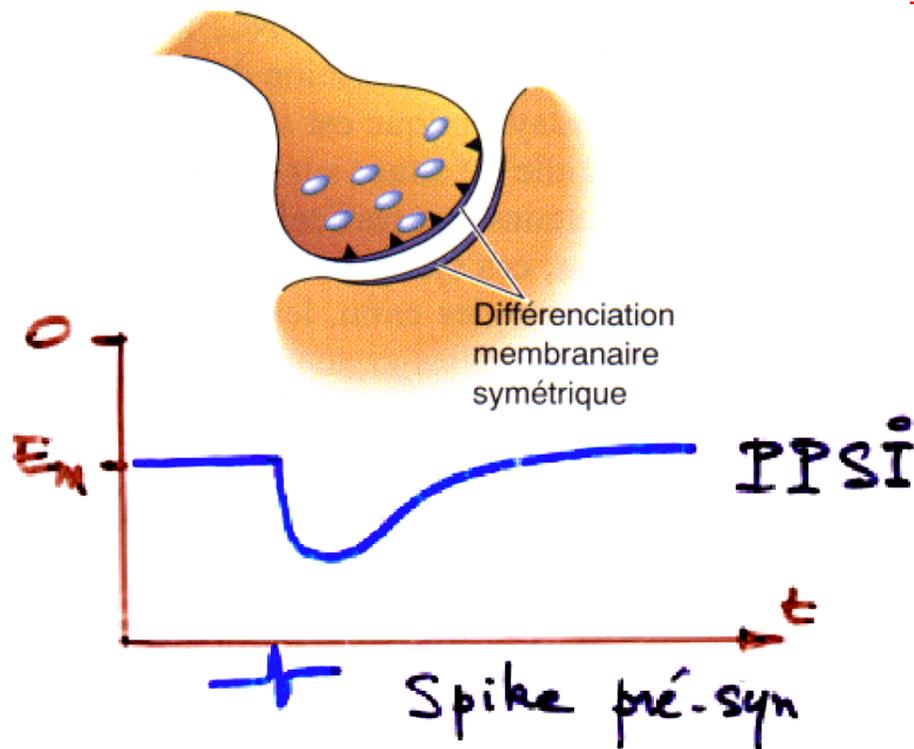
Synapses inhibitrices

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

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

→ entrée 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_{Cl} (pot. d'équilibre du 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

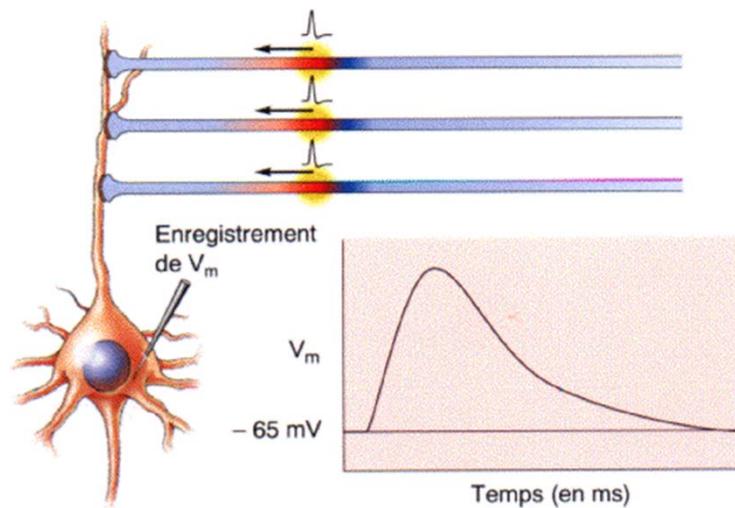
2.4. Transduction

2.4.4. Sommation

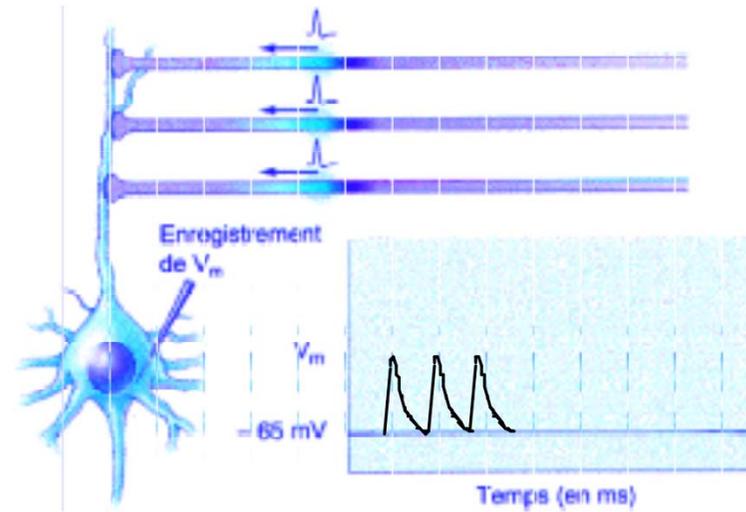
2.4.4.2. Sommation spatiale

Effet de la constante d'espace λ

Sommation si valeur λ
est grande



Pas de sommation si valeur λ
est insuffisante



2. POTENTIEL DE MEMBRANE

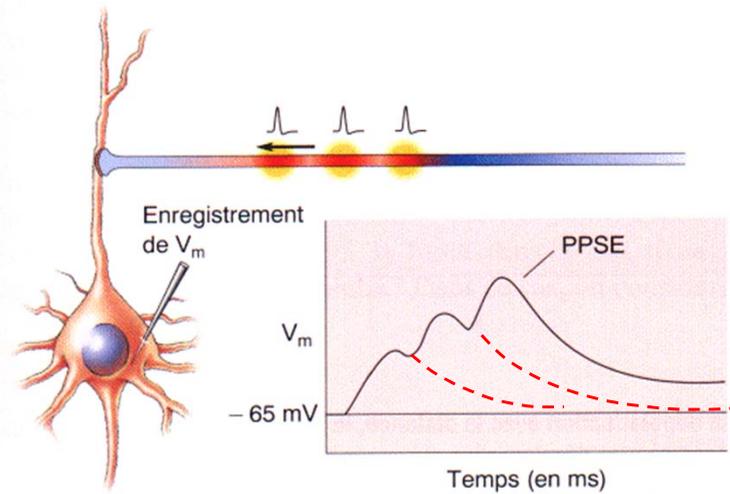
2.4. Transduction

2.4.4. Sommaton

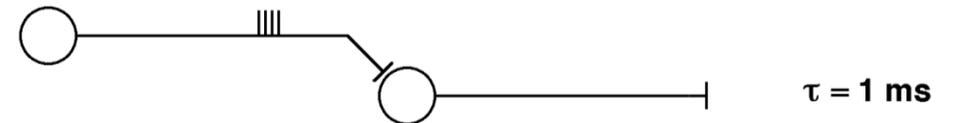
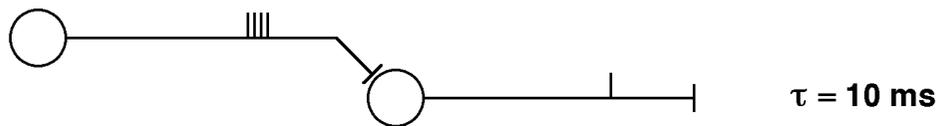
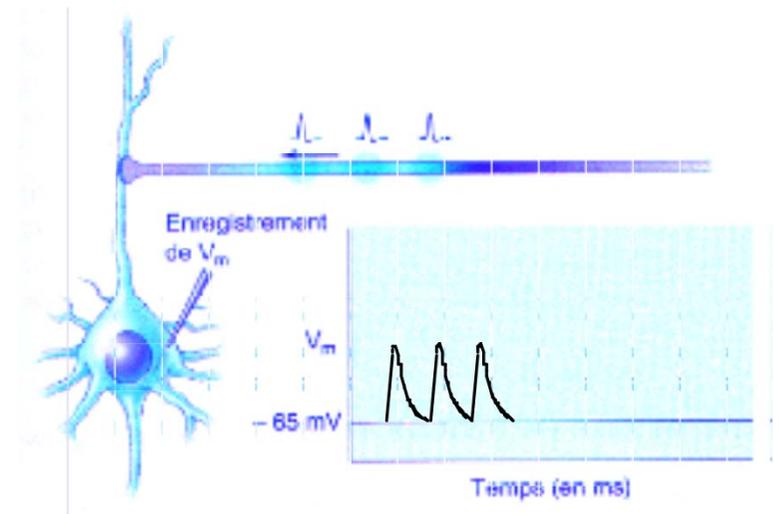
2.4.4.3. Sommaton temporelle

Effet de la constante de temps τ

Sommaton si valeur τ
est grande



Pas de sommaton si valeur τ
est insuffisante



2. POTENTIEL DE MEMBRANE

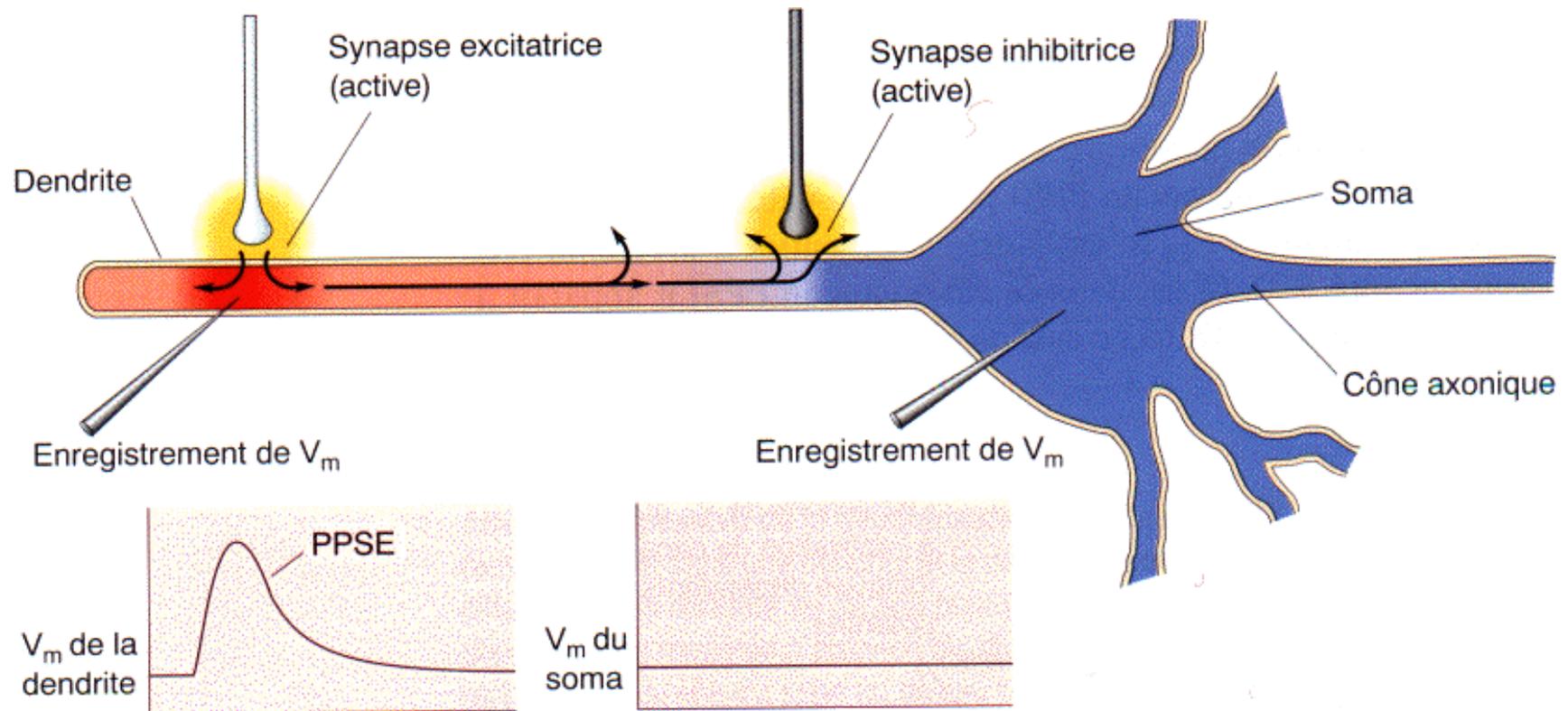
2.4. Transduction

2.4.4. Sommatation

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**



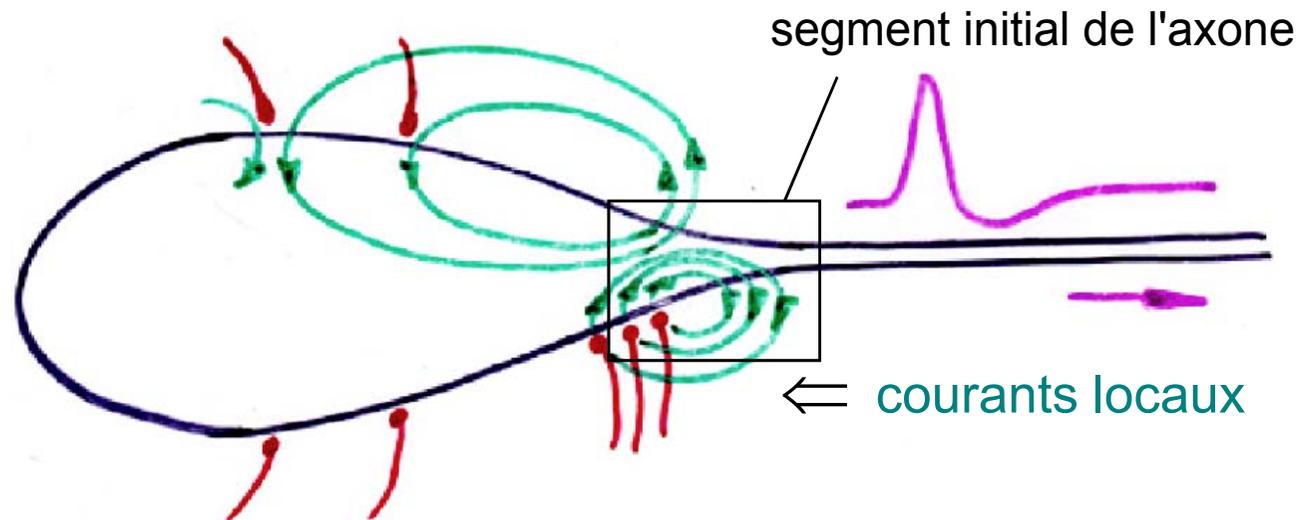
2. POTENTIEL DE MEMBRANE

2.5. Potentiel d'action

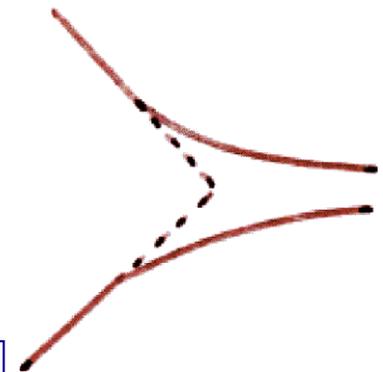
2.5.1. Courants ioniques

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

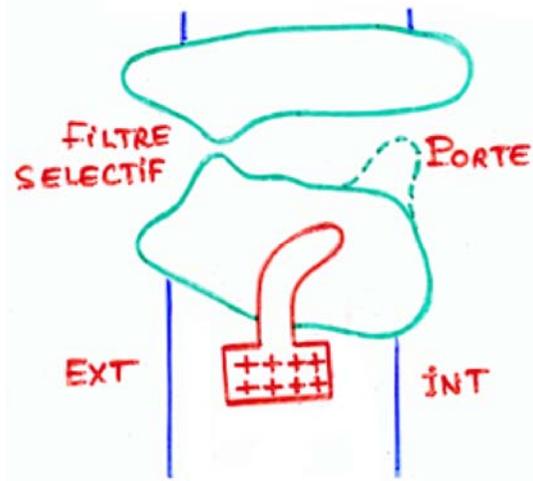
2. POTENTIEL DE MEMBRANE

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 α transmb. \Rightarrow changements conformationnels
- ouverture "tout ou rien" déclenchée par **DEPOLARISATION**
 \rightarrow active senseur chargé +

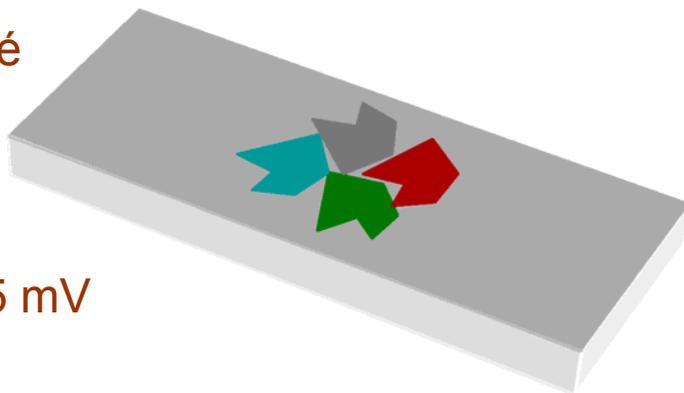
- sélectif pour Na^+

- inhibée par **TETRODOTOXINE (TTX)**

et pas par α -BUNGAROTOXINE

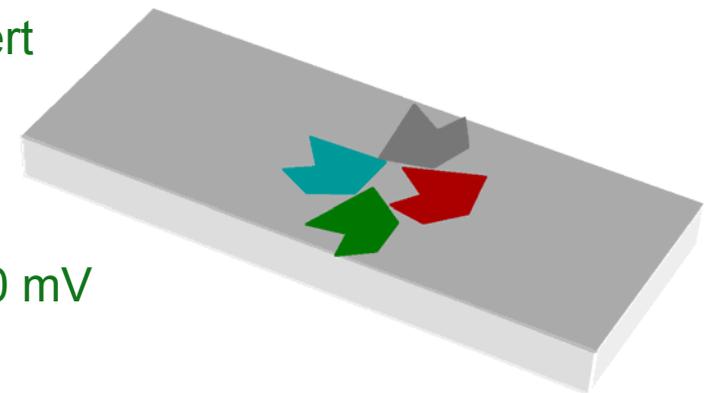
pore fermé

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



pore ouvert

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

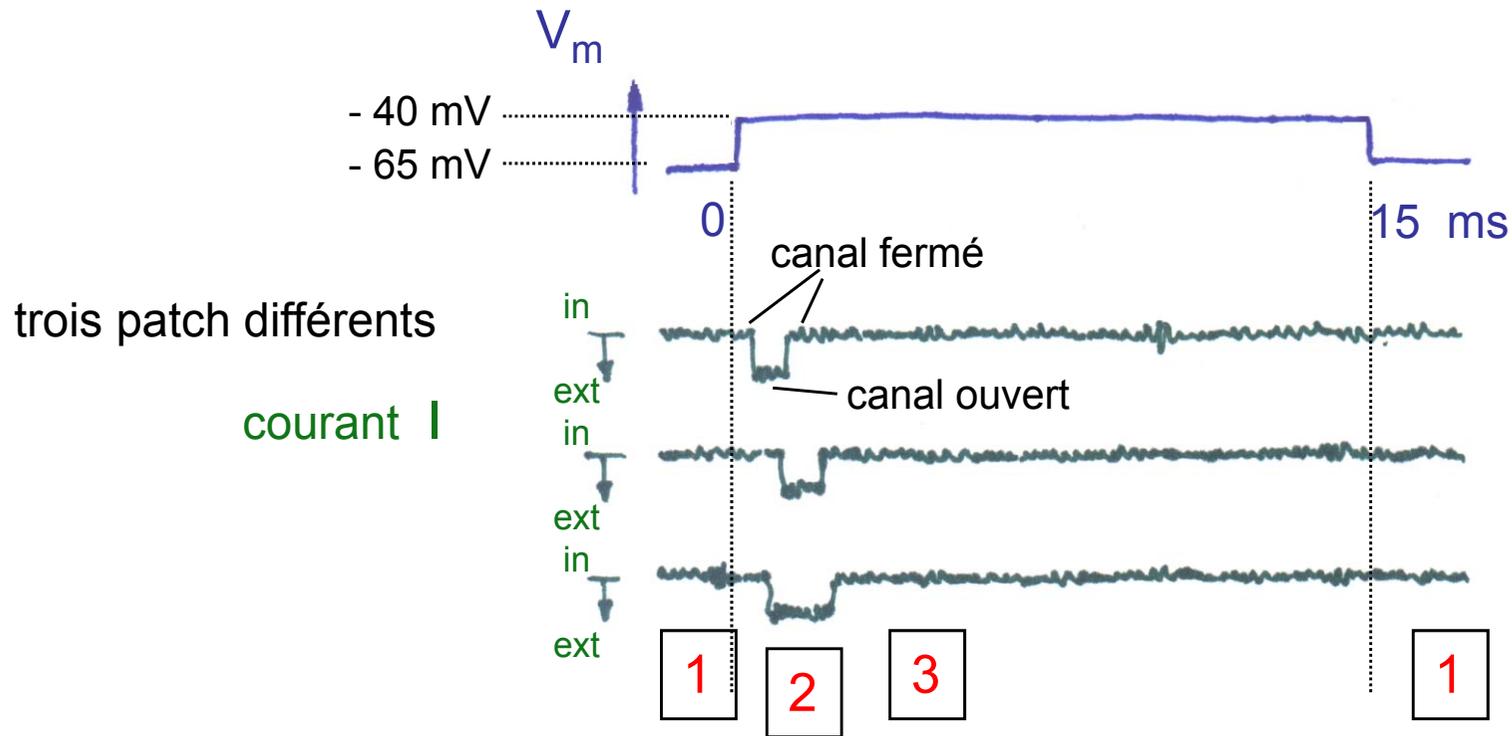


2. POTENTIEL DE MEMBRANE

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 (μ 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_{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.

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

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

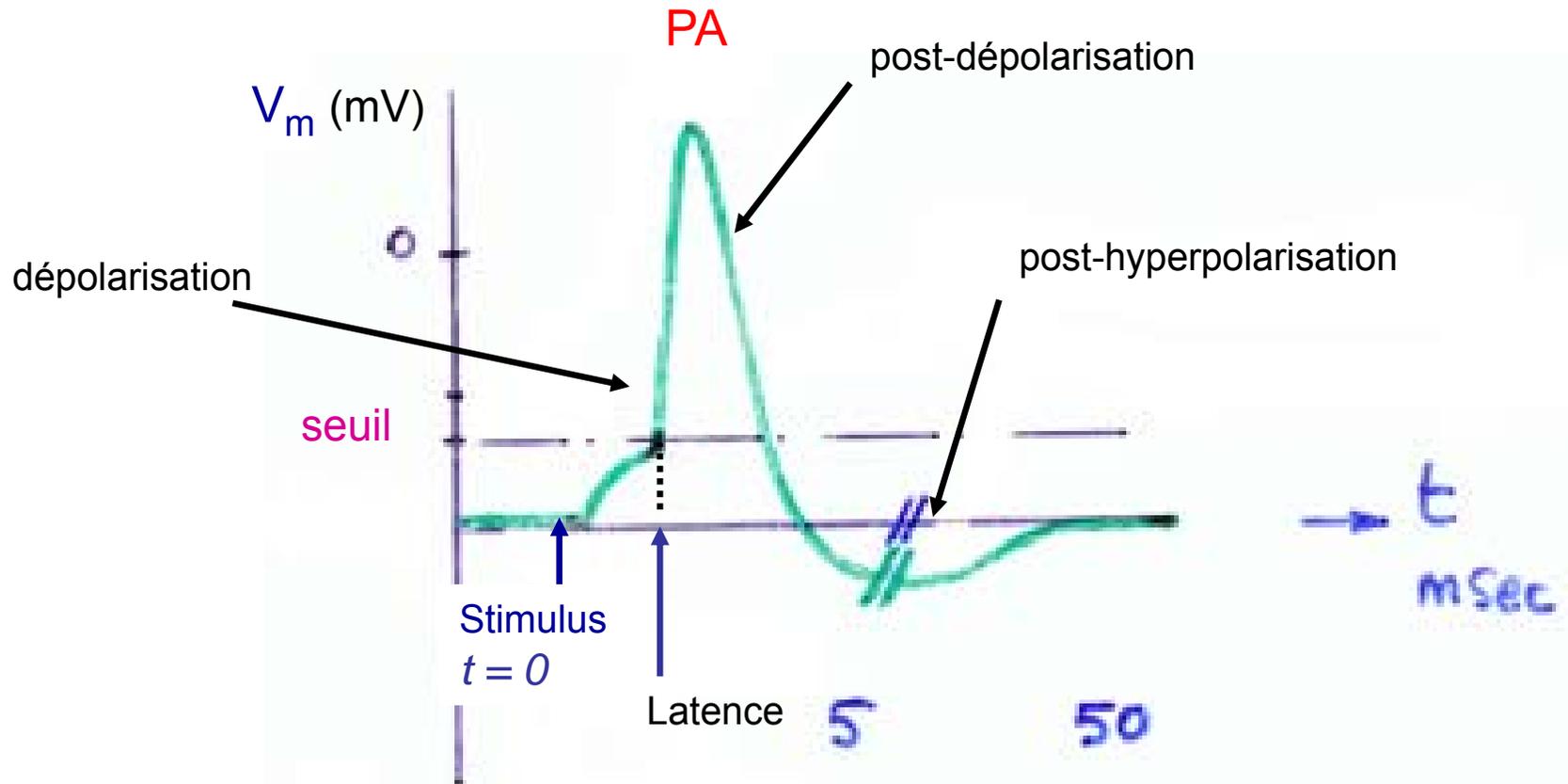
??? \Rightarrow pour déclencher un PA il faut un apport d'énergie

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



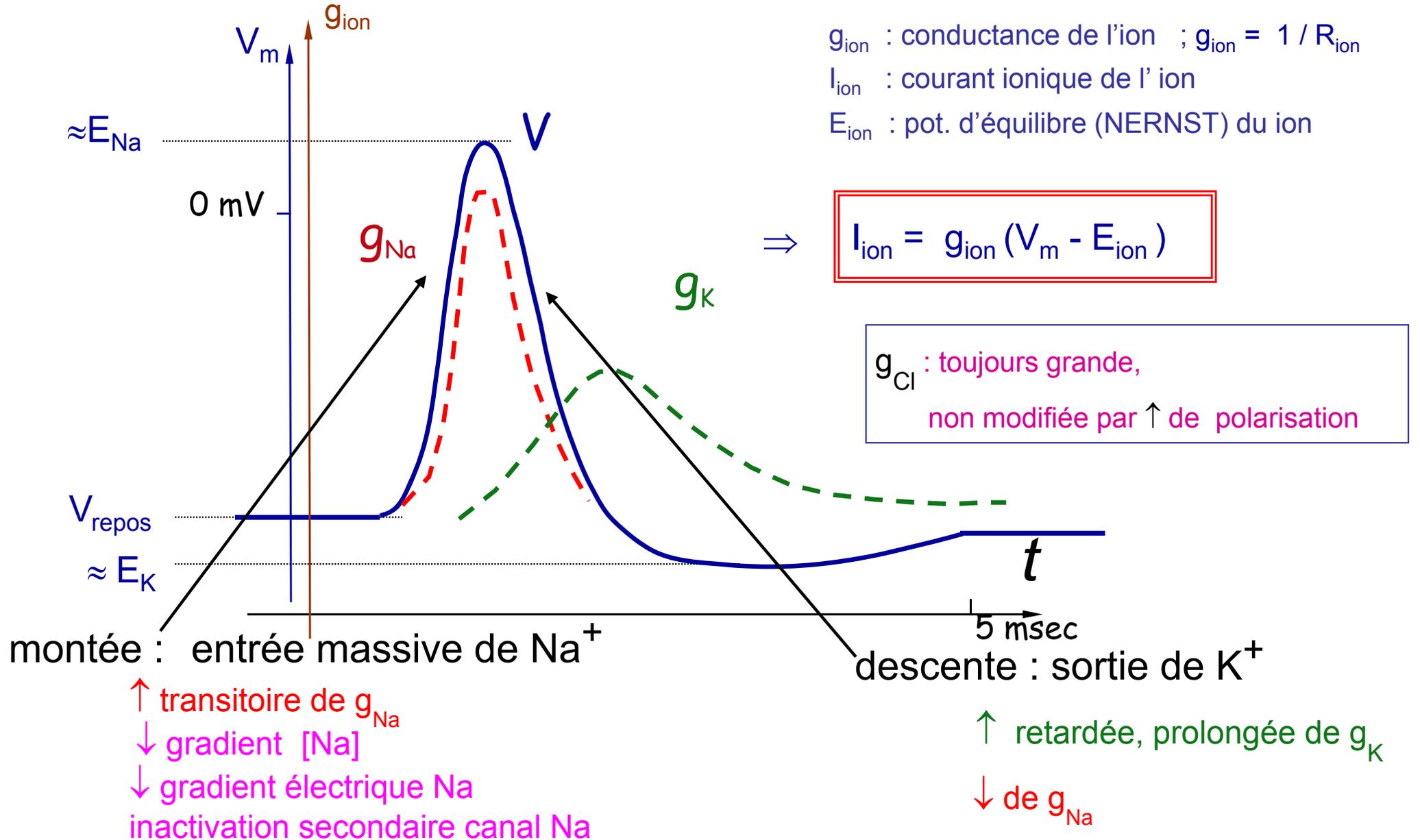
2. POTENTIEL DE MEMBRANE

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

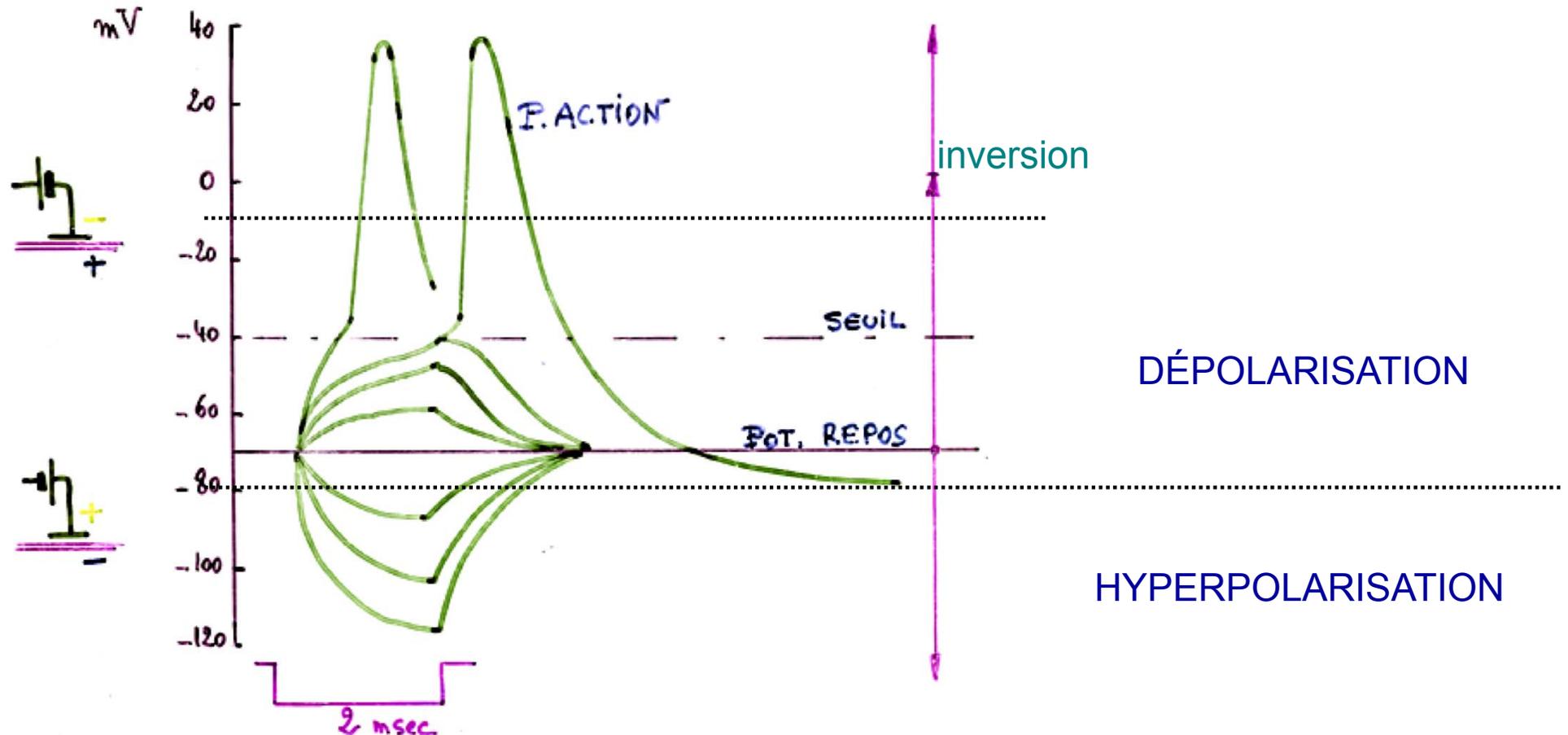


2. POTENTIEL DE MEMBRANE

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

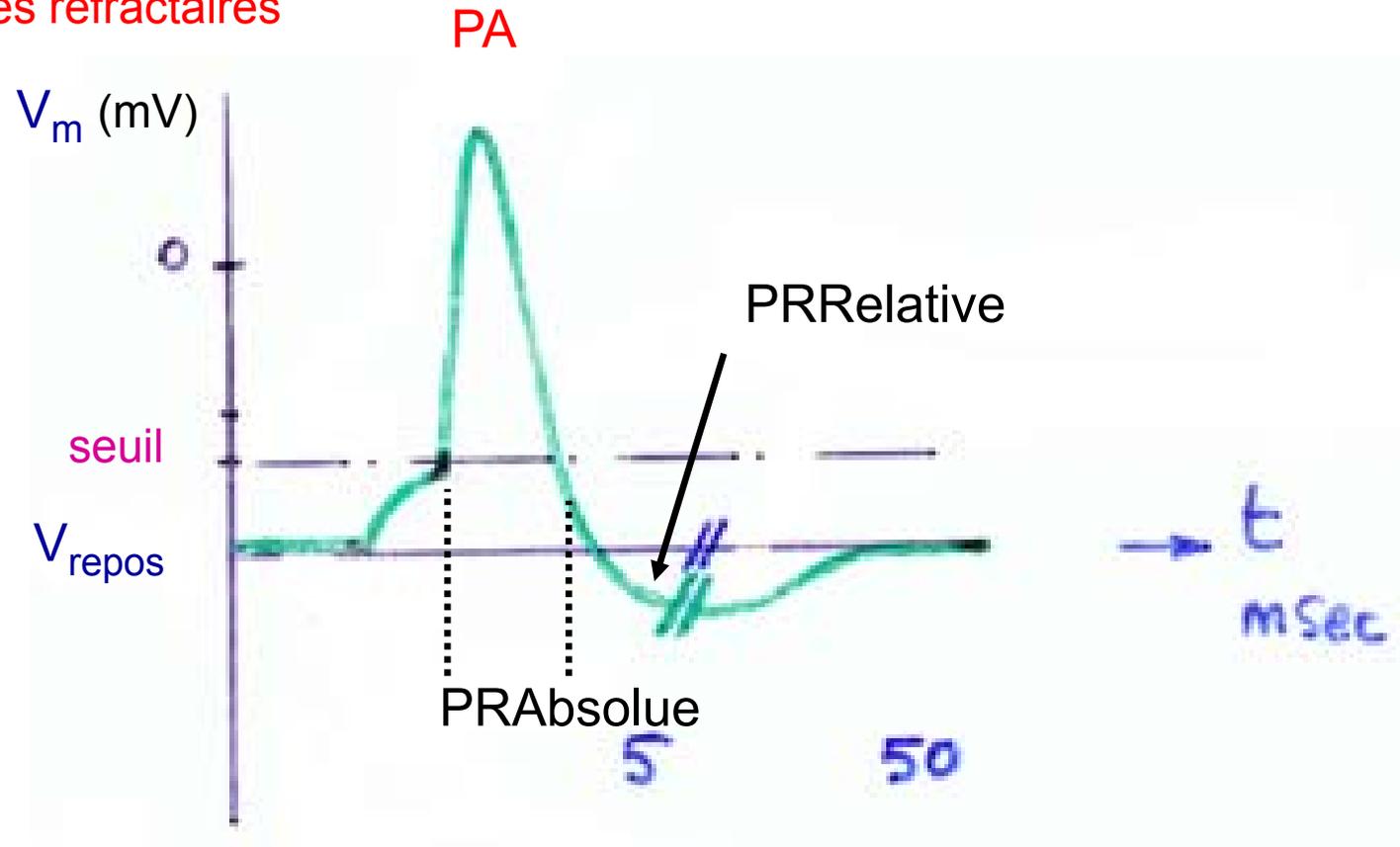
⇒ le potentiel est atténué dans l'espace → cte d'espace λ

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



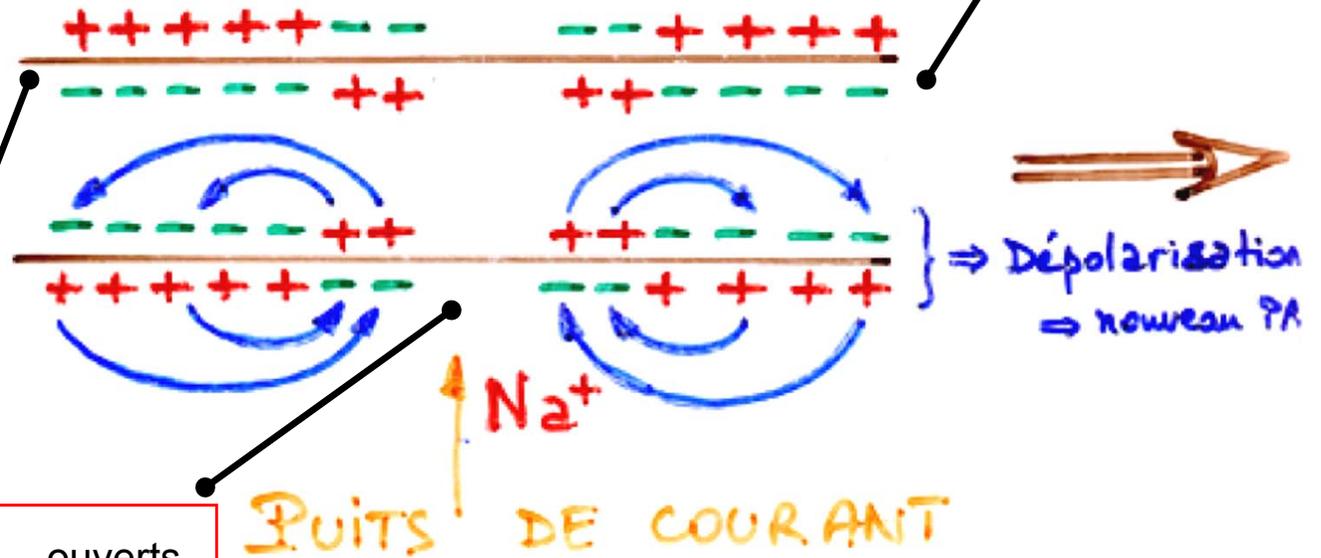
PROPAGATION NON DECREMENTIELLE

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

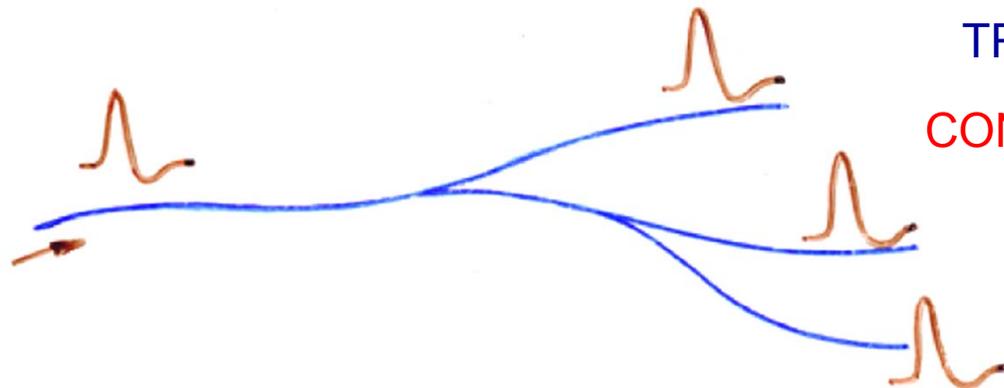


TRANSMISSION HI-FI DE L'INFORMATION

CONSERVATIVE: - SUR GRANDES DISTANCES
- AUX EMBRANCHEMENTS

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

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

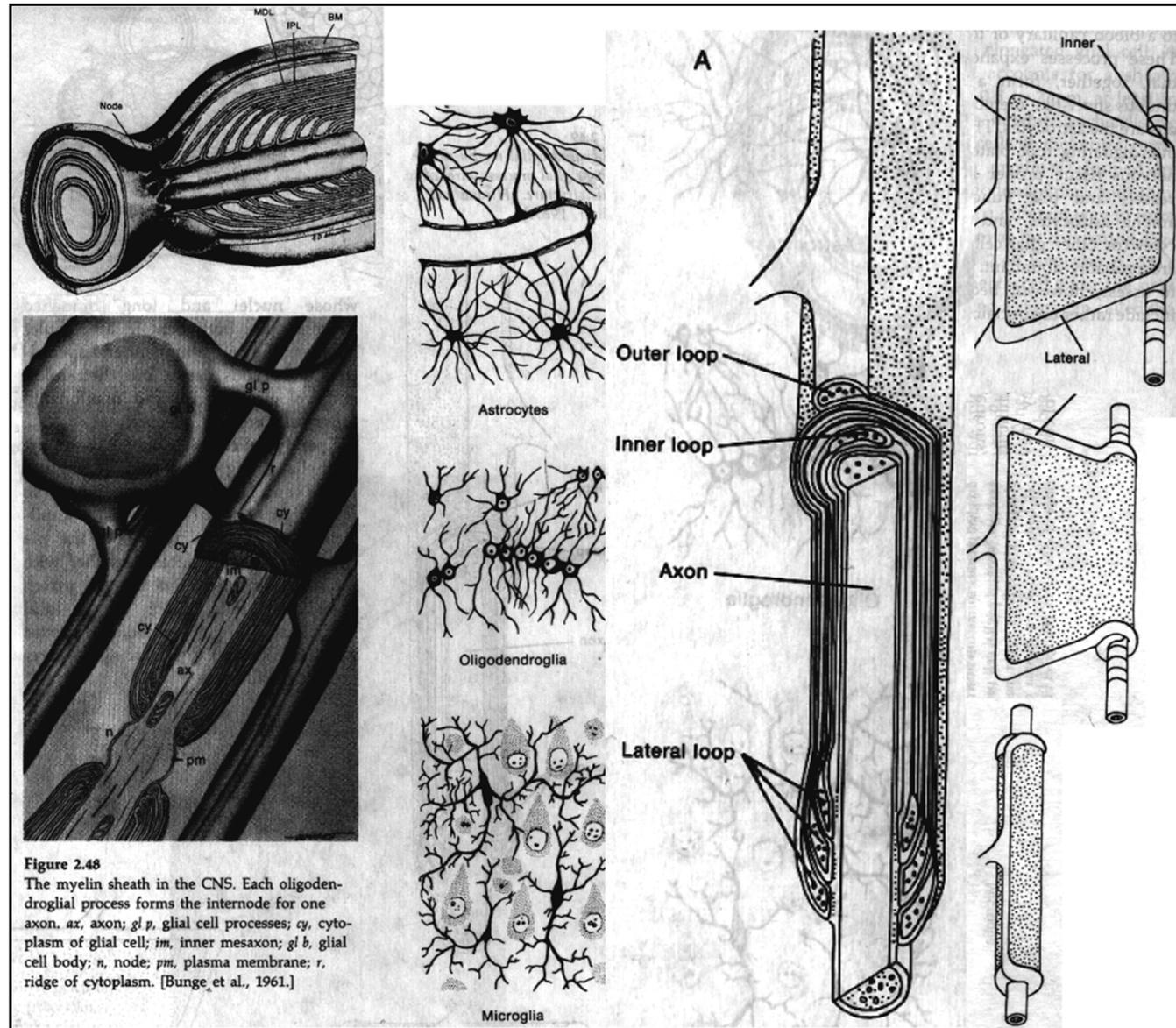


2. POTENTIEL DE MEMBRANE

2.5. Potentiel d'action

2.5.3. Propagation conservative du PA

2.5.3.2. Dans les fibres myélinisées

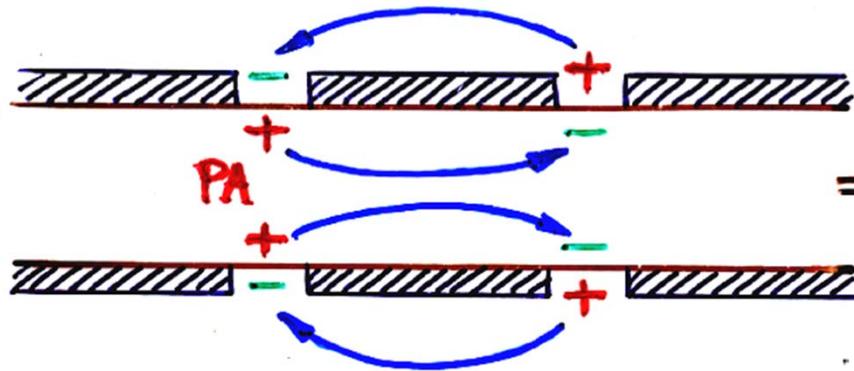


2. POTENTIEL DE MEMBRANE

2.5. Potentiel d'action

2.5.3. Propagation conservative du PA

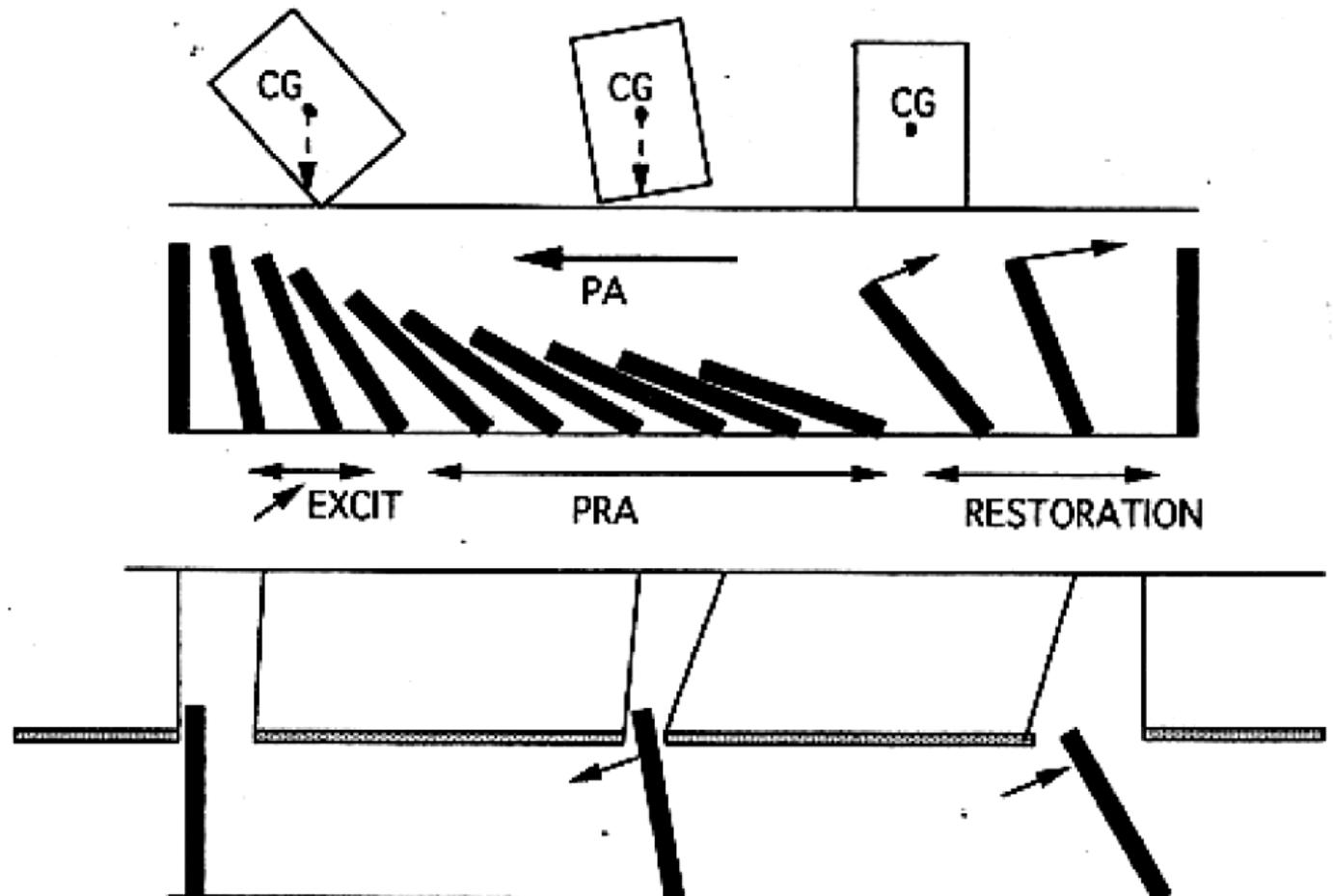
2.5.3.2. Dans les fibres myélinisées



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



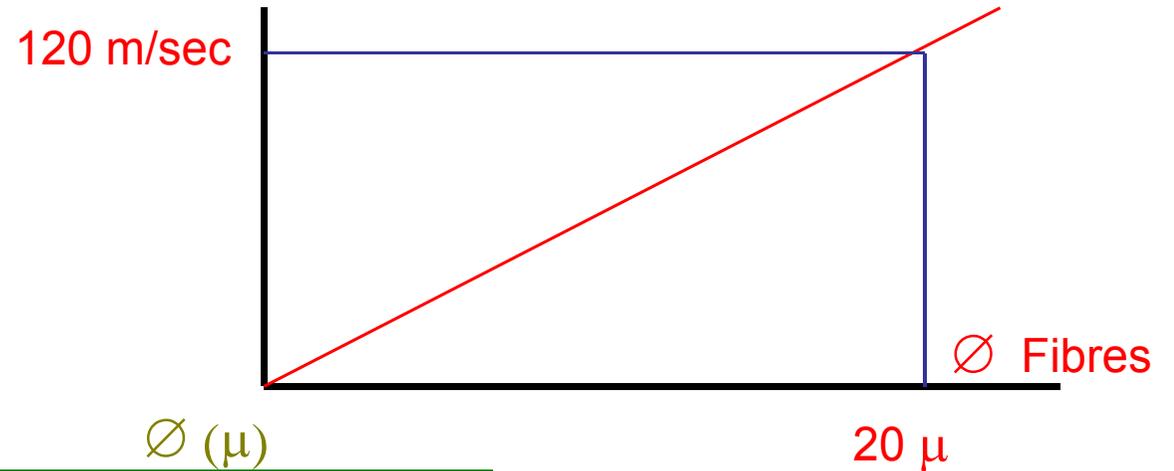
2. POTENTIEL DE MEMBRANE

2.5. Potentiel d'action

2.5.3. Propagation conservative du PA

2.5.3.3. Vitesse de conduction

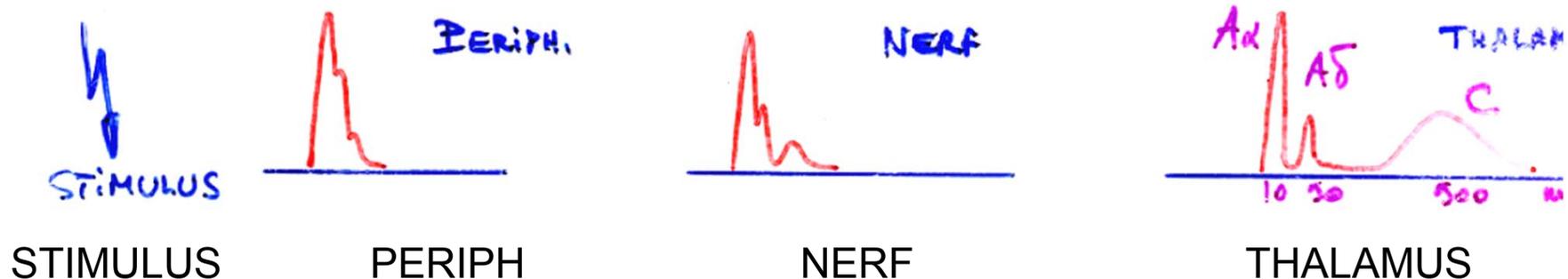
- AUGMENTE AVEC LE $\rightarrow \emptyset$
- ACCRUE PAR LA MYELINISATION



TYPE	VITESSE	\emptyset (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.