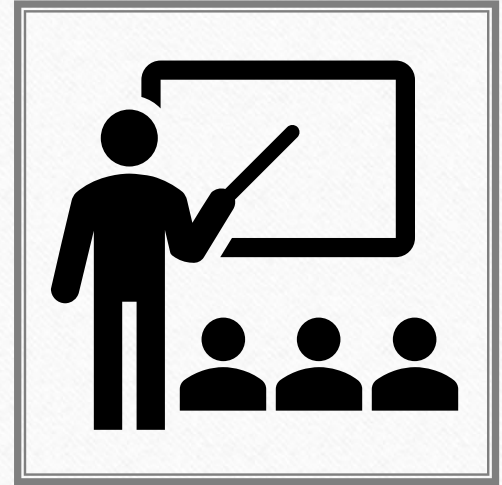


POTENTIEL ÉLECTRIQUE ET COURANTS OSMOTIQUES

OSMOTIQUES
ET COURANTS



PLAN DU COURS

I/ Molécules ionisées et courants osmotiques

- A) Courant électrique et courants osmotiques
- B) Relation de Nernst

II/ Conductance membranaire

- A) Patch clamp
- B) Exemple des propriétés du canal sodique épithélial

III/ Potentiel électrique transmembranaire

- A) Electroneutralité des liquides biologiques
- B) Mouvements des charges
- C) Polarisation membranaire électrique

IV/ Les transporteurs moléculaires

- A) Différentes sortes de transporteurs moléculaires
- B) Les différents modes de transport

V/ Les épithéliums

- A) Définition
- B) Structure – Fonction
- C) Exemples

L'organisme à grande échelle

Compartimentation de l'organisme

Les milieux liquides

Le milieu aérien pulmonaire

Mesures de grandeurs

Force hydrostatique

L'organisme à « moyenne échelle »

Composition des milieux

Substances dissoutes

Substances chargées

Mesures de grandeurs

Forces osmotique

et électrique

L'organisme à petite échelle

Dynamique des milieux

Oxydation des nutriments

Mesures de grandeurs

Energie libre

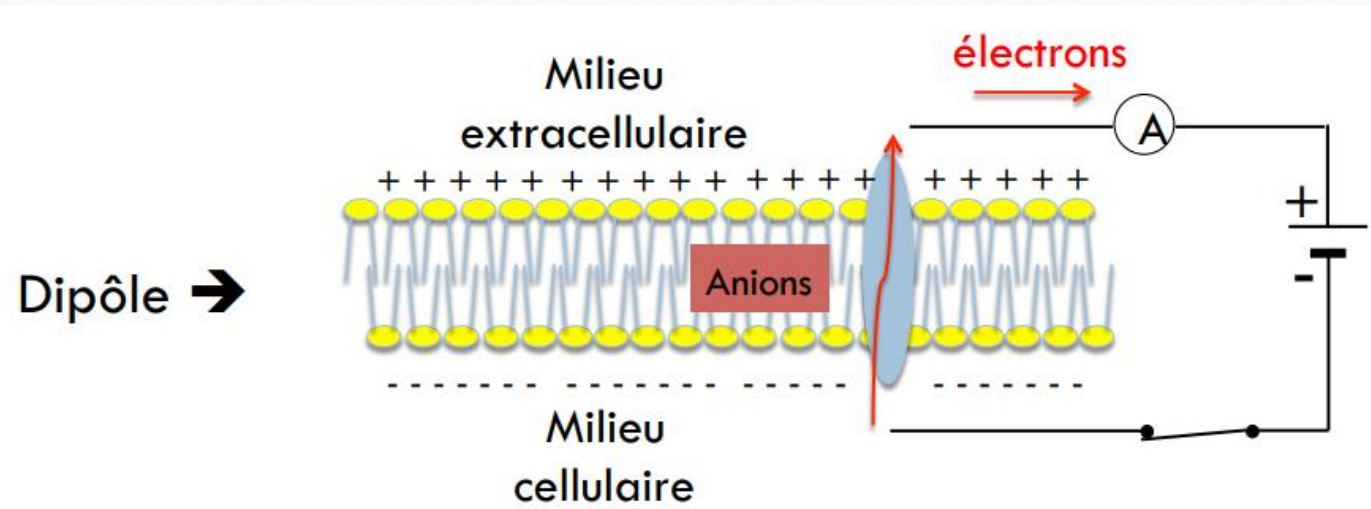
Pourquoi parler d'électricité ?

- Les **phénomènes électriques** sont **aussi importants** que les **phénomènes chimiques**.
- Les ions en solutions sont comparables à **des électrons**, ils créent des **courants osmotiques** par leurs mouvements.
- Les ions en solution sont comparables à **des électrons dans un métal conducteur d'électricité**.
- **Le potentiel électrique est proportionnel à la charge et la mobilité d'une molécule, mais aussi à l'intensité du champ électrique.** ♥💣
- Le champ électrique est **homogène** au niveau de la **membrane plasmique**.
- La molécule chargée va **diffuser du côté où les charges opposées prédominent** (⇒ donc selon son **potentiel électrique**).

I/ Molécules ionisées et courants osmotiques

A) Courant électrique et courants osmotiques

On peut considérer
ce montage
comme un circuit
électrique :



- **Un générateur de courant** : délivre un potentiel électrique.
- **Un dipôle** correspond à un appareil électrique animé par le courant (ex une ampoule).
- **Un ampèremètre** : enregistre le champ magnétique lors du passage du courant.

Les courants en biophysique = infimes donc on utilise des ampèremètres ultrasensibles appelés **galvanomètres**.

Etude des courants osmotiques : **Dipôle = membrane plasmique + protéines transmembranaires**

Les paramètres et la loi d'Ohm

	Courant électrique	Courant ionique
Porteurs de charges	Électrons	Ions (anions et cations)
Potentiel Electrique (Volt)	Quantité d'électrons en 1 point du conducteur	Quantité d'ions en 1 point du conducteur (potentiel chimique)
Intensité (Ampère)	Quantité de charges passant en 1 point d'un conducteur par unité de temps	
Conductance (Siemen)	Facilité de mobiliser une charge dans un conducteur	
Nature de la conductance	Câble métallique	Membrane plasmique et transporteur moléculaire

La loi d'Ohm

$$\text{Loi d'Ohm} \rightarrow \frac{\text{Intensité}}{\text{Potentiel électrique}} = \text{Conductance}$$

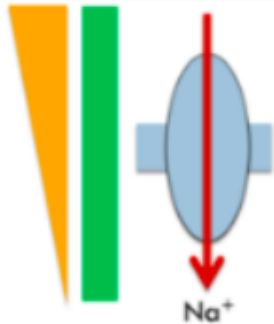
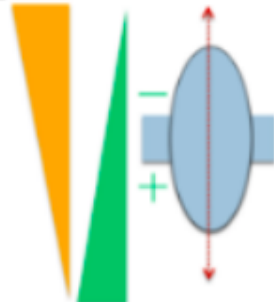
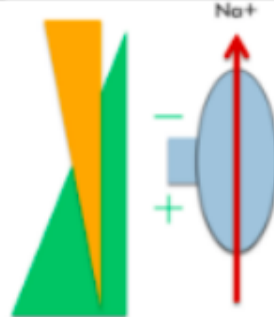
- ❖ INTENSITÉ : nb d'électrons qui traversent en unité de temps (en A)
- ❖ POTENTIEL : Quantité d'ion ou d'électron qui s'accumule en un point (en V)
- ❖ CONDUCTANCE : Facilité de mobiliser une charge dans un circuit
- ↳ Sens des électrons : sens inverse du courant électrique

B- RELATION DE NERNST

- ♥ Le potentiel chimique équilibre le potentiel électrique d'une osmole électriquement chargée en solution. La somme des deux est nulle. ♥💣
- Les **osmoles électriquement chargées** vont donc se répartir de part et d'autre d'une membrane **selon leur différence de potentiel chimique et électrique**.

$$\text{Potentiel électrique} + \text{potentiel chimique} = 0$$

Modélisation de la loi

	<ul style="list-style-type: none">- Pas de différence de potentiel électrique.- Le Na diffuse <u>uniquement</u> selon son potentiel chimique.
	<ul style="list-style-type: none">- Potentiel chimique = Potentiel électrique.- L'osmole chargée diffuse <u>selon les 2</u> potentiels.- Autant de passage de chaque côté de la membrane.
	<ul style="list-style-type: none">- Potentiel électrique > Potentiel chimique- Le Na <u>inverse</u> son sens de diffusion.

Le potentiel chimique équilibre le potentiel électrique d'une osmole électriquement chargée en solution. ♥💣*♥

II/ CONDUCTANCE MEMBRANAIRE

A) PATCH CLAMP

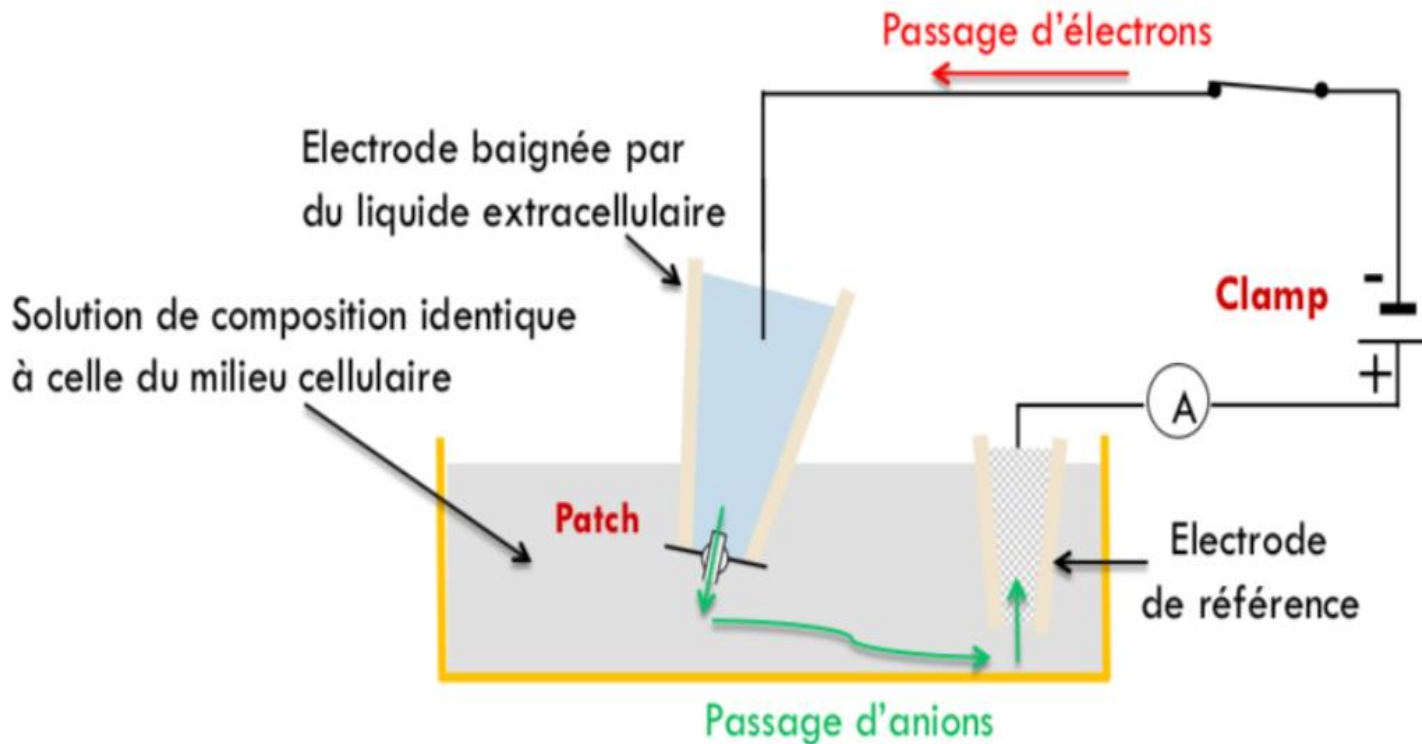


Schéma simplifié du montage

- **Patch** : Fixation d'un fragment de membrane plasmique (avec les protéines transmembranaires) à l'extrémité d'une pipette de verre.
- **Clamp** : Mise sous tension du circuit car on définit la différence de potentiel électrique que l'on veut appliquer (= Clampage = Voltage).
- ♥ Ce système permet d'analyser et de mesurer des courants électriques à l'intérieur des membranes plasmiques.

Clamp et intérêt du patch

Mesurée avec
un ampèremètre

$$\frac{\text{Intensité}}{\text{Voltage}} = \text{Conductance}$$

Clampé

Calculée

La loi d'Ohm s'applique au circuit : On peut **CALCULER** la conductance de la protéine transmembranaire car on a **IMPOSÉ=CLAMPÉ** le potentiel électrique et qu'on **MESURE** l'intensité électrique.

❖ La loi d'ohm s'applique au circuit membranaire.

♥ La conductance nous renseigne sur **la nature des transporteurs membranaires** : une forte conductance signifie une forte perméabilité et vice versa.

↪ Il existe des protéines transmembranaires permettant la diffusion facilitée des osmoles chargées ou non.

D'après la loi d'Ohm une intensité faible en présence d'un voltage fort révèle une **faible conductance à cause de** :

- L'absence de protéines transmembranaires
- La conformation fermée des protéines transmembranaire.

→ **Le patch clamp révèle les propriétés physiques des protéines transmembranaires en conformation ouverte.** ♥

B) Exemple des propriétés du canal sodique épithélial:

Canal sodique épithélial = protéine transmembranaire permettant la diffusion facilitée du sodium.

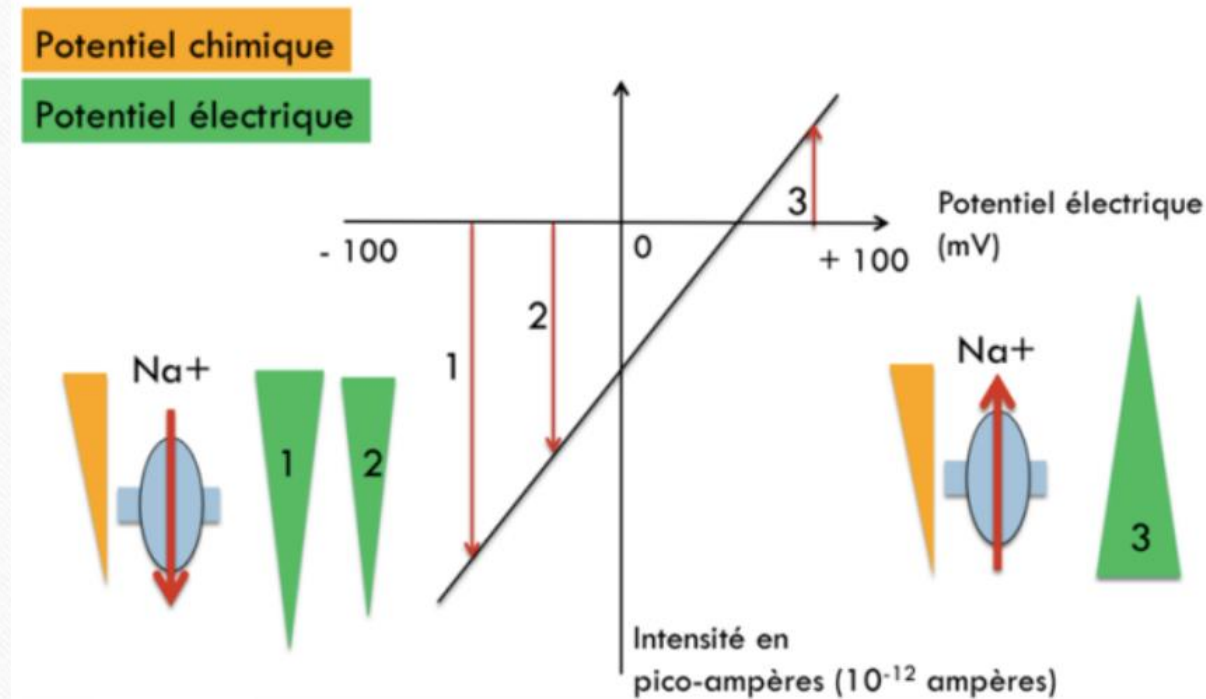
→ *Présent dans les poumons et reins pour réguler la volémie.*

Propriétés étudiées par le patch clamp:

- ❖ **CONDUCTANCE :** on a clampé/imposé le voltage et mesuré l'intensité, on la calcule à 4 pS (pico Siemens).
- ❖ **RELATION TENSION VOLTAGE :** on fait varier le potentiel électrique (voltage) pour analyser la variation d'intensité (ampérage).

- 1) On applique un potentiel électrique important dans le même sens que le potentiel chimique
- 2) On applique un potentiel électrique un peu moins important mais toujours dans le même sens, l'intensité est donc moins importante
- 3) On applique un potentiel électrique important, mais cette fois dans le sens inverse (positif) du potentiel chimique. Le courant électrique est d'intensité faible et de sens inverse par rapport au 1) et 2).

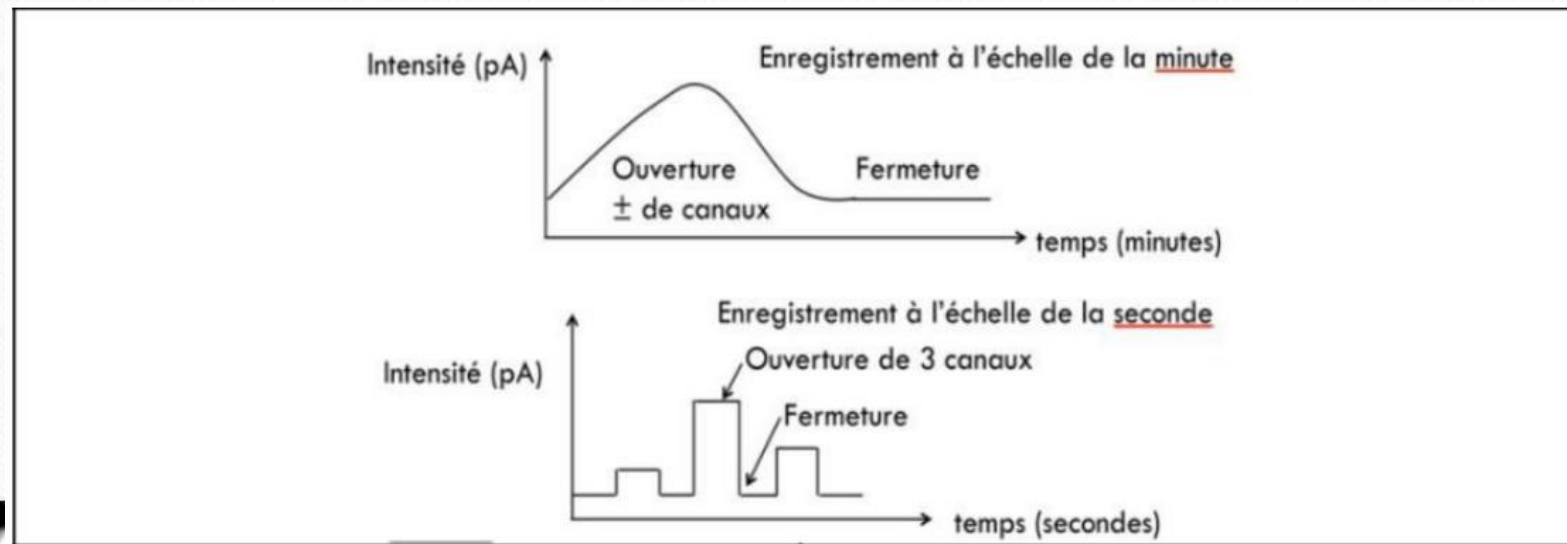
➔ **Attention, la relation intensité-voltage n'est pas forcément linéaire !**



❖ **SPECIFICITE IONIQUE** : si on met un autre ion que le sodium dans le montage du patch clamp, on observe aucune variation de la relation intensité/voltage quel que soit le clamping. En présence de sodium dans la solution, un courant osmotique se crée. Donc le canal possède bien une spécificité ionique.

❖ **OUVERTURE DU CANAL** :

- **A l'échelle de la minute** : L'intensité mesurée varie selon l'ouverture des canaux → **Plus les canaux sont ouverts, plus l'intensité est importante**
- **A l'échelle de la seconde** : marches d'escalier dont la hauteur va être proportionnelle à l'intensité du courant. On peut en déduire le nombre de canaux ouverts → **Mesure du courant unitaire.**



❖ DUREE ET PROBABILITE D'OUVERTURE:

$$\text{Pr obabilité d' ouverture} = \frac{\text{Temps d' ouverture}}{\text{Durée d' enregistrement}}$$

⇒ Le temps d'ouverture correspond à la largeur des escaliers.

Petit récap des caractéristiques du canal sodique épithélial:

	Relation intensité-voltage	Sélectivité ionique	Conductance pour le sodium	Durée d'ouverture	Probabilité d'ouverture
Canal sodique épithélial	linéaire	Sodium (lithium)	4 à 5 pS	1 seconde	0,5

III/ Potentiel électrique transmembranaire :

A) Electroneutralité des liquides biologiques:

	Côté interne de la membrane chargé -	Côté externe de la membrane chargé +
Na ⁺	10 mmol/L	144 mmol/L
K ⁺	160 mmol/L	4 mmol/L
Cl ⁻	6 mmol/L	114 mmol/L
Cations	212 meq/L	153 meq/L
Anions	212 meq/L	153 meq/L
Bilan de charges	nul	nul

→ Asymétrie de concentration ≠ Asymétrie de charges électriques :

- ♥ Le K^+ est le principal cation **intracellulaire**, le Na^+ est le principal cation **extracellulaire**.
- ♥ Cependant, **le bilan des charges** est nul et les 2 milieux sont considérés électriquement neutres.

→ Mais alors pourquoi existe-t-il une polarisation de la membrane plasmique (intracellulaire - et extracellulaire +) ?

- ♥ Une différence de potentiel électrique entre 2 milieux liquides séparés par une membrane atteint **100mV quand 1 ion sur 10^5 ions est réparti de manière asymétrique**. +++
- ♥ Pour **l'électrophysiologie**, le bilan des charges n'est **PAS nul**.
- ♥ Pour les **propriétés osmotiques**, le bilan des charges est **nul** et les 2 milieux sont considérés comme **électroneutres** (cations = anions).

→ Conséquences :

- 💡 Les propriétés électriques des cellules sont liées à des **transferts de charge** ♥
QUANTITATIVEMENT négligeables mais QUALITATIVEMENT importants ♥
- 💡 Rythme cardiaque, péristaltisme intestinal, codage et transmission des signaux dans le système nerveux dépendent des propriétés électriques des cellules.
- 💡 Les phénomènes électriques **peuvent varier énormément en intensité sans compromettre l'équilibre osmotique des cellules.**

B) Mouvements des charges :

→ **RELATION DE NERNST** : En connaissant les concentrations ioniques de part et d'autre de la membrane, on peut calculer le potentiel électrique membranaire. (la formule n'est pas à connaître !)

→ **Potentiel transmembranaire moyen / mesuré au repos = - 80mV**

→ **Conséquences de la relation de Nernst :**

- ✓ **Valeur calculée = valeur mesurée pour un ion** : Cet ion **diffuse librement** et traverse la membrane autant dans un sens que dans l'autre → Il est à l'équilibre
- ✓ **Valeur calculée ≠ valeur mesurée** pour un ion : Le canal ionique correspondant est **peu perméable OU peu ouvert**

APPLICATION AUX IONS PRINCIPAUX

➤ Ion chlore :

- Le potentiel électrique calculé est quasiment égal au potentiel transmembranaire mesuré avec des électrodes (-80mV).
- Le Cl^- est **à l'équilibre**, les canaux **perméables** au chlore sont **ouvert**.

➤ Ion potassium :

- Le potentiel électrique calculé est proche du potentiel transmembranaire mais moins que le chlore (-96mV).
- Les canaux sont **relativement ouverts** et **perméables**.

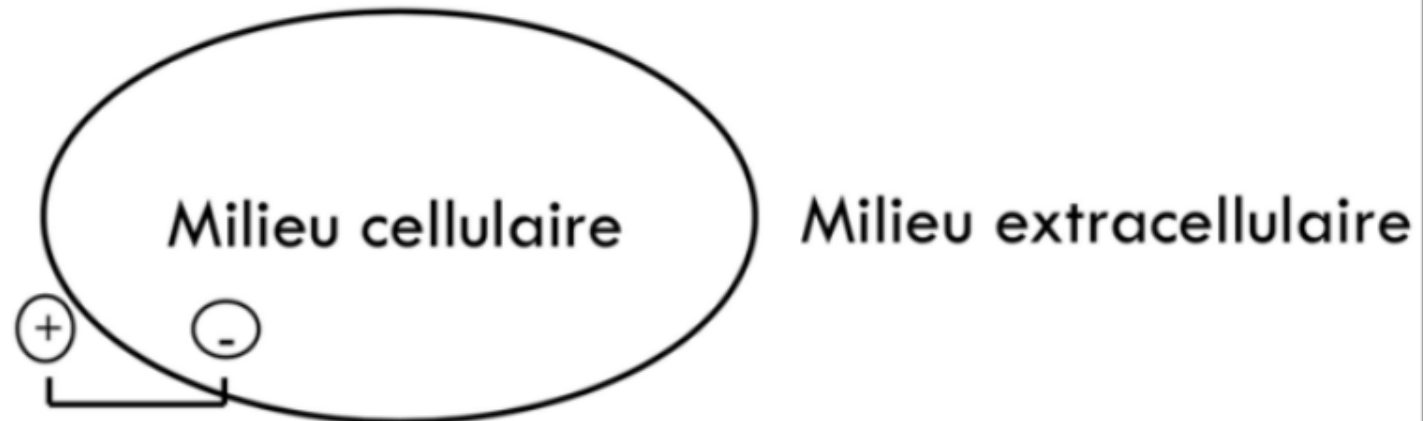
➤ Ion sodium :

- Le potentiel électrique calculé pour le sodium est très éloigné du potentiel mesuré (70 mV)
- Les canaux sont en **conformation relativement fermés**.

➔ Le potentiel électrique calculé pour le potassium est beaucoup plus proche du potentiel transmembranaire mesuré que le potentiel calculé pour le sodium : **les canaux potassiques sont beaucoup plus ouverts que les canaux sodiques.** ♥

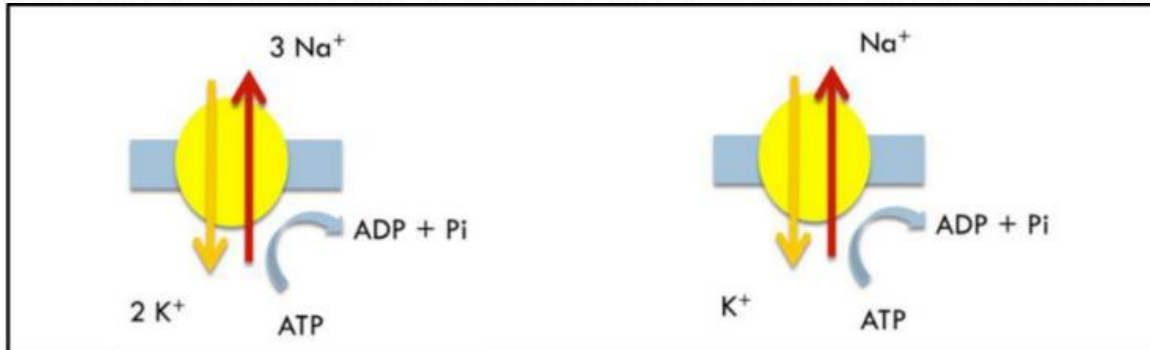
C) Polarisation électrique membranaire:

Potentiel transmembranaire mesuré au repos = - 80 mv



- Quelle est l'origine de ce potentiel électrique transmembranaire ?

Stœchiométrie de la pompe Na/K ATPase ?



Vraie pompe à sodium (3/2)

- Pompe **ubiquitaire** qui consomme de l'**ATP**
- Fait **sortir 3 Na⁺** et **rentrer 2 K⁺**
- Génère une **répartition asymétrique** de ces 2 ions

Fausse pompe à sodium (1/1)

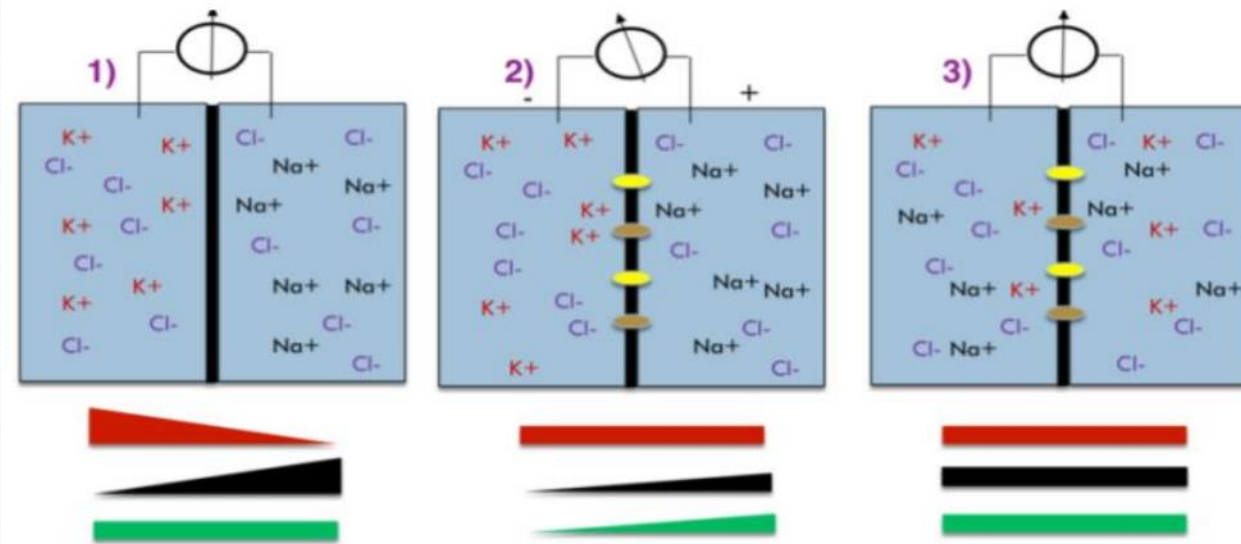
- On observe également une **asymétrie de répartition** pour ces 2 ions

→ Dans les 2 cas :

- L'asymétrie de répartition des 2 ions est assurée
- Mais les 2 côtés de la membrane sont **électroneutres** car la répartition du **Cl⁻** équilibre les charges.

♥ **La stœchiométrie 3/2 de la pompe à sodium n'est PAS suffisante pour expliquer la différence de potentiel électrique transmembranaire ! 💣**

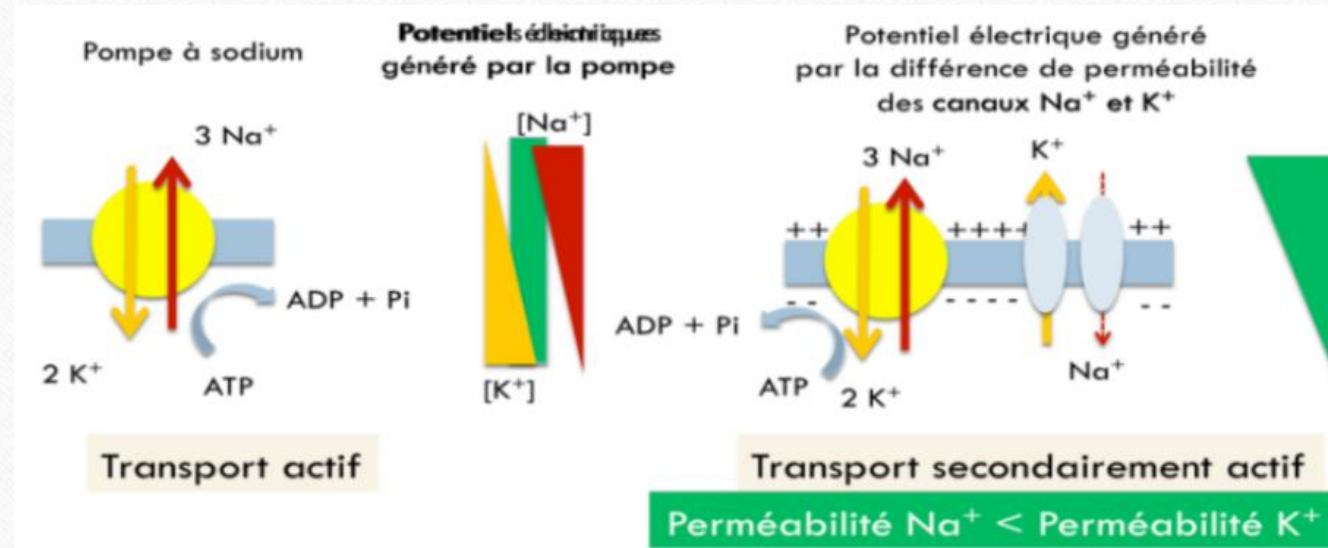
Différence de perméabilité des canaux ioniques ?



→ **Rappel: Perméabilité des canaux potassiques > Perméabilité des canaux sodiques**

- 1) **Au départ**, on a un gradient de concentration du sodium de la gauche vers la droite, un gradient de concentration du potassium de la droite vers la gauche. Le potentiel électrique est nul car **les ions chlore viennent équilibrer les charges**.
- 2) **Ouverture des canaux ioniques** : le potassium diffuse **plus rapidement** pour venir équilibrer ses concentrations de chaque côté de la membrane, contrairement au sodium qui diffuse **moins rapidement** car ils possèdent une perméabilité inférieure. Cela a pour conséquence de créer un potentiel électrique non nul du fait **de l'asymétrie de répartition des charges**.
- 3) **Le sodium fini de diffuser** selon son potentiel chimique. On revient à un potentiel membranaire nul.
 - ♥ **Donc le potentiel électrique est créé par la différence de perméabilité des canaux mais il ne persiste pas dans le temps : il faut l'entretenir . 💣**

CONCLUSION



Les deux mécanismes (canaux et pompe) se complètent.

- A l'étape d'ouverture des canaux ioniques, le transport actif du Na⁺ et du K⁺ par la Na/K ATPase permet de créer une différence de concentration et de MAINTENIR une asymétrie de répartition pour ces 2 ions. Elle crée donc un potentiel chimique qui rend favorable l'entrée du Na et la sortie du K mais ne crée PAS un potentiel électrique. Grâce à cette pompe, l'étape 3 n'intervient donc pas normalement.
- Les canaux sodiques et potassiques (transport secondairement actif) de perméabilité différente font qu'il y a plus de charges + qui sortent que de charges + qui rentrent (donc accumulation de charges + en extracellulaire).

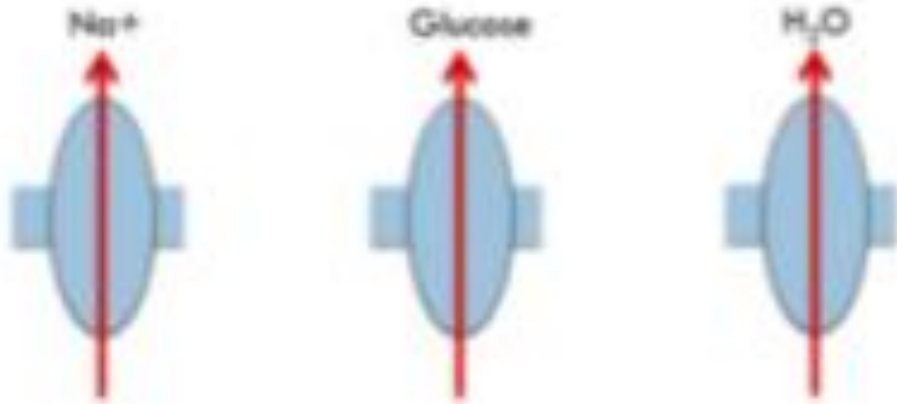
💣 La perméabilité inégale des canaux sodiques et potassiques EXPLIQUE L'EXISTENCE/ LA CREATION de la différence de potentiel électrique au repos.

💣 Le transport actif de Na^+ et K^+ par la Na/K ATPase explique que cette différence de potentiel électrique PERSISTE (en générant constamment un potentiel chimique).

IV / Les transporteurs moléculaires

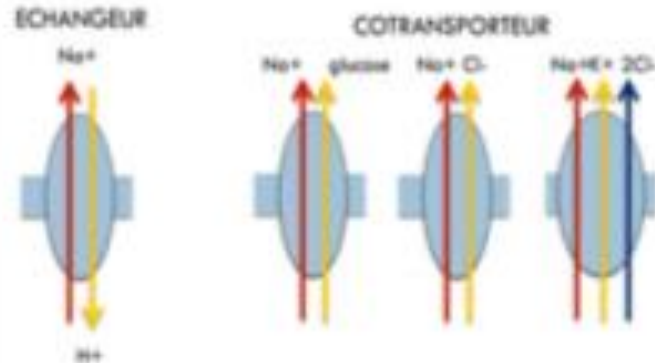
A) Différentes sortes de transporteurs moléculaires

Les canaux simples



- Spécifiques d'une seule molécule
- Passage d'une molécule à la fois
- Uniquement dans un sens
- Ne nécessitent **pas d'énergie** pour fonctionner (ils transportent selon l'effet du gradient de concentration #Darcourt)

Les transporteurs couplés



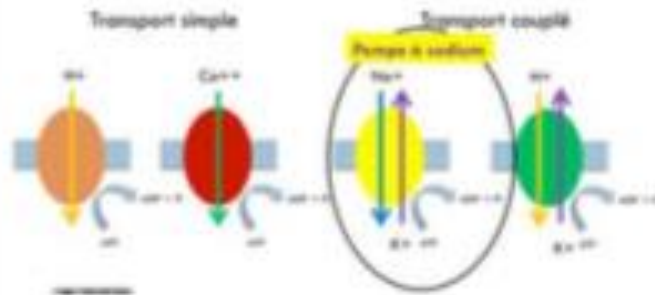
➤ Échangeurs :

- ✓ Transportent 2 molécules différentes en **sens inverse**

➤ Co-transporteurs :

- ✓ Transportent 2 molécules dans le **même sens**
- Il existe une dépendance entre les 2 substances transportées. L'**absence de l'un freine l'absorption de l'autre** +++

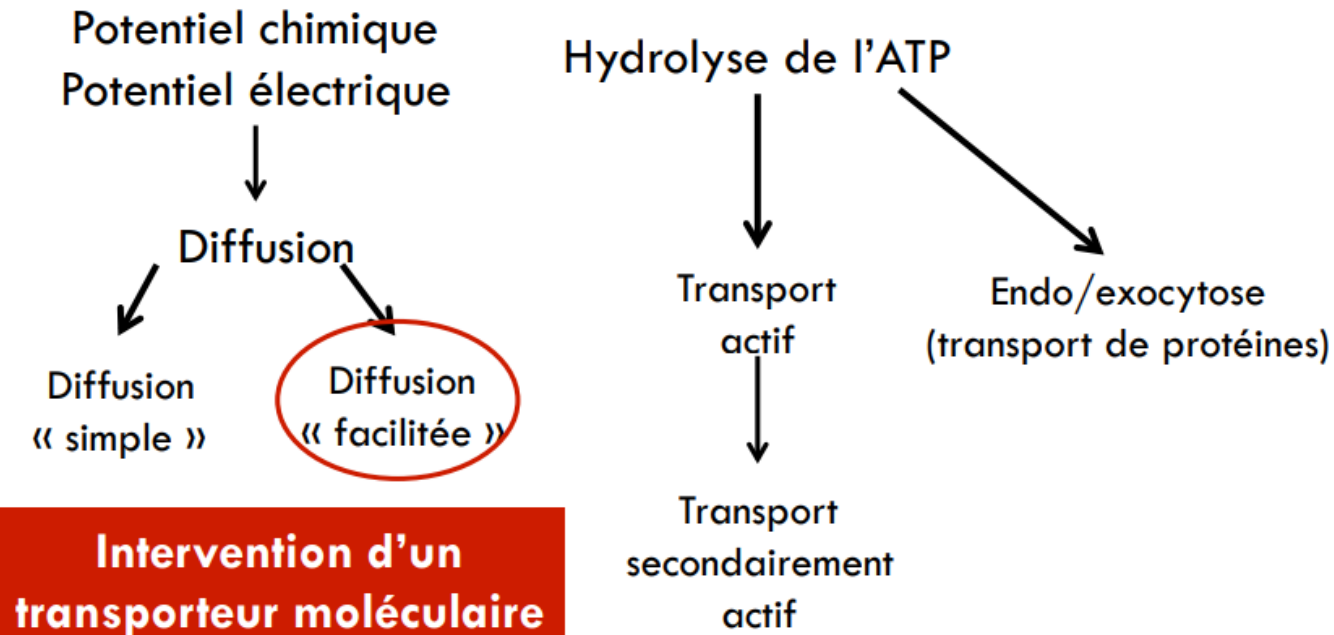
Les pompes



- Peuvent être de transport simple ou de transport couplé
- Ce sont des molécules qui **consommant de l'ATP** pour déplacer des osmoles
- Ex : La fameuse pompe à sodium <3

B) Les différents modes de transport:

Sources d'énergie



→ **Attention : Même si le moteur principal du transport secondairement actif est l'utilisation d'ATP, il utilise secondairement l'énergie du PC/PE pour diffuser.**

→ Transport actif :

- Consomme de l'**ATP**
- Se fait **contre l'effet** du potentiel chimique ou du potentiel électrique

→ Transport secondairement actif :

- Généré par la **conséquence de l'activité d'une pompe / d'un transport actif** (qui consomme de l'ATP);
- Donc le transport actif génère des forces (électriques par ex) qui va avoir une **influence sur les cations et anions** (dans ce cas)

V / Les épithéliums :

A) Définitions:

→ Définition d'un épithélium :

- Couche de cellules posées sur une **lame basale**
- Situé à **l'interface** entre le milieu intérieur et le milieu extérieur

→ 2 fonctions : **Protection** (peau) / **Transport** (rein, intestin, poumon)

→ Rappel : **Milieu extracellulaire (dont le sang) = milieu intérieur**

→ Cellules polarisées :

- **Pôle luminal** : côté milieu **extérieur**
- **Pôle basolatéral** : côté milieu **intérieur**

→ **Les protéines de transport** sont **spécifiquement** destinées au côté luminal ou au côté basolatéral => polarisation

→ **Absorption** = passage d'eau et d'osmoles vers l'intérieur

→ **Sécrétion** = passage d'eau et d'osmoles vers l'extérieur

B) Structure – fonction

PARTICULARITÉ DU TRANSPORT D'OSMOLES DANS LES ÉPITHÉLIUMS

- Les forces osmotiques et électriques sont à l'origine des transports d'osmoles (la pression hydrostatique n'intervient pas)
- Les transports actifs et secondairement actifs existent dans les épithéliums
- Passage des osmoles :
 - Les osmoles passent à travers les 2 membranes plasmiques successivement (transport actif ou secondairement actif)
 - Les osmoles passent entre 2 cellules (voie paracellulaire). La diffusion est soit simple, soit facilitée
- Les variations de composition du cytoplasme des cellules épithéliales sont atténuées par :
 - Des protéines de transport intracellulaire (calcium)
 - La présence simultanée aux 2 pôles de protéines perméables aux mêmes osmoles (pour que le transit soit rapide et que les osmoles ne s'accumulent pas dans la cellule)
 - Le passage d'osmoles dans les espaces intercellulaires (transport paracellulaire par diffusion simple ou facilité par un transporteur)

C) Exemples :

- Sécrétion d'HCL gastrique : pH de l'estomac acide, idéal pour le fonctionnement de la pepsine.
- Sécrétion de bicarbonates dans le duodénum : pH alcalin, idéal pour le fonctionnement de la trypsine et des lipases.



QCMs

QCM 1 : donnez les propositions vraies

- A) Les ions en solutions sont comparables à des électrons, ils créent des courants osmotiques par leurs mouvements.**
- B) Le potentiel électrique est proportionnel à la charge et la mobilité d'une molécule, mais aussi à l'intensité du champ électrique.**
- C) La molécule chargée va diffuser du côté où les charges de même signe prédominent.**
- D) Les phénomènes électriques en physiologie sont aussi importants que les chimiques.**
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses.**

QCM 1 : donnez les propositions vraies

A) **VRAI** +++ du cours

B) **VRAI** +++ du cours

C) **FAUX** +++ : Les molécules chargées diffusent du côté où les charges opposées prédominent.

D) **VRAI** du cours

E) **FAUX**

QCM 2 : donnez les propositions vraies : d'après la loi d'Ohm

A) On clampé l'intensité, on mesure le voltage et on calcule la conductance.

B) On calcule l'intensité, on clampé le voltage et on mesure la conductance.

C) On mesure l'intensité, on clampé le voltage et on calcule la conductance.

D) On calcule l'intensité, on mesure le voltage et on clampé la conductance.

E) Les propositions A, B, C et D sont fausses.

QCM 2 : donnez les propositions vraies : d'après la loi d'Ohm

La seule bonne réponse est la proposition C.

On mesure l'intensité, on clampe le voltage et on calcule la conductance. +++ ♥

QCM 3 : donnez les propositions vraies :

- A) Le K^+ est le principal cation extracellulaire, le Na^+ est le principal cation intracellulaire.**
- B) Le K^+ est le principal cation intracellulaire, le Na^+ est le principal cation extracellulaire.**
- C) Les propriétés électriques des cellules sont liées à des transferts de charge QUANTITATIVEMENT négligeables mais QUALITATIVEMENT importants.**
- D) Les propriétés électriques des cellules sont liées à des transferts de charge QUANTITATIVEMENT importants mais QUALITATIVEMENT négligeables.**
- E) Les propositions A, B, C et D sont fausses.**

QCM 3 : donnez les propositions vraies :

A) FAUX +++ Voir réponse B

B) VRAI +++ Le K^+ est le principal cation intracellulaire, le Na^+ est le principal cation extracellulaire.

C) VRAI +++ Les propriétés électriques des cellules sont liées à des transferts de charge QUANTITATIVEMENT négligeables mais QUALITATIVEMENT importants.

D) FAUX +++ voir réponse C

E) FAUX



THE END.

