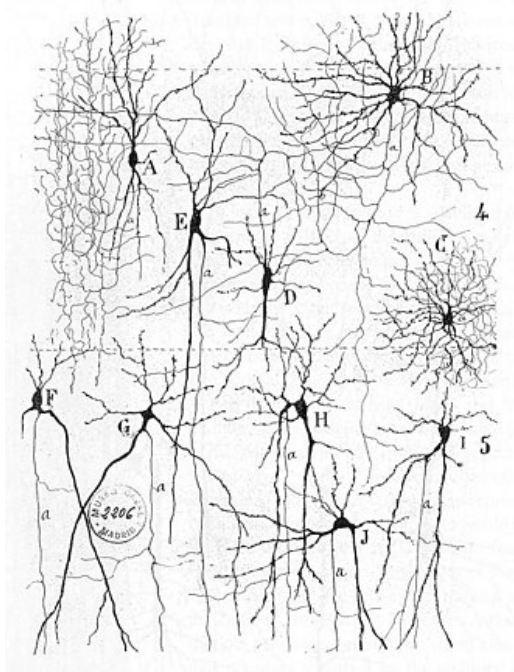


Master systèmes biologiques et concepts physiques

# Biophysique du neurone



Jacques Bourg

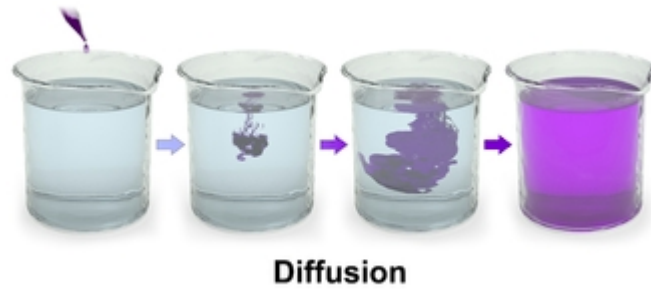
[jacques.bourg@cnrs.fr](mailto:jacques.bourg@cnrs.fr)

Post-doctorant, laboratoire de dynamique corticale et  
intégration multisensorielle.



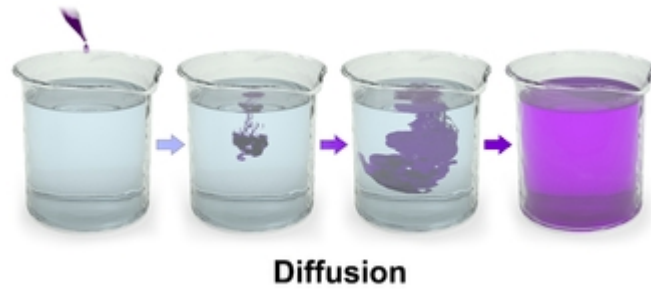
# Deuxième partie: principes de la polarisation électrique du neurone

# La diffusion

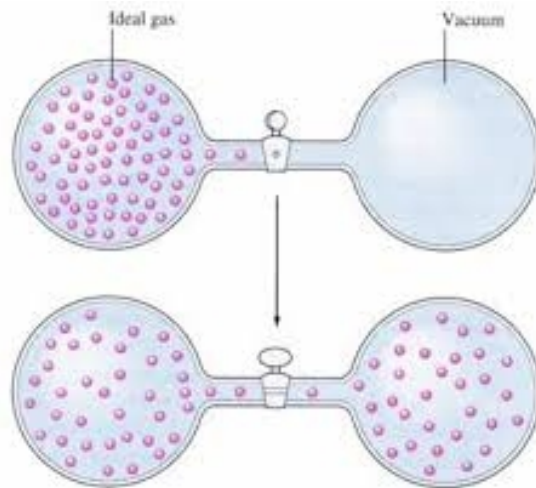


Le soluté se déplace des zones de forte concentration vers les zones de faible concentration.

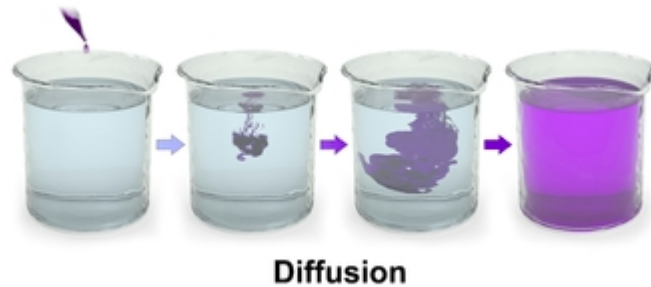
# La diffusion



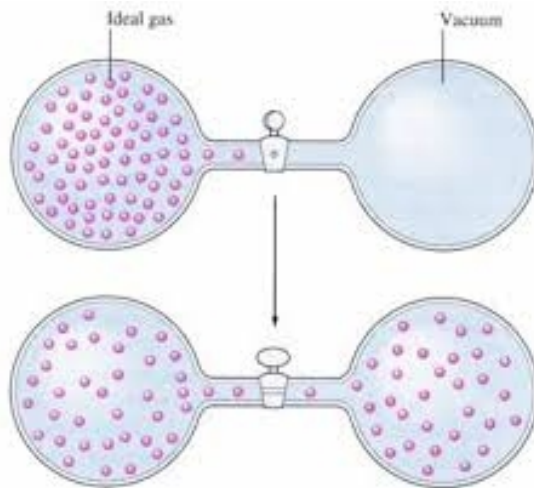
Le soluté se déplace des zones de forte concentration vers les zones de faible concentration.



# La diffusion

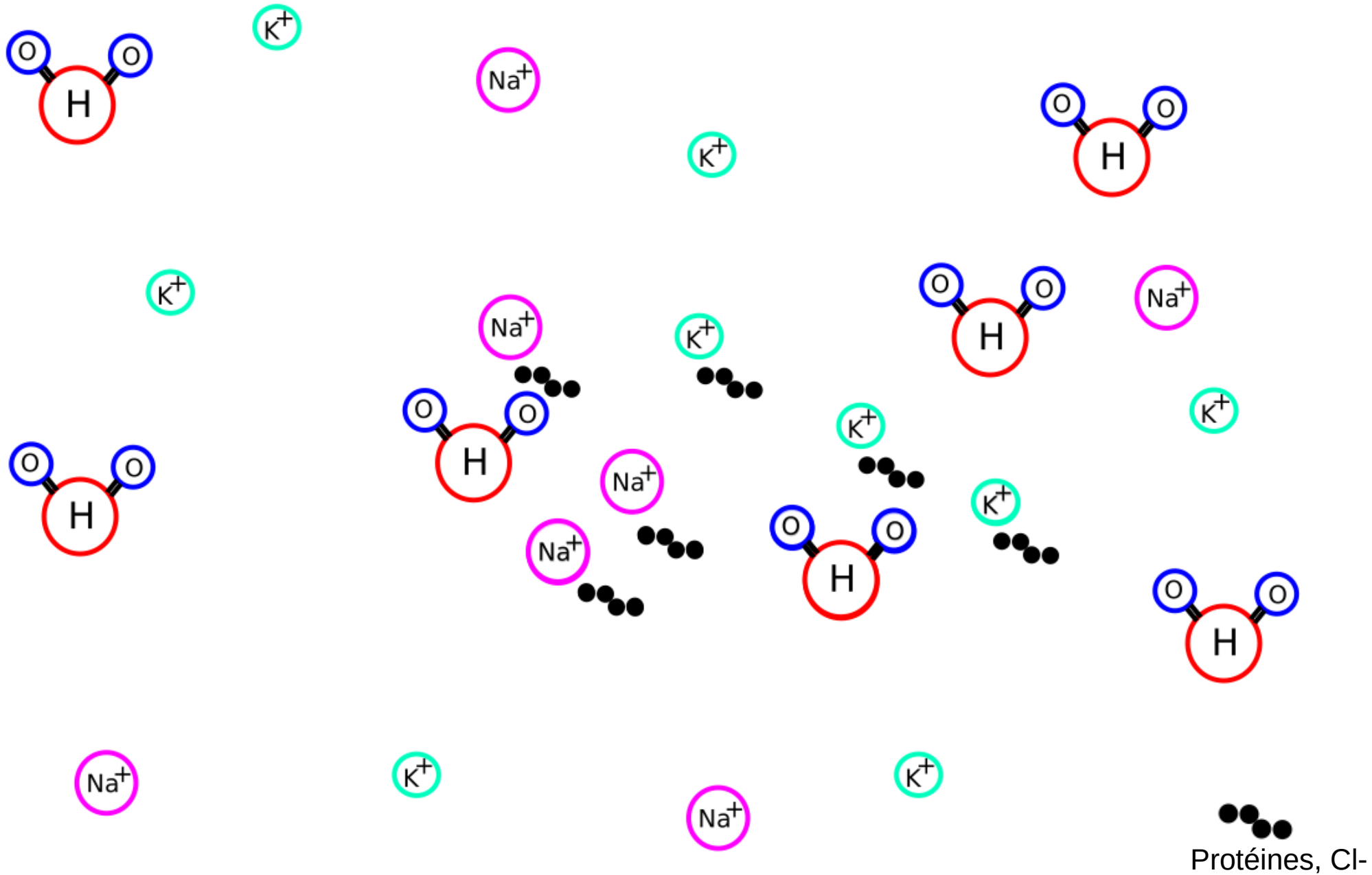


Le soluté se déplace des zones de forte concentration vers les zones de faible concentration.

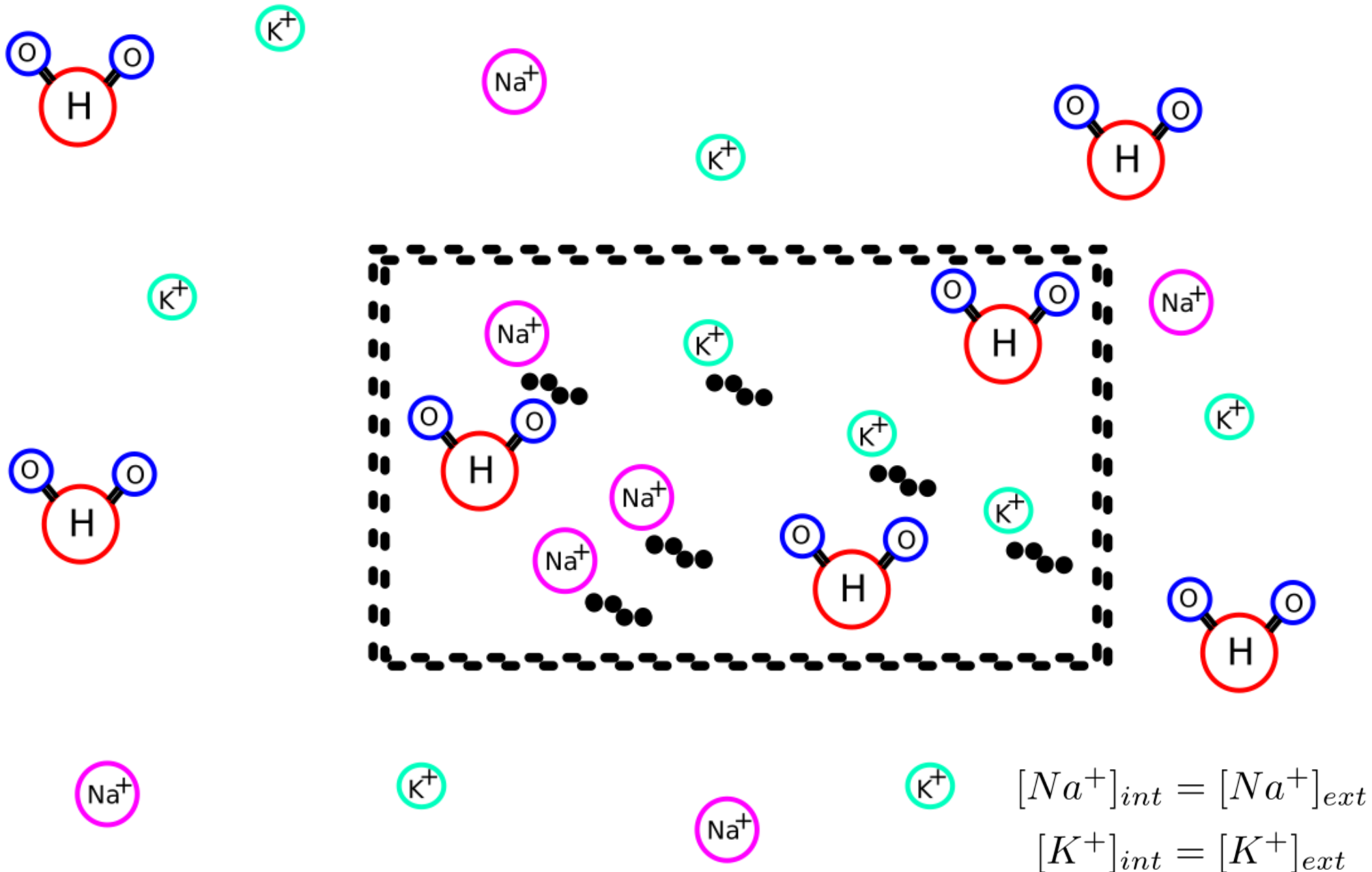


Etant donné que les molécules s'agitent, elles s'entrechoquent et vont d'éloigner les unes des autres jusqu'à ce que le récipient le permette. A ce moment la probabilité d'un choc de deux molécules est homogène dans l'espace.

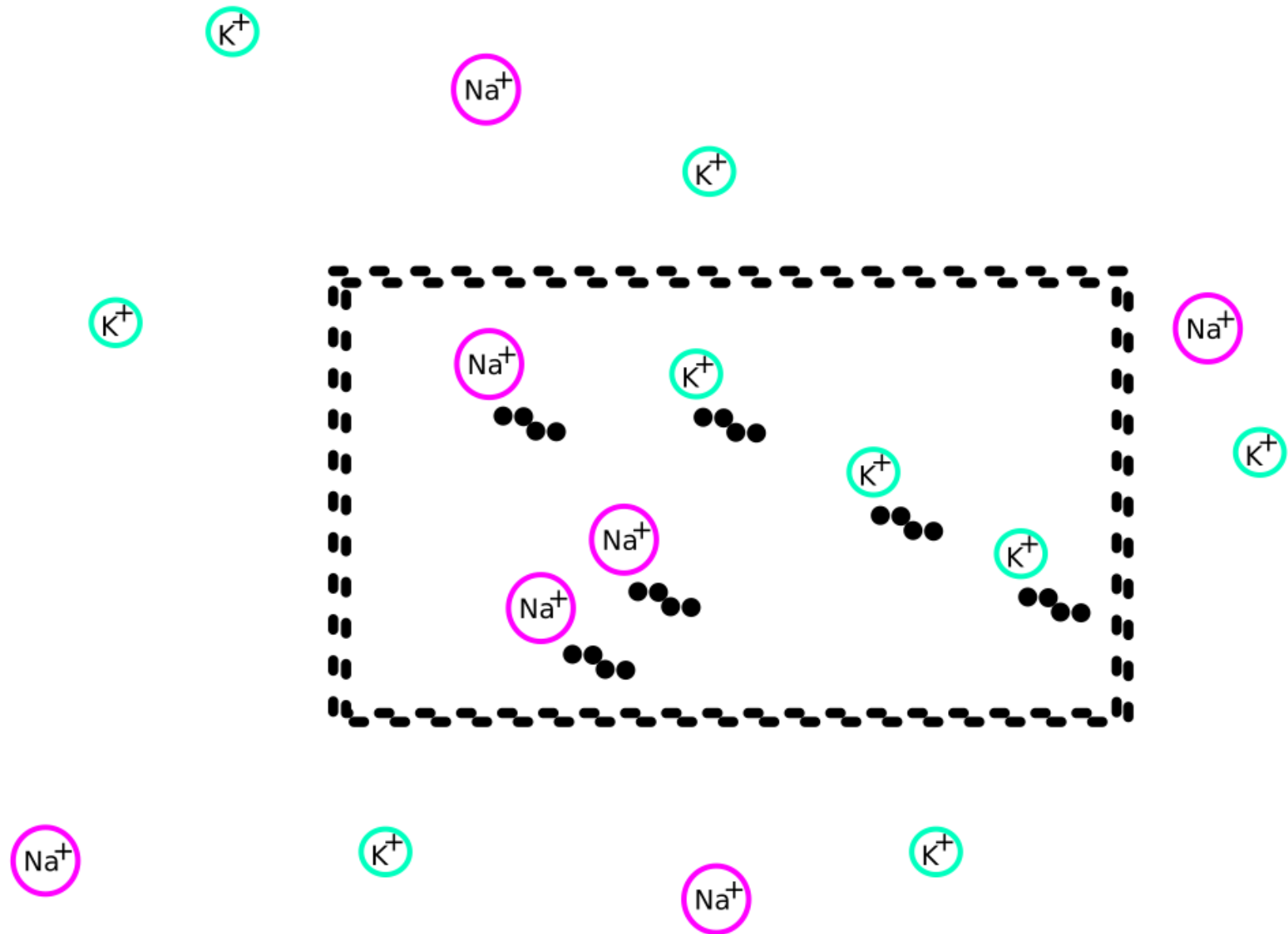
# Etablissement du potentiel d'équilibre



# Etablissement du potentiel d'équilibre

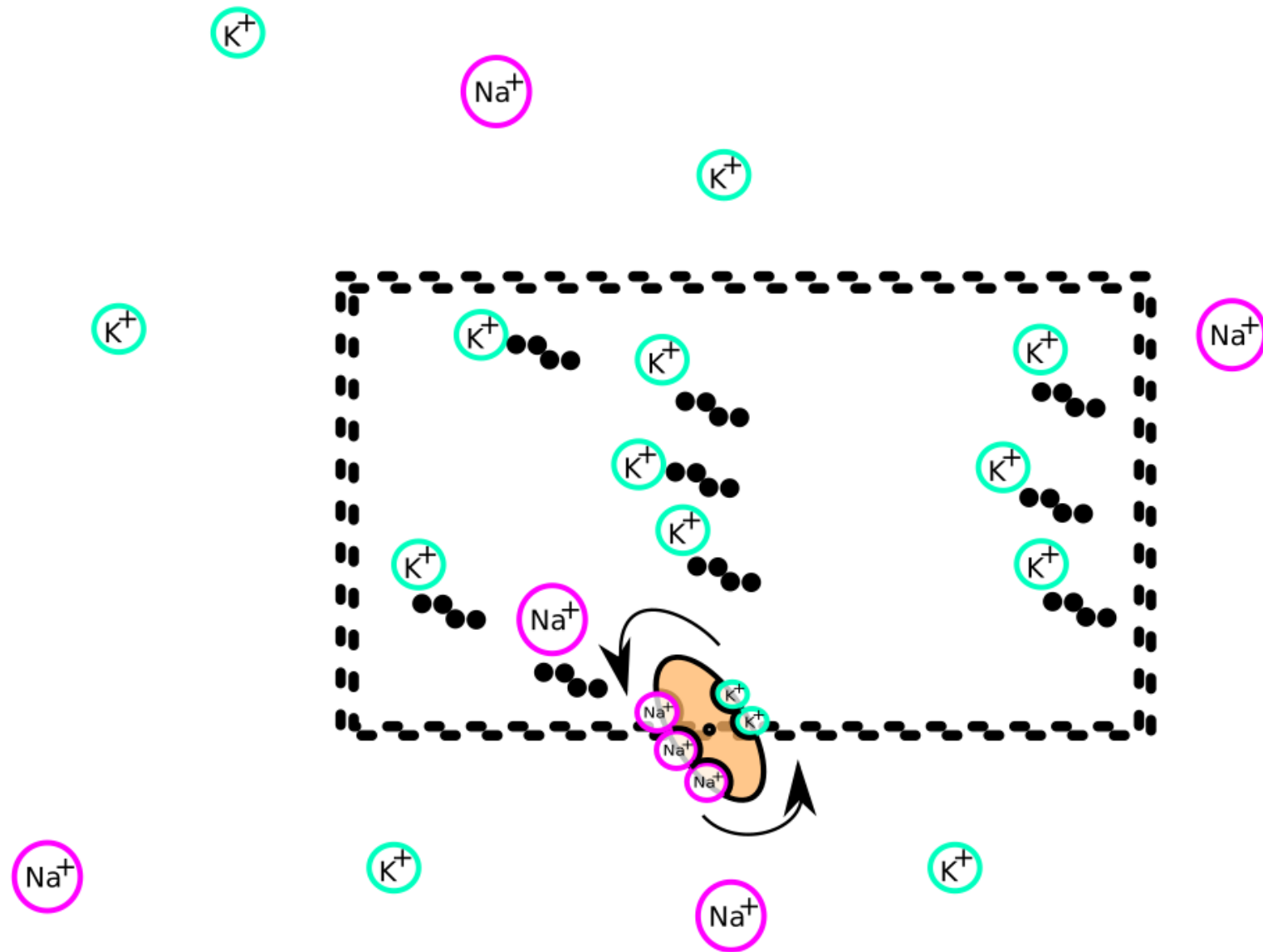


# Etablissement du potentiel d'équilibre

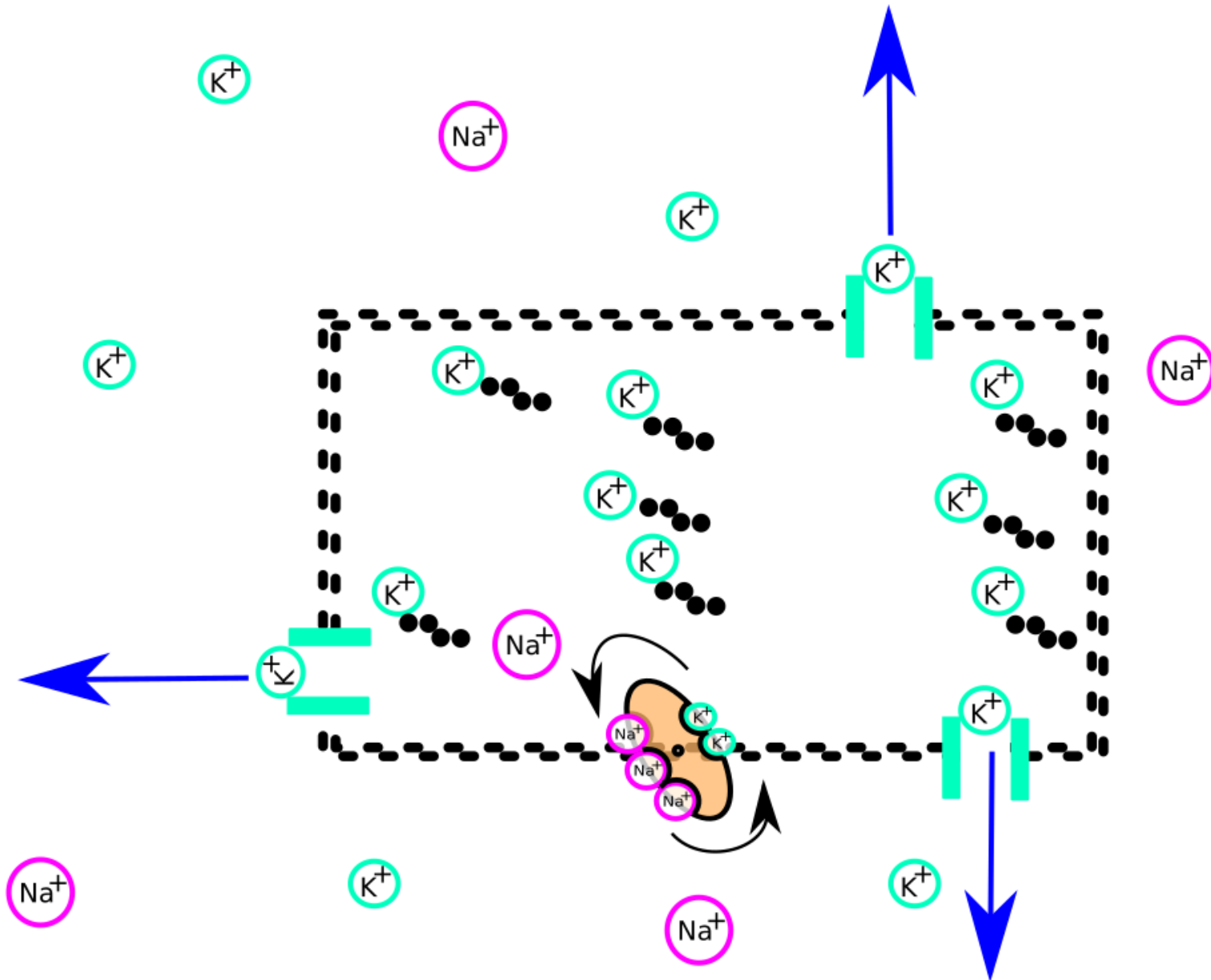




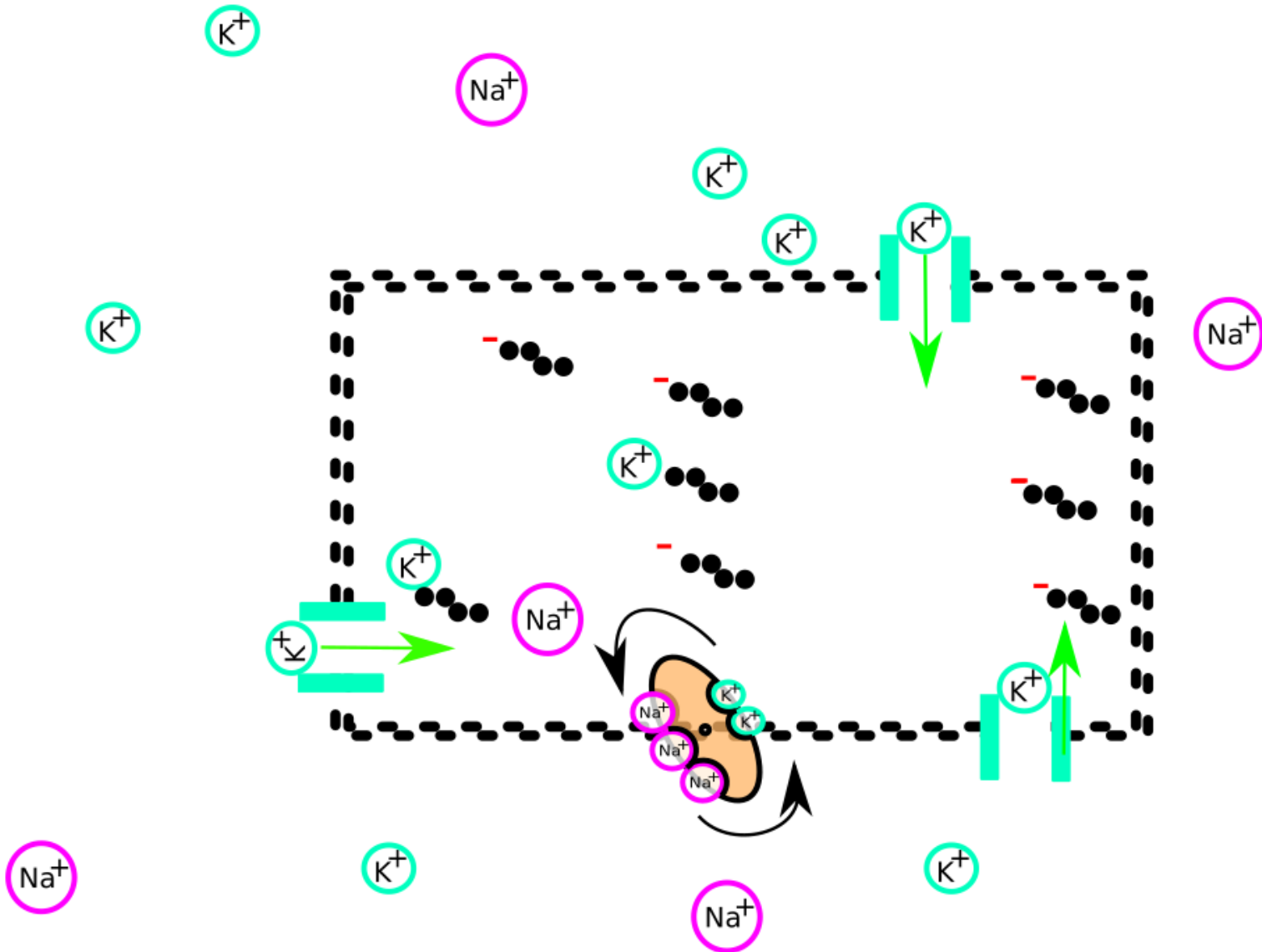
# Etablissement du potentiel d'équilibre



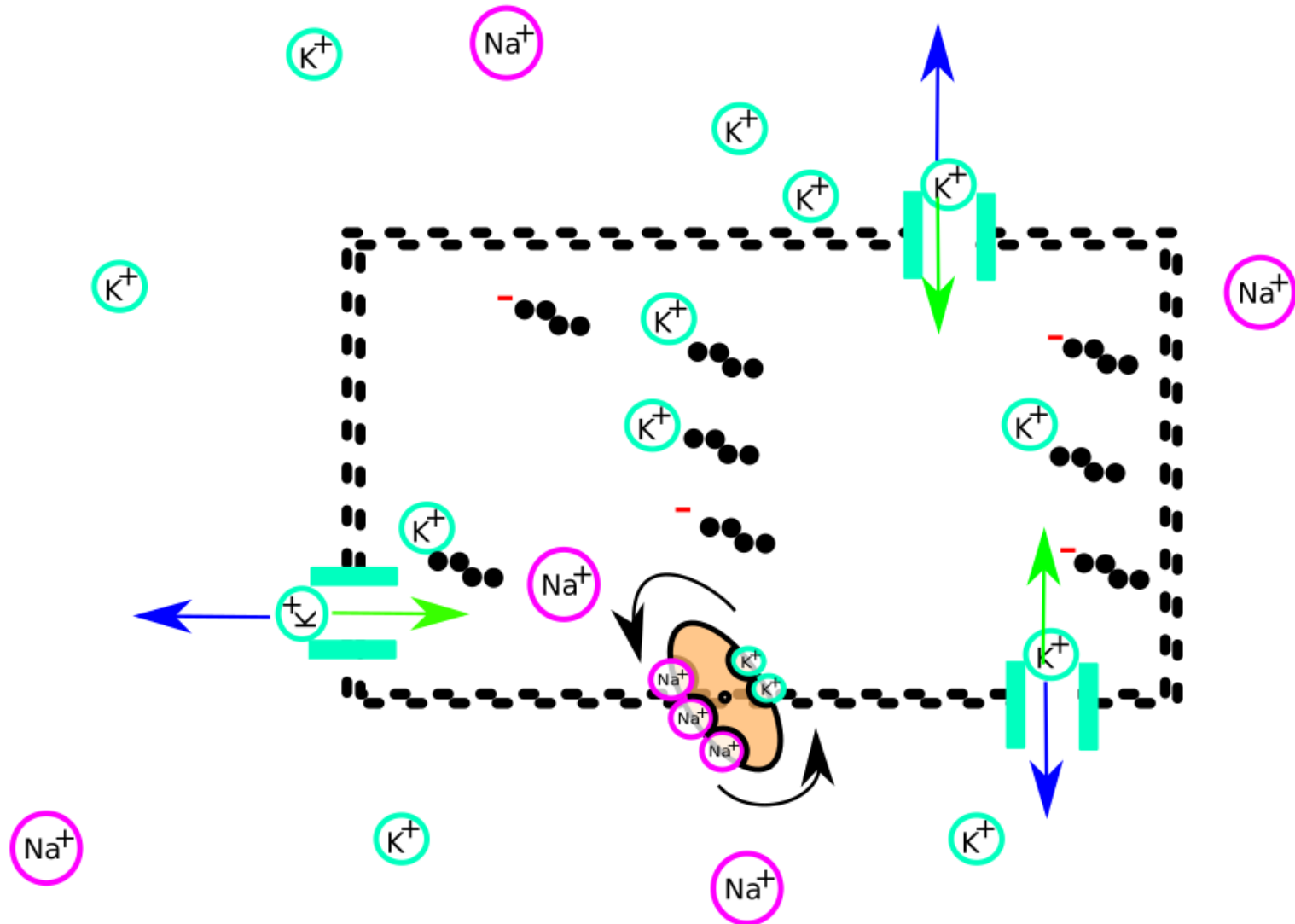
# Etablissement du potentiel d'équilibre



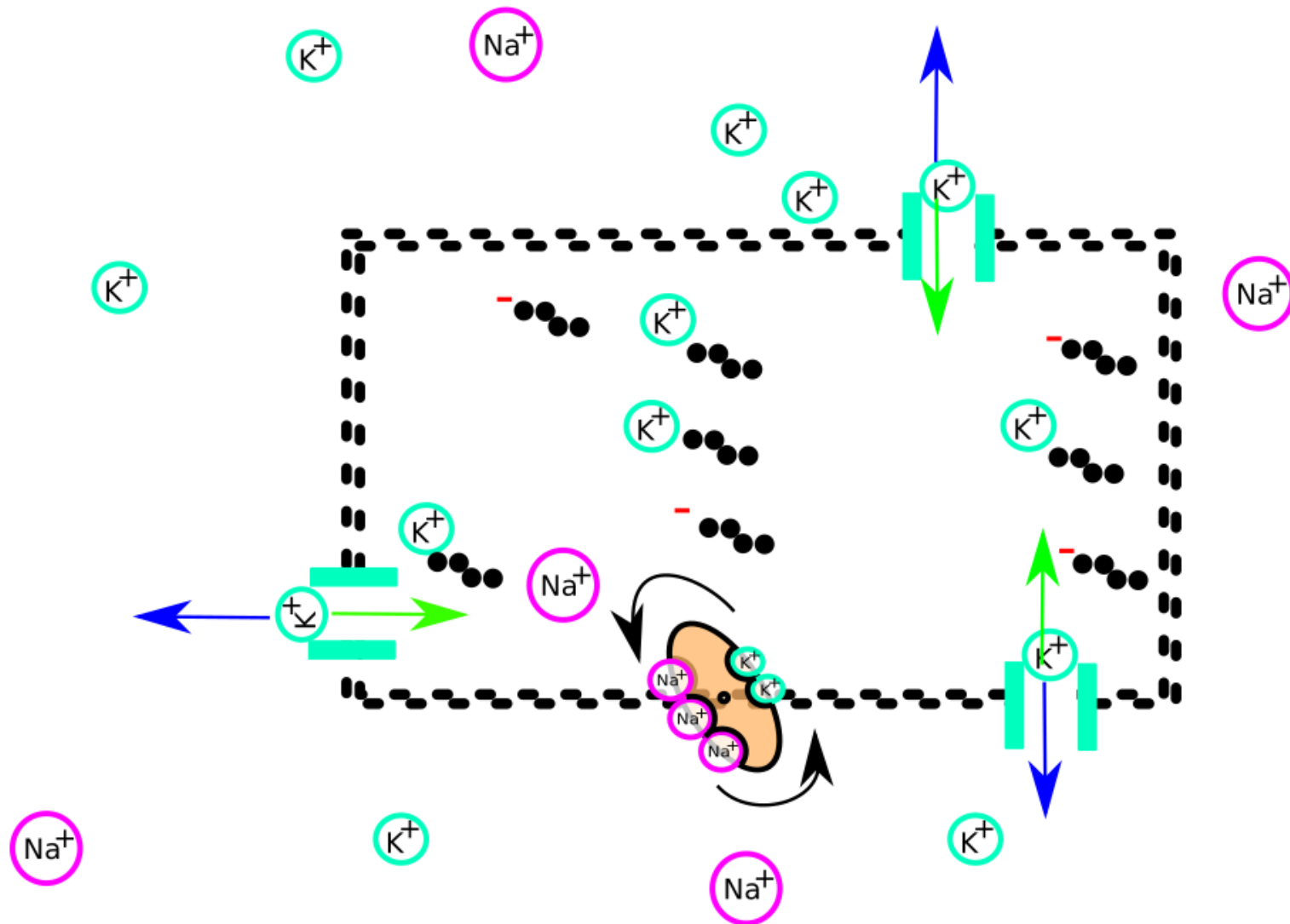
# Etablissement du potentiel d'équilibre



# Etablissement du potentiel d'équilibre



# Etablissement du potentiel d'équilibre



Que se passe t'il si l'on remplace les canaux ioniques sélectifs au potassium par des canaux ioniques selectifs au sodium ?

# Etablissement du potentiel d'équilibre

Pour une membrane perméable à **un seul type d'ion**, le **potentiel d'équilibre est la différence de potentiel à laquelle le flux ionique est nul**: the flux dû à la diffusion est compensé par le flux électromoteur. Une membrane non sélective ne crée pas de différence de potentiel.

# Etablissement du potentiel d'équilibre

Pour une membrane perméable à **un seul type d'ion**, le **potentiel d'équilibre est la différence de potentiel à laquelle le flux ionique est nul**: the flux dû à la diffusion est compensé par le flux électromoteur. Une membrane non sélective ne crée pas de différence de potentiel.

Pour une espèce ionique X, le potentiel d'équilibre est donné par la **loi de Nerst**:

$$E_x = \frac{RT}{ZF} \ln \left( \frac{[X]_{ext}}{[X]_{int}} \right)$$

$$E_{K^+} = -80\text{mV}$$

$$E_{Na^+} = +66\text{mV}$$

R : constante des gaz parfaits

T : température en K

Z : nombre de charges élémentaires (par ex. 1 ou -1)

F : constante de Faraday (charge d'une mole d'électrons)

# Etablissement du potentiel d'équilibre

Pour une membrane perméable à un seul type d'ion, le potentiel d'équilibre est la différence de potentiel à laquelle le flux ionique est nul: the flux dû à la diffusion est compensé par le flux electromoteur. Une membrane non sélective ne crée pas de différence de potentiel.

Pour une espèce ionique X, le potentiel d'équilibre est donné par la **loi de Nerst**:

$$E_x = \frac{RT}{ZF} \ln \left( \frac{[X]_{ext}}{[X]_{int}} \right)$$

$$E_{K^+} = -80mV$$

$$E_{Na^+} = +66mV$$

R : constante des gaz parfaits

T : température en K

Z : nombre de charges élémentaires (par ex. 1 ou -1)

F : constante de Faraday (charge d'une mole d'electrons)

Pour un ion positif,  $E < 0$  si plus d'ions dans la cellule.

Pour un ion négatif,  $E > 0$  si plus d'ions dans la cellule.

Le potentiel d'équilibre est aussi connu sous le nom de **potentiel d'inversion**, car le sens du courant change selon que le potentiel soit légèrement au-dessus ou en-dessous.



# Le potentiel de repos

Les canaux de fuite laissent passer **plusieurs types d'ions**, dans des proportions variables. L'équation de Nerst n'est plus valable et nous utilisons l'équation de **Goldman-Hodgkin-Katz**:

$$E_m = \frac{RT}{F} \ln \left( \frac{P_{Na^+} [Na^+]_{ext} + P_{K^+} [K^+]_{ext} + P_{Cl^-} [Cl^-]_{int}}{P_{Na^+} [Na^+]_{int} + P_{K^+} [K^+]_{int} + P_{Cl^-} [Cl^-]_{ext}} \right)$$

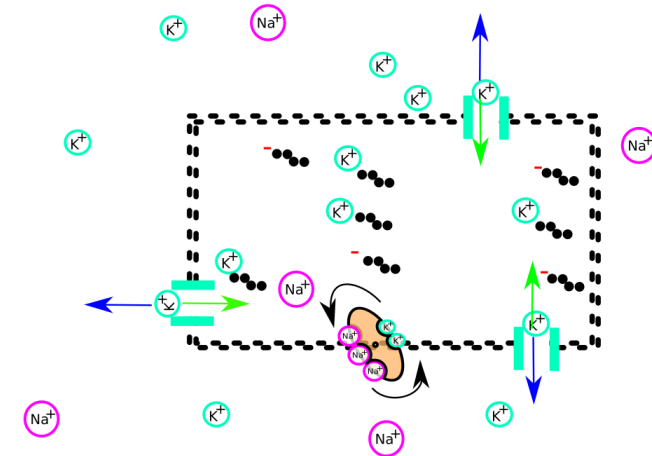
$P_i$  : perméabilité pour l'espèce  $i$

$$\begin{aligned} P (Na^+) &= 5 \\ P (K^+) &= 100 \\ P (Cl^-) &= 10 \end{aligned}$$

$$P_{Na^+} \ll P_{K^+} \text{ donc } V_m \sim E_{K^+} = \frac{RT}{F} \ln \left( \frac{[K^+]_{ext}}{[K^+]_{int}} \right)$$

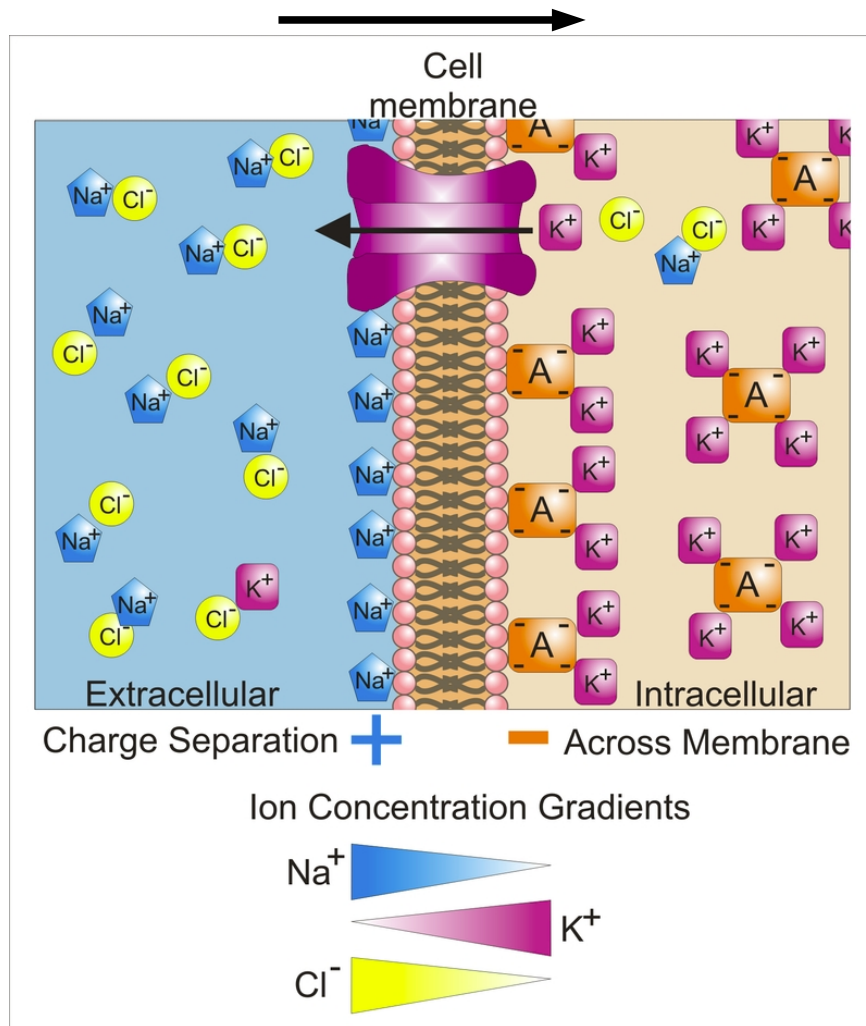
$$E_{K^+} = -80 \text{ mV}$$

$$V_m = -75 \text{ à } -65 \text{ mV}$$



# Le potentiel de repos

$$V = V_{int} - V_{ext} \approx -70mV \sim E_{K^+}$$



$$[K^+]_{int} = 150mM/L$$

$$[Na^+]_{int} = 12mM/L$$

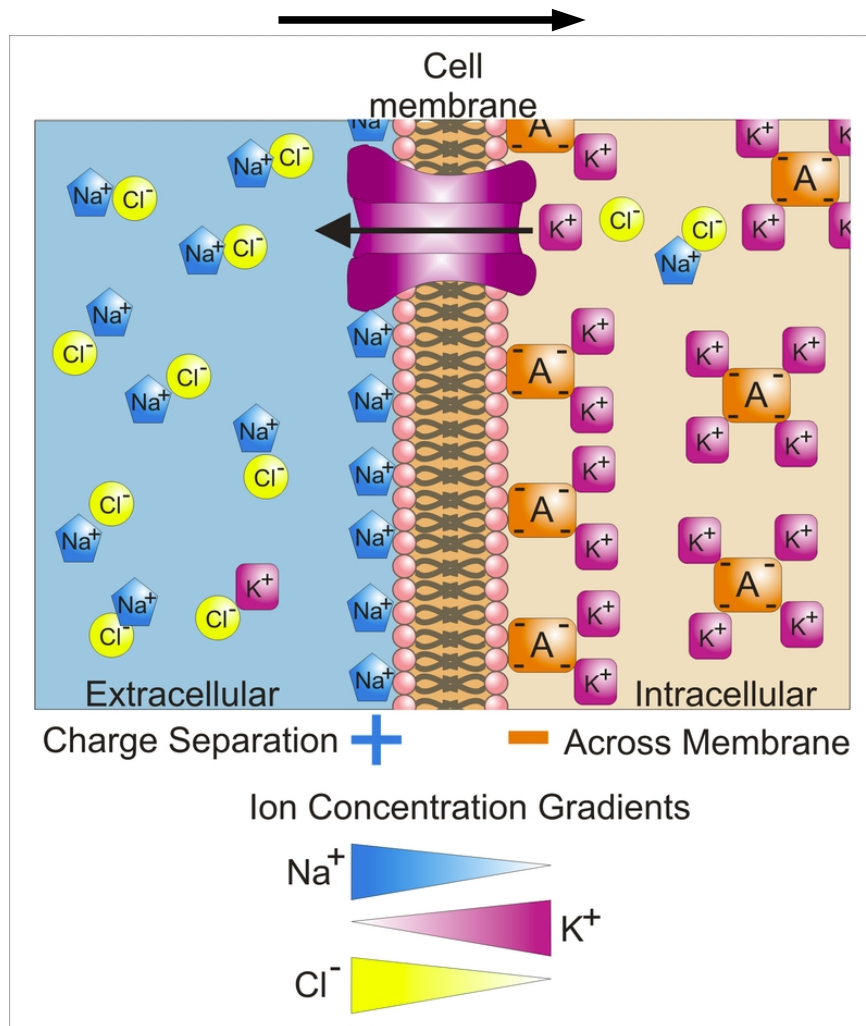
$$[K^+]_{ext} = 4mM/L$$

$$[Na^+]_{ext} = 142mM/L$$

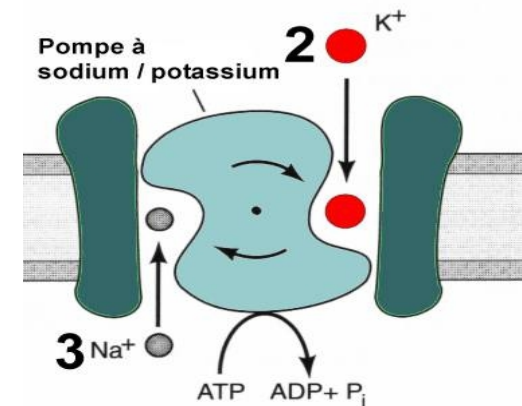
Plus de K<sup>+</sup> en intra et plus de Na<sup>+</sup> en extra

# Le potentiel de repos

$$V = V_{int} - V_{ext} \approx -70mV \sim E_{K^+}$$

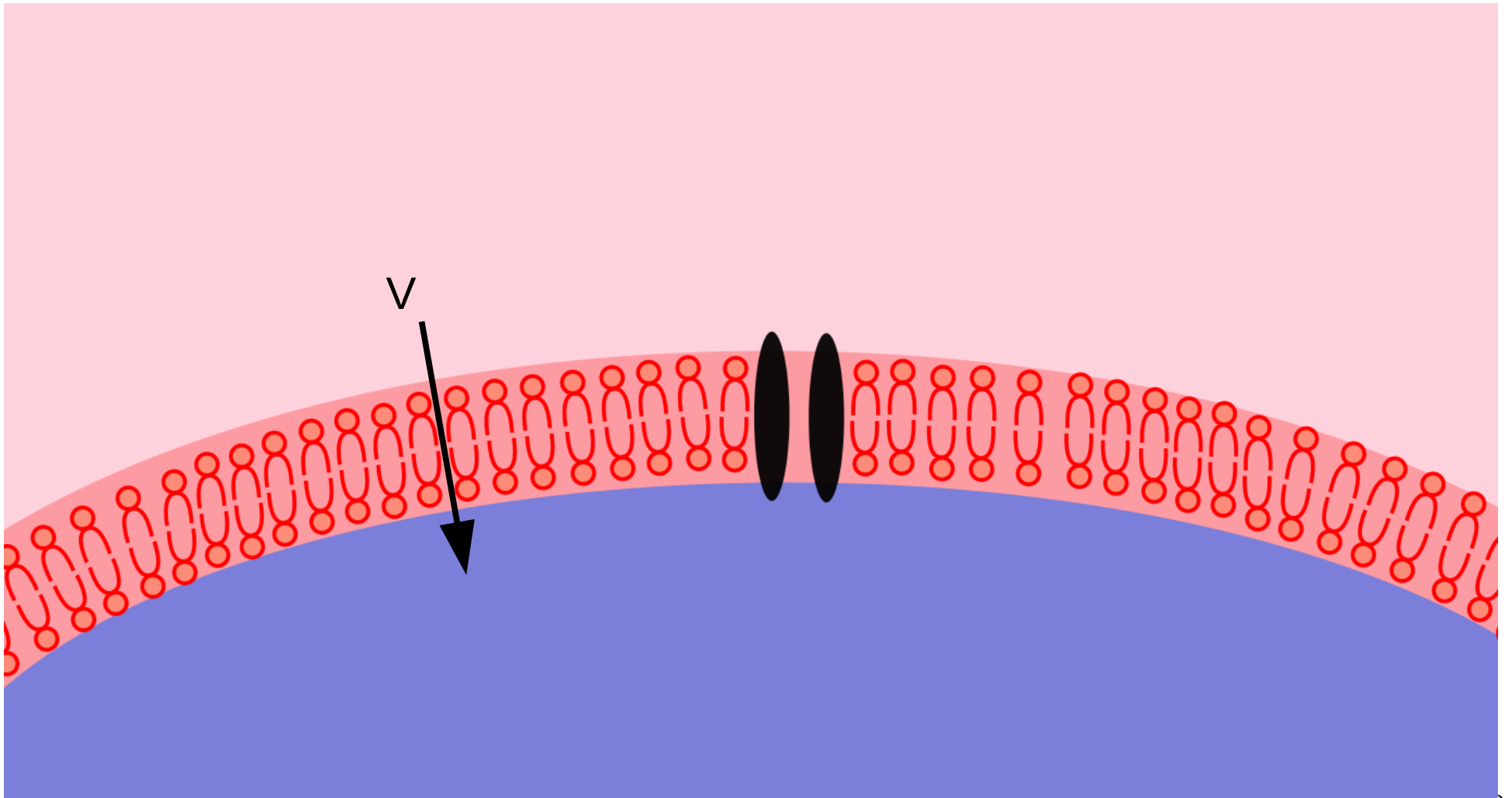


Les pompes sodim-potassium permettent de préserver le gradient de concentration



Plus de  $K^+$  en intra et plus de  $Na^+$  en extra

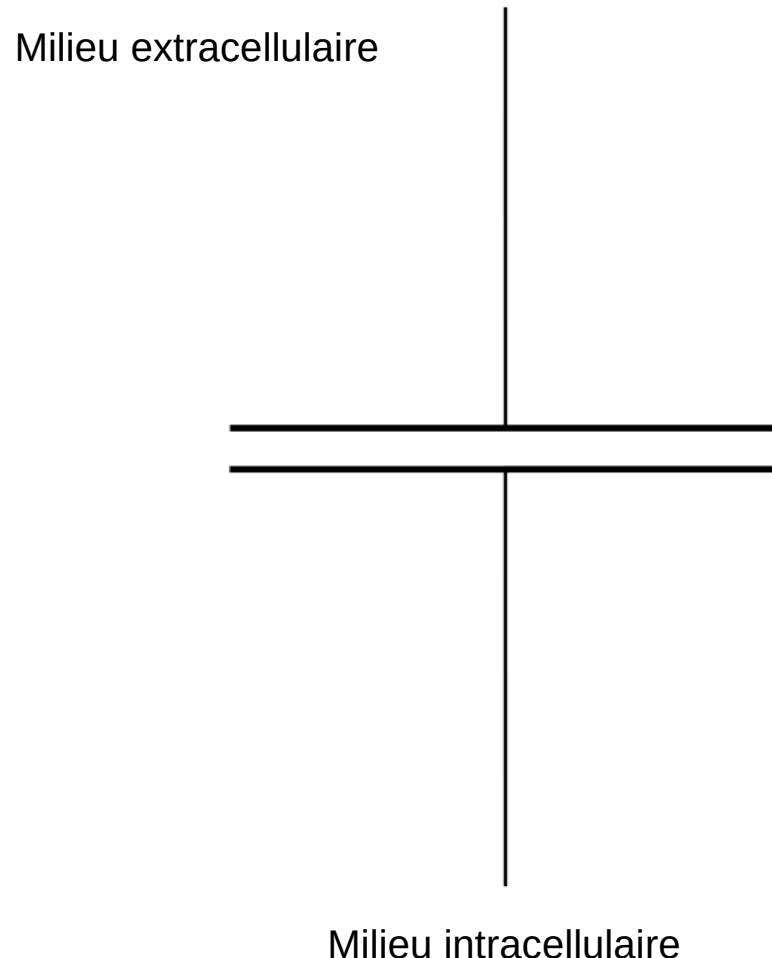
# Modélisation de la dynamique du potentiel de membrane ( $V$ ) autour du potentiel de repos



# Modélisation de la dynamique du potentiel de membrane autour du potentiel de repos

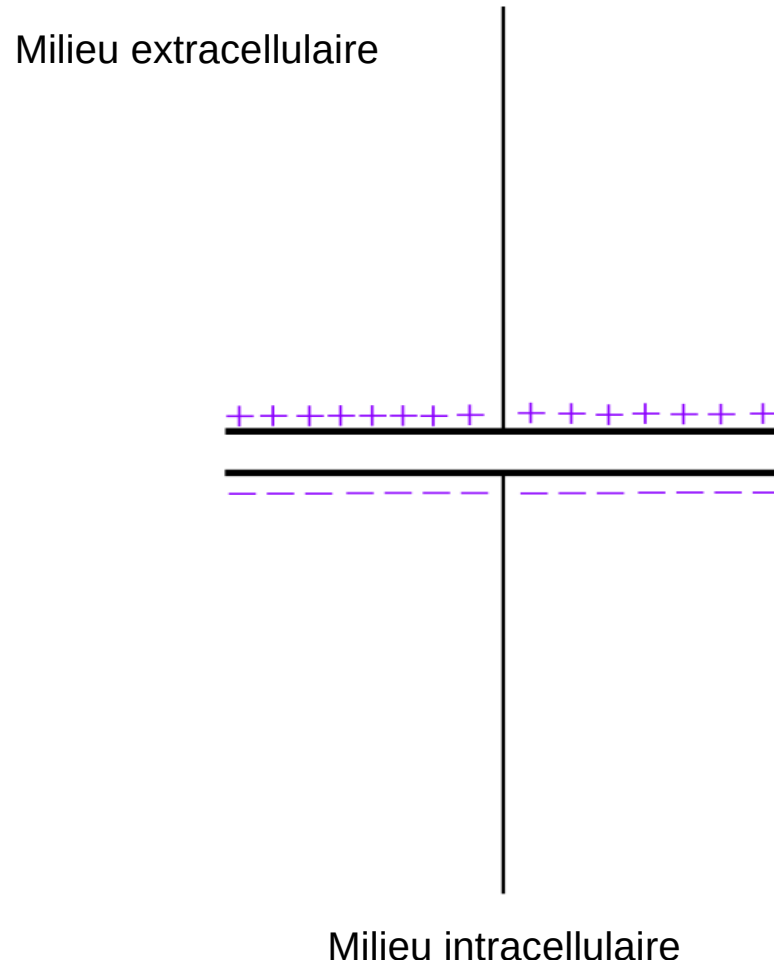
*Première partie:*

La membrane se comporte comme un isolant et a des propriétés **capacitives**, c'est à dire pouvant **stocker des charges**



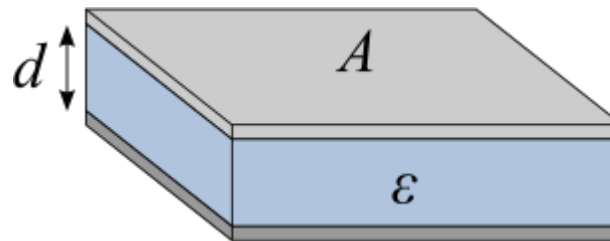
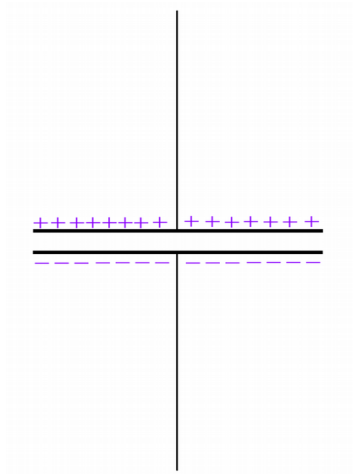
# Modélisation de la dynamique du potentiel de membrane autour du potentiel de repos

La membrane se comporte comme un isolant et a des propriétés **capacitives**, c'est à dire pouvant **stocker des charges**



# Modélisation de la dynamique du potentiel de membrane autour du potentiel de repos

La membrane se comporte comme un isolant et a des propriétés **capacitives**, c'est à dire pouvant **stocker des charges**



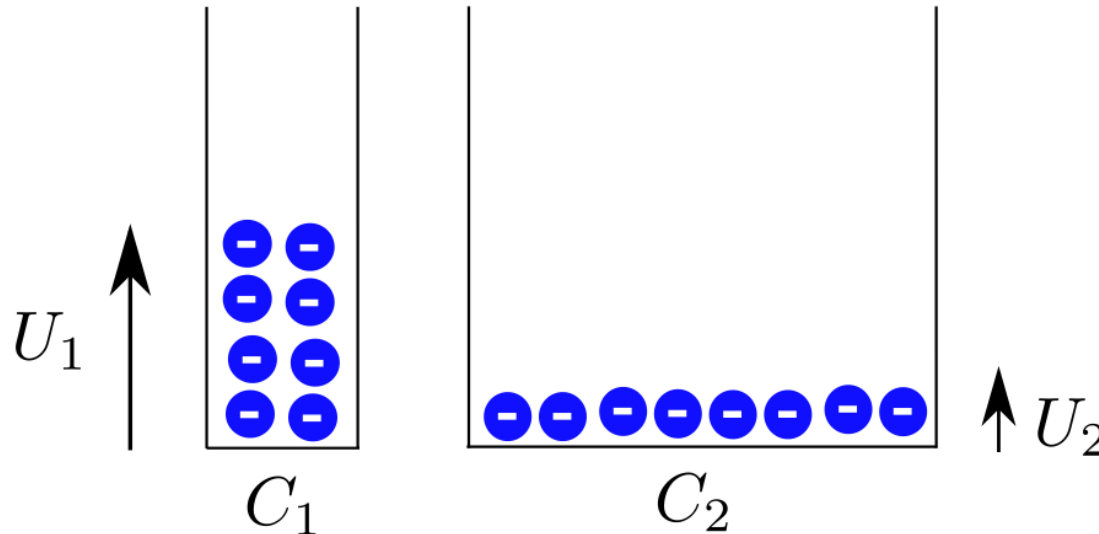
$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \cdot \frac{A}{d}$$

# Modélisation de la dynamique du potentiel de membrane autour du potentiel de repos

$$Q = CU$$

Q: charge accumulée

U: différence de potentiel entre les deux surfaces



$$U = \frac{Q}{C}$$

"hauteur" =  $\frac{\text{aire}}{\text{base}}$

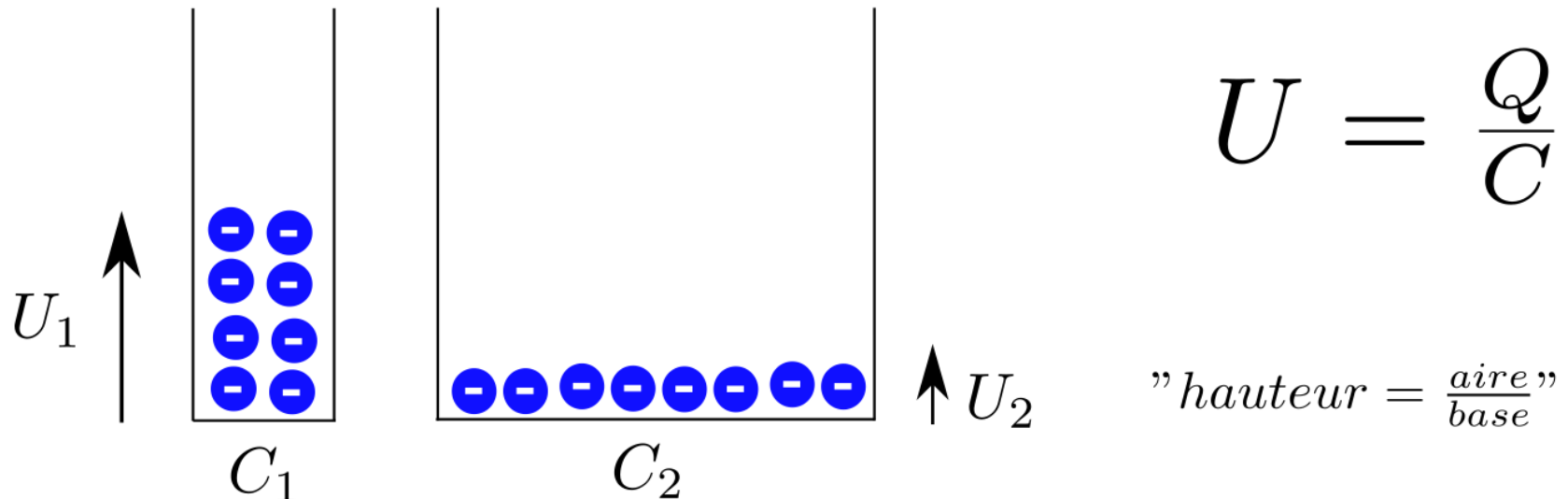


# Modélisation de la dynamique du potentiel de membrane autour du potentiel de repos

$$Q = CU$$

Q: charge accumulée

U: différence de potentiel entre les deux surfaces



Une très forte capacitance aura besoin de beaucoup de charges pour atteindre une variation de potentiel donnée

# Modélisation de la dynamique du potentiel de membrane autour du potentiel de repos

Q: charge accumulée

U: différence de potentiel entre les deux surfaces

$$Q = CU$$

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt}$$

La capacitance impose une dynamique à la variation du potentiel de membrane: le courant qui circule à travers la membrane résulte seulement des variations temporelles de la différence de potentiel.

# Modélisation de la dynamique du potentiel de membrane autour du potentiel de repos

Q: charge accumulée

U: différence de potentiel entre les deux surfaces

$$Q = CU$$

$$i = \frac{dQ}{dt} = C \frac{dU}{dt}$$

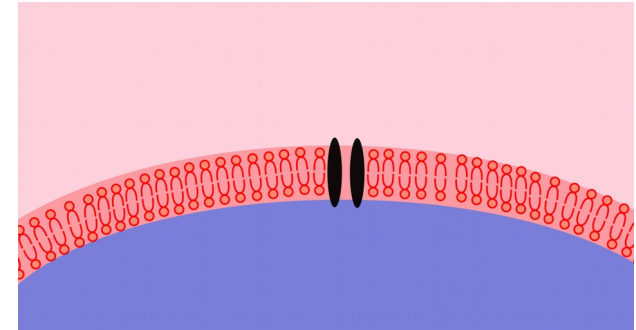
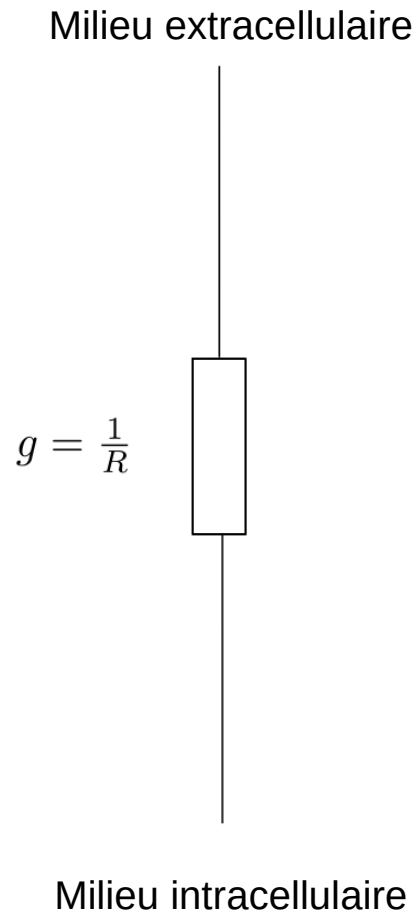
La capacitance impose une dynamique à la variation du potentiel de membrane: le courant qui circule à travers la membrane résulte seulement des variations temporelles de la différence de potentiel.

Dans une résistance c'est différent, le courant et la tension sont tout simplement proportionnels

$$i = \frac{U}{R}$$

# Modélisation de la dynamique du potentiel de membrane autour du potentiel de repos

*Deuxième partie:*

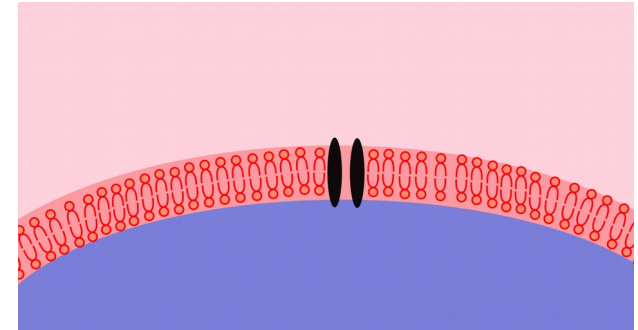
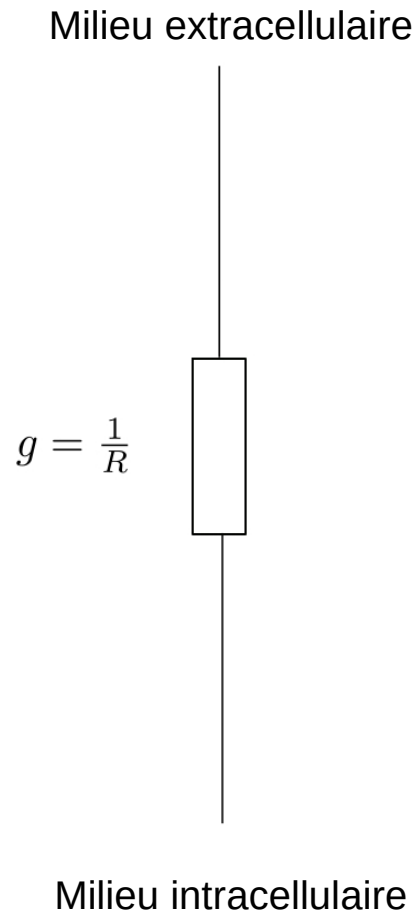


Les canaux ioniques de fuite sont modélisés comme une simple résistance.  
On utilise souvent le terme **conductance**  $g$  pour désigner l'inverse de la résistance.

La perméabilité  $P$  et la conductance  $g$  sont deux notions proches, mais qui sont différentes !

# Modélisation de la dynamique du potentiel de membrane autour du potentiel de repos

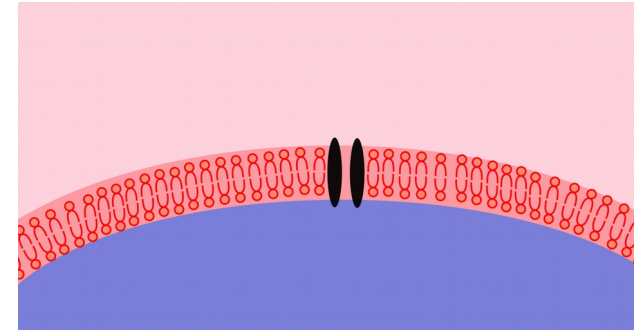
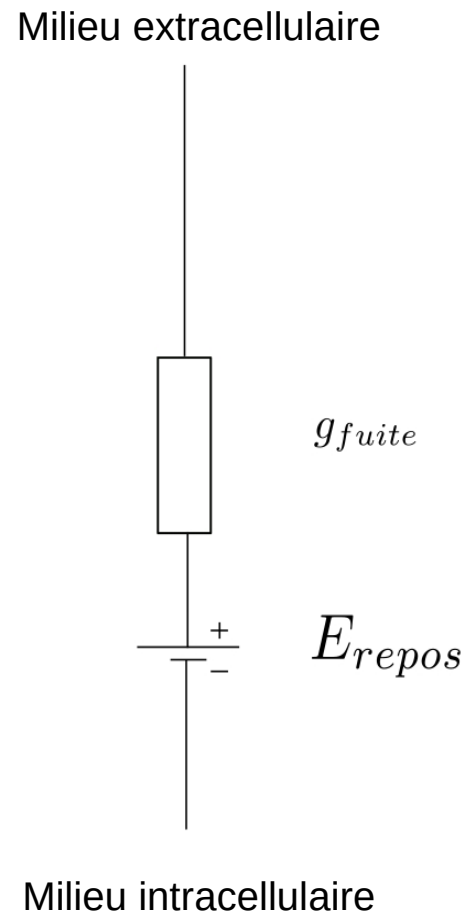
*Deuxième partie:*



Cependant, au potentiel de repos, le courant est nul, et donc en vertu de la loi d'Ohm ( $U = RI$ ) la différence de potentiel entre le milieu intra et extracellulaire devrait être nulle !

# Modélisation de la dynamique du potentiel de membrane autour du potentiel de repos

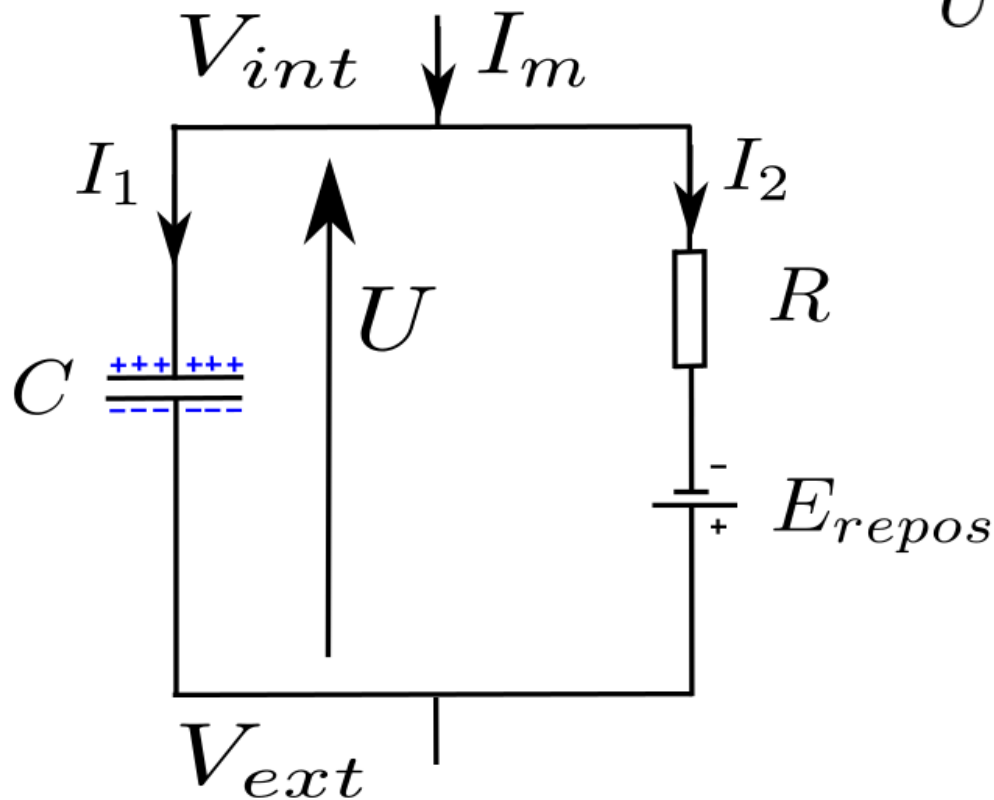
*Deuxième partie:*



On modélise donc les canaux ioniques et l'équilibre électro-chimique comme une conductance en série avec une source de tension

# Modélisation de la dynamique du potentiel de membrane autour du potentiel de repos

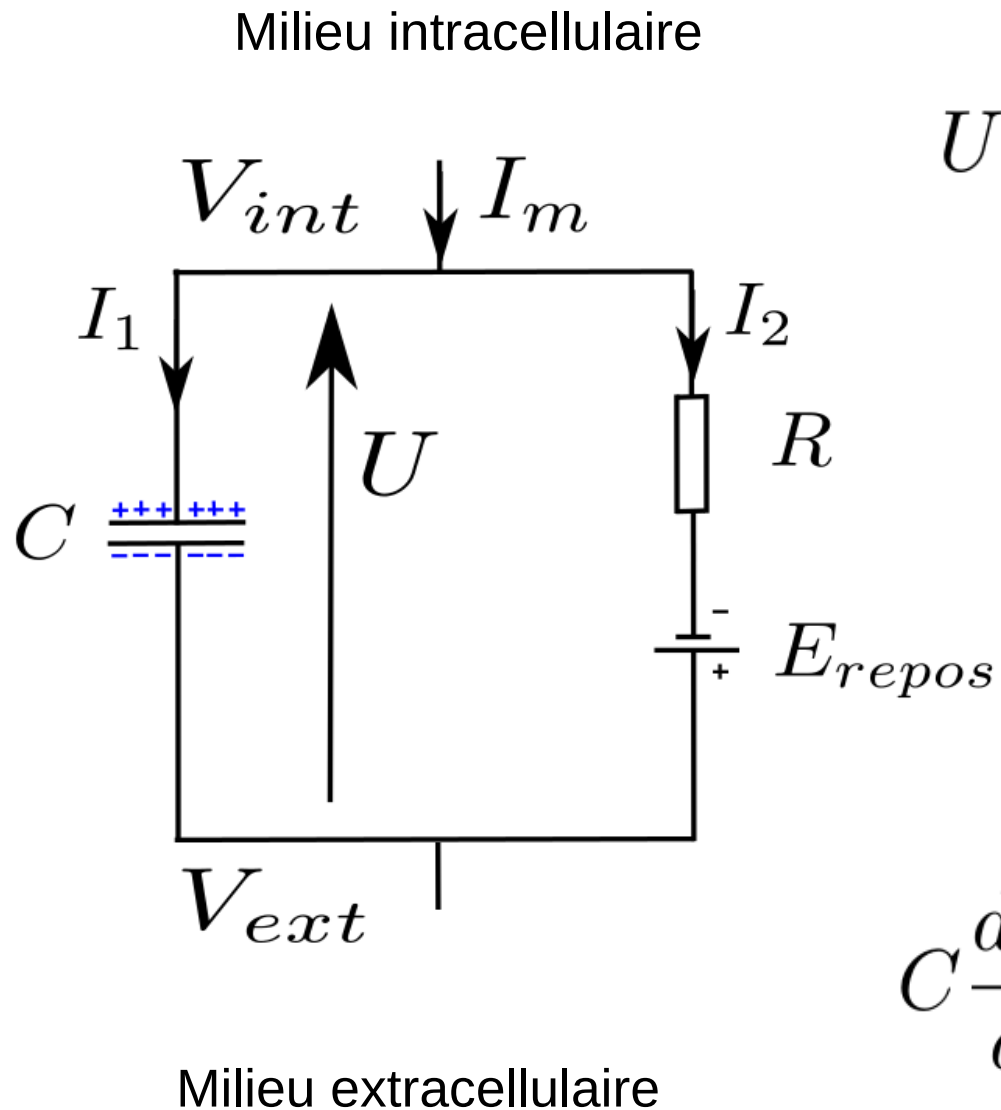
Milieu intracellulaire



Milieu extracellulaire

$$U = E_{repos} + RI_m - RC \frac{dU}{dt}$$

# Modélisation de la dynamique du potentiel de membrane autour du potentiel de repos



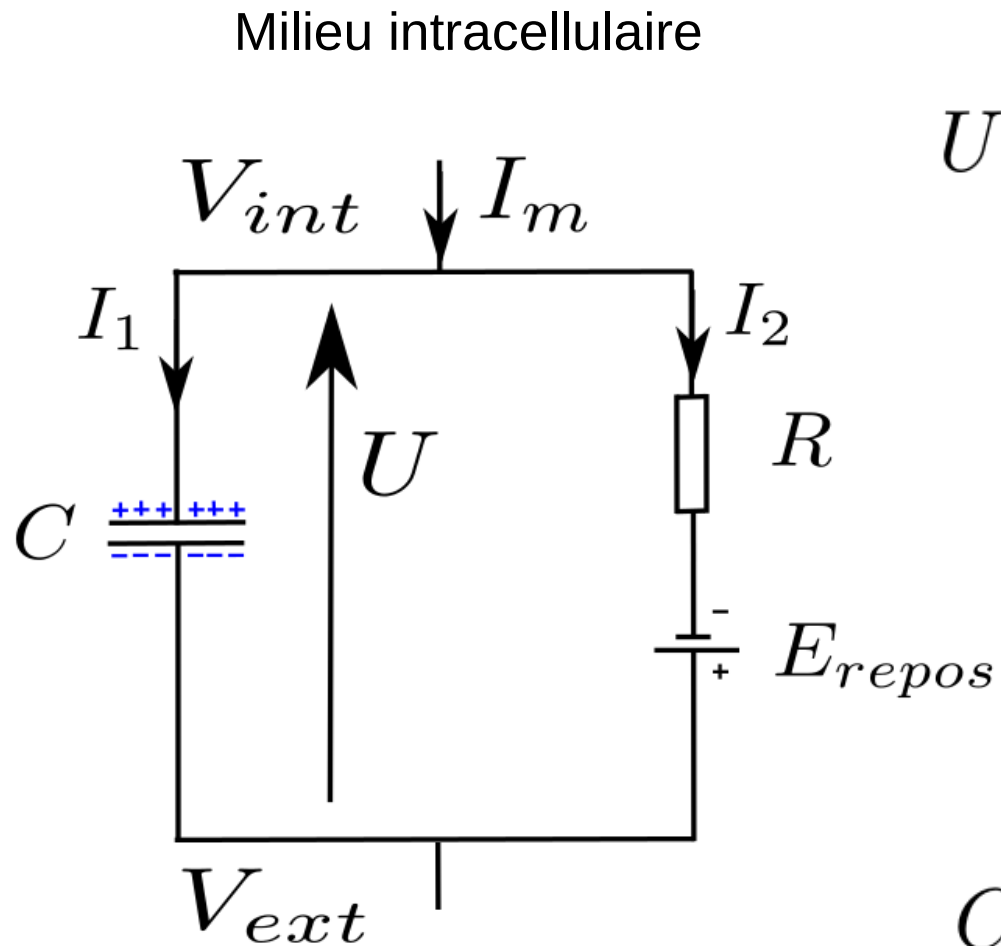
$$U = E_{repos} + RI_m - RC \frac{dU}{dt}$$

$$g = \frac{1}{R}$$

$$C \frac{dU}{dt} = -g(U - E_{repos}) + I_m$$



# Modélisation de la dynamique du potentiel de membrane autour du potentiel de repos

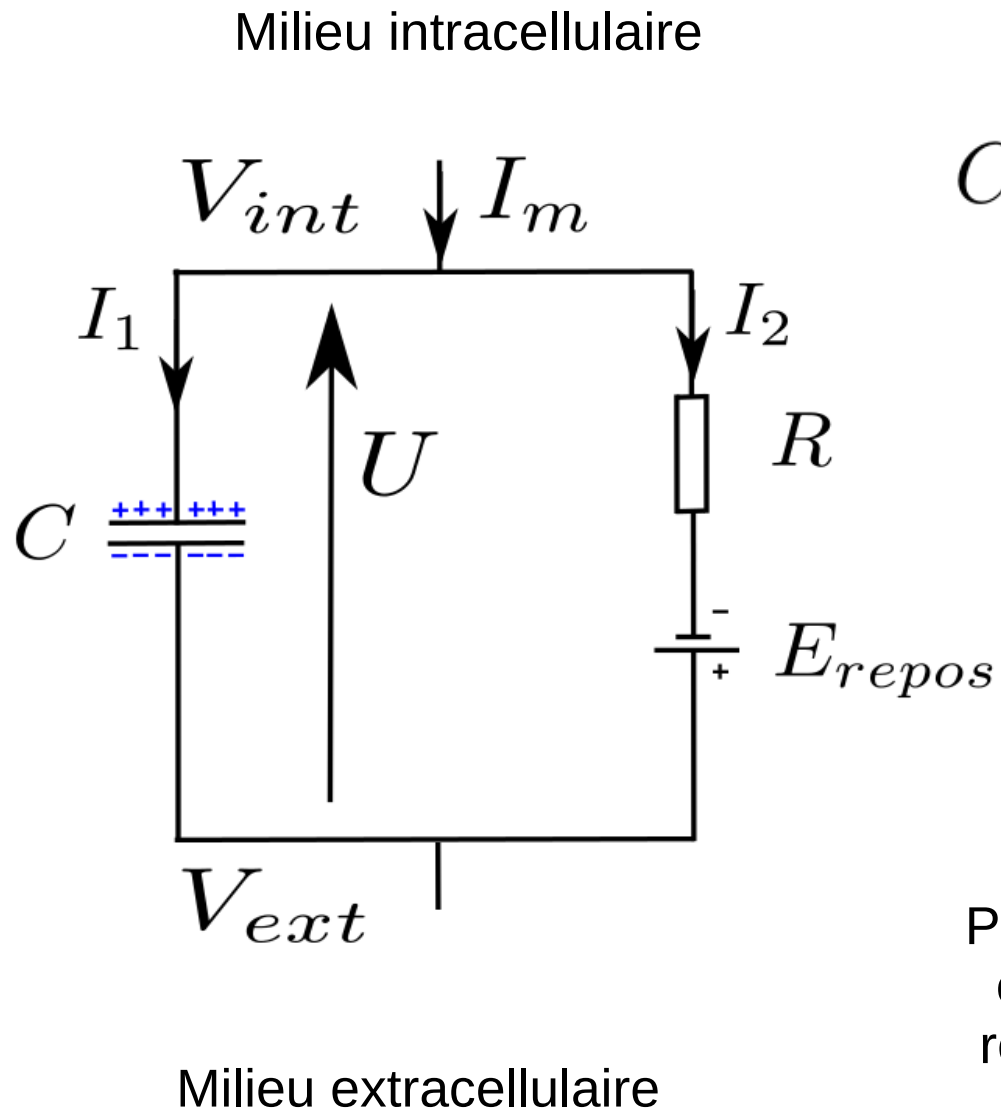


$$U = E_{repos} + RI_m - RC \frac{dU}{dt}$$

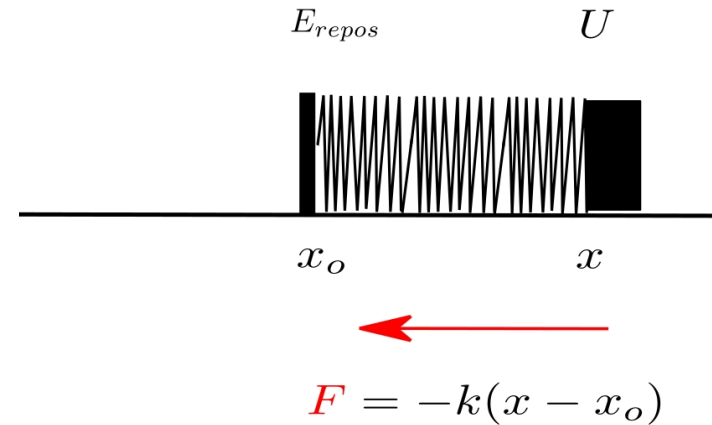
*Variation de potentiel =  
Somme de courants*

$$C \frac{dU}{dt} = -g(U - E_{repos}) + I_m$$

# Modélisation de la dynamique du potentiel de membrane autour du potentiel de repos

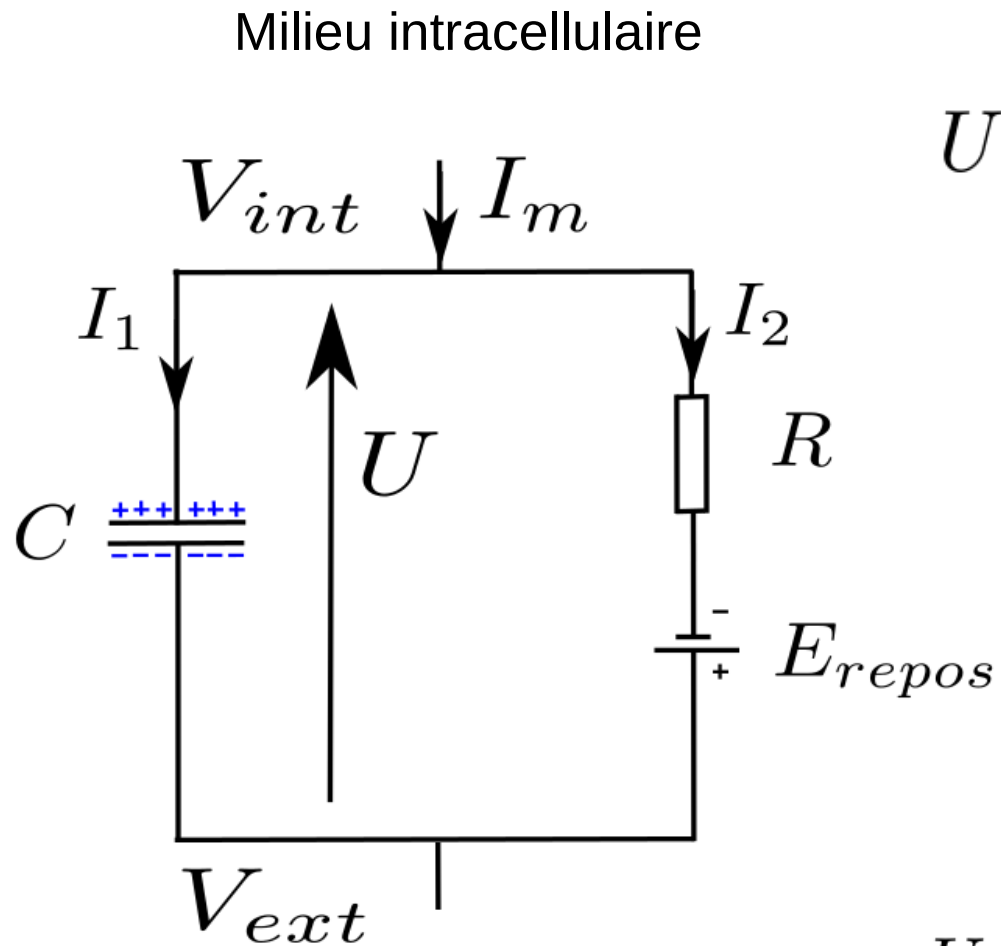


$$C \frac{dU}{dt} = -g(U - E_{repos}) + I_m$$



Plus la position (le potentiel de membrane) est loin de la position (potentiel) de repos, plus la force (les courants) est forte.

# Modélisation de la dynamique du potentiel de membrane autour du potentiel de repos



$$U = E_{repos} + RI_m - RC \frac{dU}{dt}$$

Solution analytique  
(avec condition initiale) :

$$U_{(t)} = RI_m e^{\frac{-t}{RC}} + E_{repos} + R \cdot I_m$$

# Dynamique du neurone autour du potentiel de repos

