



- Potentiel électrique -

Sommaire

I – Potentiel électrique	- 2 -
A – Courant électrique	- 2 -
B – Courant osmotique.....	- 3 -
C – Propriétés.....	- 4 -
D – Loi d'Ohm et relation de Nernst	- 5 -
II – Canaux ioniques	- 6 -
A – Patch Clamp.....	- 6 -
B – Exemple du canal sodique épithéliale (ENaC)	- 8 -
III – Co-transporteurs, échangeurs et pompes.....	- 12 -



Bienvenue pour l'avant dernier cours qui traite des aspects théoriques des transferts transmembranaires, le potentiel électrique. Il s'agit ici d'une version raccourci pour la ttr, il nous restera une partie à faire. Encore une fois, il s'agit majoritairement de compréhension avec quelques trucs à apprendre par cœur. Comme toujours, l'objectif est de comprendre avant d'apprendre. Si certains points ne sont pas clairs, n'hésitez surtout pas à poser vos questions sur le forum. Courage <3





I – Potentiel électrique

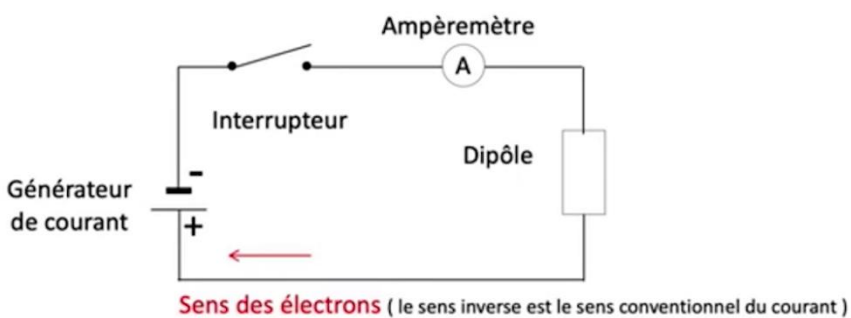
Dans l'organisme, certains **ions** et **molécules dissous** portent une **charge électrique** : ce sont des **osmoles électriquement chargées**, comme le **sodium (Na^+)**, le **potassium (K^+)** ou le **chlorure (Cl^-)**. Leur répartition entre les différents compartiments (intracellulaire, extracellulaire) n'est pas due au hasard : elle résulte **d'un équilibre entre deux types de forces**.

D'un côté, les **forces osmotiques**, liées aux **différences de concentration**, tendent à déplacer les **ions** pour équilibrer les **pressions osmotiques**. De l'autre, les **forces électriques**, produites par la séparation de charges, influencent leur mouvement pour rétablir **la neutralité électrique**.

Le **potentiel électrique** correspond donc à cette composante électrique des forces qui s'exercent sur les ions. Comprendre ce concept est essentiel pour expliquer des phénomènes physiologiques comme le potentiel de membrane, la transmission de l'influx nerveux ou la contraction cardiaque et musculaire. *(cet intro ne vient pas du prof)*

A – Courant électrique

Nous allons utiliser des courants électriques dans ce cours. Rappelons comment est construit un **montage simple** mais très utilisé :



- **Générateur** : délivre le potentiel électrique (PE)
- **Dipôle** : appareil électrique qui consomme de l'électricité
- **Ampèremètre** : appareil de mesure de l'intensité du courant pour le quotidien

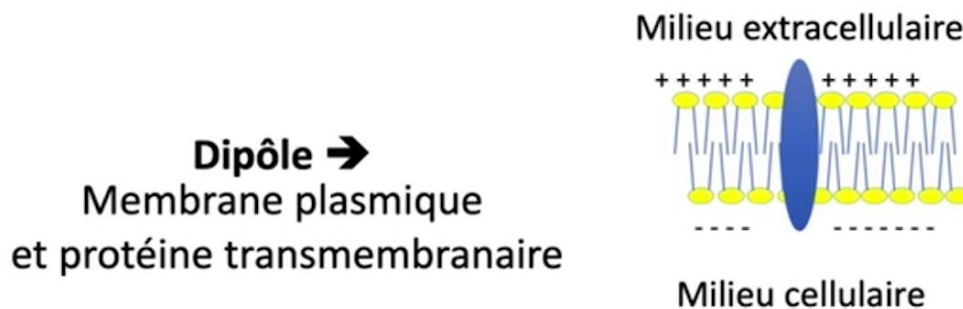
Le courant électrique passe à travers des **conducteurs**. Ce sont les **électrons** qui bougent dans les conducteurs et vont **créer ce courant**. En **physiologie**, il est parfois nécessaire de mesurer des courants **extrêmement faibles**, produits par l'activité électrique des **cellules ou des tissus**. Les **ampèremètres** utilisés dans ce contexte sont **spécialement conçus** pour détecter ces courants **infimes** : on les appelle **galvanomètres+++**.



B – Courant osmotique

En pratique dans le corps, les **courants osmotiques** se distribuent à travers la **membrane plasmique** (et ses protéines transmembranaires) qui jouera donc le rôle de **dipôle**. On va retrouver une **différence de répartition** des **charges** qui seront :

La membrane plasmique et ses protéines sont des dipôles qui déterminent la conductance des courants osmotiques.



Feuillet **interne** de la membrane plasmique = **Négatif**

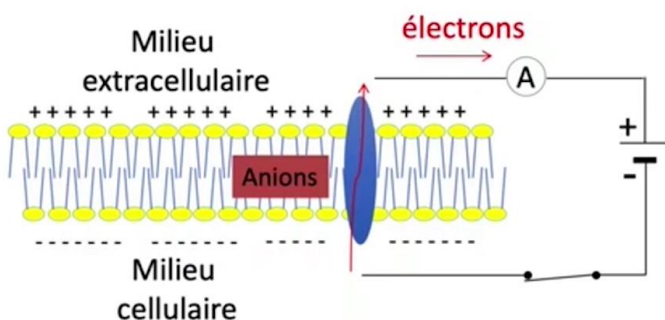
Feuillet **externe** de la membrane plasmique = **Positif**



Selon le **type de courant**, on aura un **support différent** :

- Le courant dans un **circuit électrique** est véhiculé par des **électrons**.
- Le courant dans **l'organisme** est véhiculé par des **osmoles chargées**.

Il est possible expérimentalement, de mettre en **continuité** les courants **électriques** (avec un circuit externe) et les courants **osmotiques** dans une **membrane biologique** ou un **tissu**.



On retrouve :

- Une **membrane plasmique** (dipôle)
- Un **générateur externe** sur la droite. Il va permettre d'envoyer un potentiel électrique contrôlé dans le circuit vers la membrane
- Un **galvanomètre (A)**. Il est placé après le passage dans la membrane va permettre de détecter une intensité quelconque.




Remarque : le courant qui traverse la membrane dans l'organisme n'est pas composé d'électrons mais d'anions et de cations (ex : Cl⁻, Na⁺ etc.)

A quoi nous sert cette expérience et comment est-ce qu'on s'en sert ?

On applique un potentiel électrique connu via un générateur, et l'ampèremètre mesure l'intensité inconnue. Si une intensité est détectée, un flux de charges (osmoles) circule ; sinon, malgré un fort potentiel, les charges ne peuvent pas se déplacer. Le but est de montrer qu'une membrane biologique peut être intégrée à un circuit électrique et que, dans l'organisme, le courant est porté par des ions (cations et anions) plutôt que par des électrons, tout en restant mesurable avec un galvanomètre.

C – Propriétés

On dit que le **potentiel électrique** d'une molécule est **proportionnel** à : à connaître par cœur ! 

- Sa charge
- Sa mobilité dans le dipôle
- L'intensité du champ électrique

- On considère, en physiologie et en médecine, que le **champ électrique** est **homogène dans la membrane plasmique**. C'est une modélisation nécessaire.

- Les **molécules chargées** se **dirigeront** vers l'endroit où les **charges de signes opposés prédominent** (les + iront vers les -).

Tableau récap/comparatif

	Courant électrique	Courant osmotique
Générateur de courant	Délivre un potentiel électrique	Délivre un potentiel électrique
Dipôle	Correspond à n'importe quel appareil électrique: ex. ampoule	Membrane plasmique et ses protéines transmembranaires
Porteurs de charges	Electrons	Ions = anions et cations
Potentiel électrique (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	Quantité de charges passant en 1 point d'un conducteur par unité de temps
Conductance (Siemens)	Facilité de mobiliser une charge dans un conducteur	Facilité de mobiliser une charge dans un conducteur
Nature de la conductance	Câble métallique	Membrane plasmique et transporteur moléculaire ex. protéines transmembranaires

Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.



D – Loi d'Ohm et relation de Nernst

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

Cela indique que la **conductance** est **proportionnelle** au rapport entre l'intensité du courant et le **potentiel électrique**.

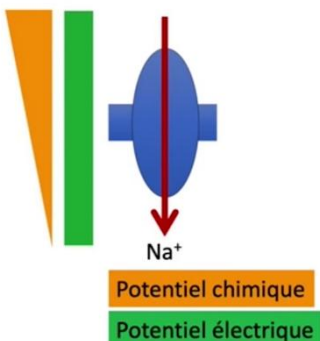
Nernst (*prix nobel de chimie en 1920*), a démontré que :

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

En effet, il a eu l'idée de mettre en relation le potentiel chimique et le potentiel électrique en démontrant que **le PC équilibre le PE d'une osmole chargée**.

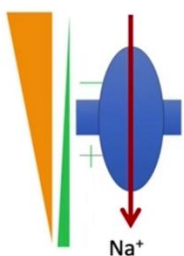
Illustration de la relation de Nernst sur une membrane plasmique :

Pas de potentiel électrique



La **membrane plasmique** possède une **protéine transmembranaire** (le gros truc bleu sur le schéma) qui transporte du **sodium (Na⁺)** de **haut en bas**. Ici, on voit que le **potentiel électrique** est nul (rectangle vert) et qu'il existe un **potentiel chimique** (triangle orange) pour le sodium, qui **dicte le transport** vers le bas.

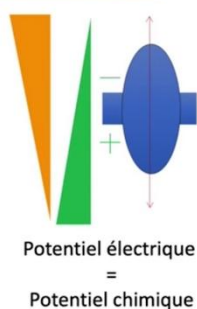
Faible potentiel électrique



On réalise alors une expérience. On va exercer un **potentiel électrique** (avec un circuit extérieur). Il va y avoir des **charges positives en bas** et **négatives en haut**. Le **potentiel électrique** contrarie le flux de Na⁺. En effet, le Na⁺ se dirige vers les **charges positives** selon **son potentiel chimique** mais on rappelle que les **osmoles chargées** vont à l'endroit des **charges de signe opposé** selon leur **potentiel électrique** (donc vers les charges négatives). Donc on crée un **potentiel électrique** puisque nos osmoles de sodium (Na⁺) vont vouloir **remonter** pour aller vers les **charges négatives**.

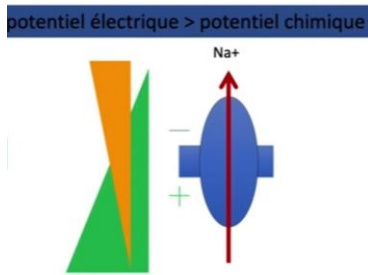
Diminution du flux de Na⁺

Fort potentiel électrique



On augmente le **potentiel électrique** qu'on exerce avec notre générateur. On va donc **équilibrer les 2 potentiels**. **Potentiel chimique = potentiel électrique**, il y'a **autant d'ions Na⁺** qui passent en haut et en bas.

torat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.

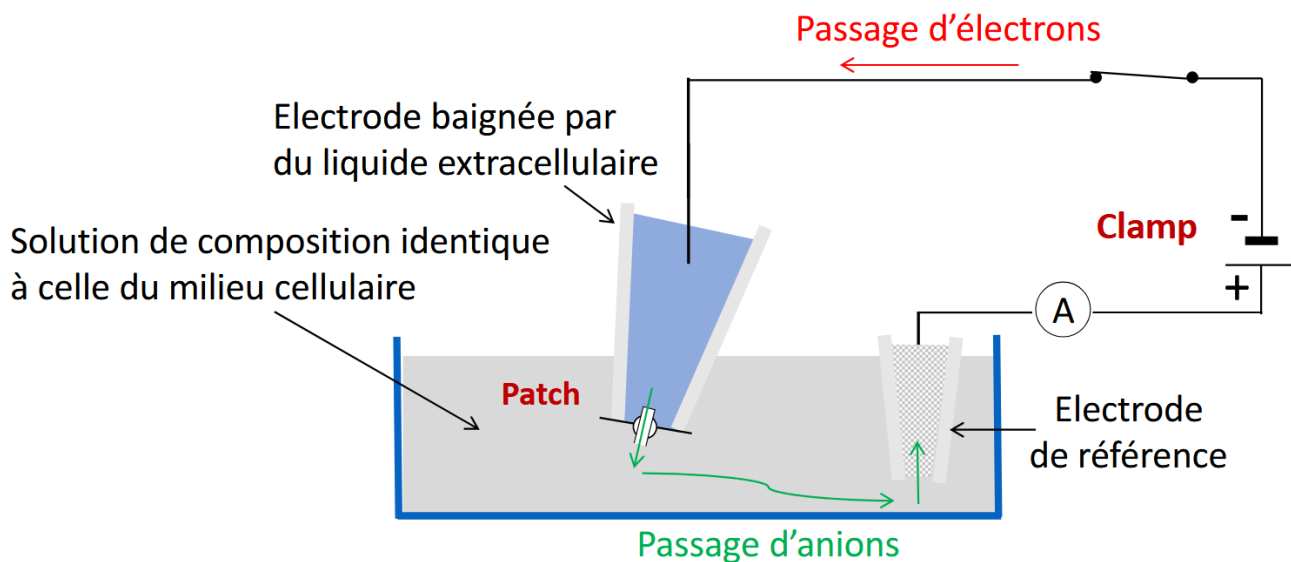


Si on continue d'augmenter le potentiel électrique on fini par **inverser le flux de sodium**, puisque le **potentiel électrique** devient **plus fort** que le **potentiel chimique**. Ainsi le **sodium** ne va plus que de **bas en haut**.

II – Canaux ioniques

A – Patch Clamp

Canaux ioniques : éléments **transmembranaires** qui permettent le **passage d'osmoles chargées OU non**.



Pour arriver à ses conclusions, nous avons utilisés des **montages expérimentaux**, comme celui du **patch clamp** que nous allons décrire. Le **patch clamp** est un montage permettant la **mesure** des **courants osmotique** (qui a notamment valu un prix Nobel de Physiologie et Médecine à Neher et Sackmann en 1991).

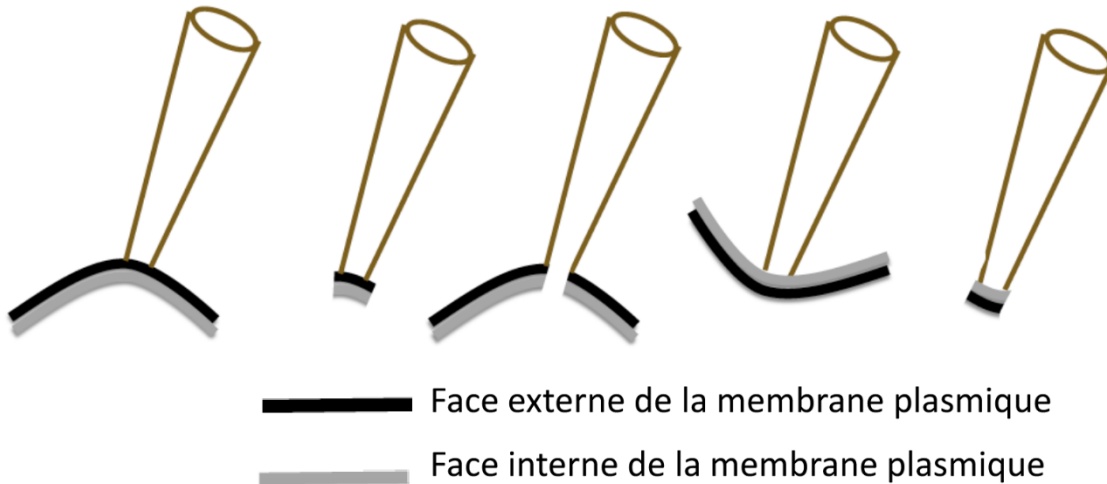
On voit qu'il y a **dans un bain** (correspondant au milieu cellulaire), **une membrane** qui trempe accrochée à **l'extrémité d'une pipette**. La membrane « patchée » sur la pipette se trouve donc **entre deux solutions** représentant les **milieux cellulaire et extracellulaire**. Ce système osmotique



est **connecté à un circuit externe** permettant de libérer un **voltage contrôlé** et de mesurer **l'intensité** après l'électrode de référence **via un galvanomètre**.

Sur le schéma on peut notamment observer un **courant ionique osmotique** entre les deux électrodes. Le fait de pouvoir exercer des voltages différents via le circuit électrique externe va permettre de montrer **la conductance de la membrane** (sa capacité à faire passer le courant).

La fixation d'un fragment de membrane plasmique à l'extrémité d'une pipette de verre s'appelle le **patch**.



L'expression de patch désigne l'adhésion d'un fragment de membrane plasmique à l'extrémité d'une **pipette de verre microforgée extrêmement fine**. L'adhésion se fait de différentes manières :

- Sur la face extérieure (1) ou intérieure (4) de la membrane.
- Avec le détachement (2 et 5) ou non d'un morceau de membrane.
- En transperçant éventuellement le premier feuillet de la membrane pour aller patcher le deuxième feuillet (3) à ce moment-là, on peut arracher le petit morceau de membrane.

Rappel :

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

Mesurée → Intensité
 → Potentiel électrique=voltage Clampé
 → Conductance Calculée

Il faut bien retenir ce qui est mesuré, clampé ou calculée !

Le tutorat est gratuit. Toute reproduction ou vente est interdite.



- Le clamp désigne la manière de définir le voltage
- L'Intensité se mesure avec un ampèremètre ou un galvanomètre
- La conductance se calcule en fonction de l'intensité mesurée pour un potentiel clampé

La loi d'Ohm permet ici de mettre en avant la **proportionnalité** entre la **conductance** et le **rapport entre le voltage et l'intensité**.

La principale information tirée du patch-clamp est qu'il existe des **variations de conductance**. Ces variations révèlent la présence de **protéines transmembranaires facilitant la diffusion des osmoles** à travers les **membranes biologiques**. Le patch clamp permet donc aussi logiquement de faire l'étude **des propriétés** de ces protéines transmembranaires.

La conductance n'est donc pas toujours la même. En effet, si le **voltage est fort** mais que **l'intensité est faible** on aura donc une **faible conductance** montrant :

- Soit une **absence de protéines** facilitant le transport
- Soit la **conformation fermée** de ces protéines transmembranaires

B – Exemple du canal sodique épithéliale (ENaC)

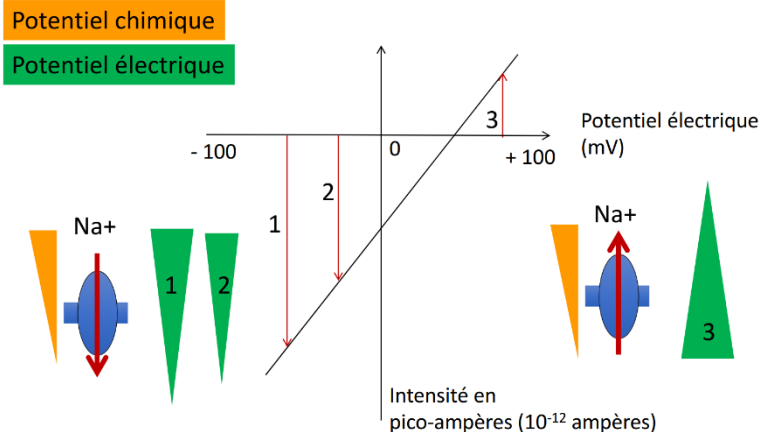
Le **canal sodique épithélial** (= ENaC) est une **protéine transmembranaire** que l'on va retrouver dans les **poumons ou les reins**. Elle permet la **diffusion facilitée du sodium**.

Il y a **4 informations** essentielles à retenir sur cette protéine+++ :

- **Sa conductance** : pour déterminer sa conductance (qui rappelons-le est calculée), on reprend la technique du patch clamp (donc on va extraire un petit fragment membranaire en posant une pipette et en exerçant une petite succion pour détacher un morceau). Sa conductance est de **4 à 5 pS** (*picosiemens*)
- **Sa sélectivité** : c'est un canal sélectif, il ne laisse passer que certains composés (donc ici sodium et un peu de lithium). Si on reprend le **patch clamp** dans une **solution ionique sans sodium**, **aucun passage n'est détecté** même avec le plus grand des potentiels électriques exercés. Tandis que si la solution contient du Na⁺ on retrouve alors la relation linéaire intensité / voltage.



- **La relation intensité et voltage (PE) est linéaire**



Ici, le potentiel électrique sur l'axe horizontal et l'intensité sur l'axe vertical. On voit que la **relation entre intensité et voltage est linéaire**.

Pour expliquer la raison de cette linéarité :

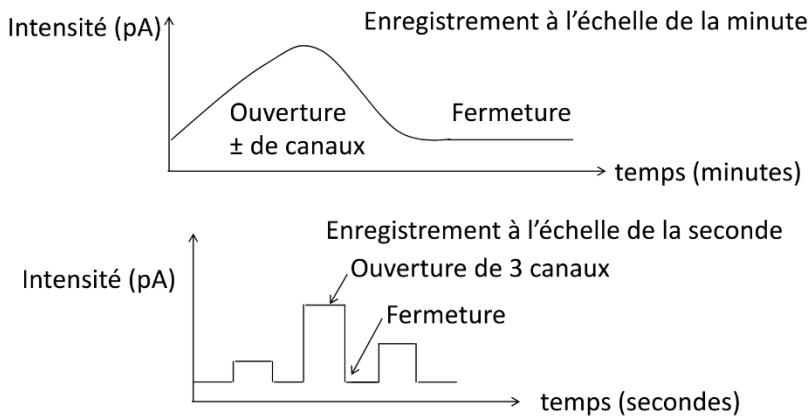
1. Quand le PE est à -100 mV :
 - La force électrique et la force chimique vont dans le même sens → le sodium entre dans la cellule plus facilement.
 - Le potentiel électrique potentialise l'action du potentiel chimique.
2. Si on augmente un peu le PE (le rendre moins négatif) :
 - La force électrique devient moins forte, donc le courant de sodium diminue.
 - Le potentiel chimique, lui, ne change pas.
3. Quand le PE est à +100 mV :
 - La force électrique pousse dans le sens opposé à la force chimique.
 - Résultat : le sodium change de direction et sort de la cellule.

En gros :

- PE négatif → sodium entre.
- PE proche de zéro → sodium entre moins.
- PE positif → sodium sort.



- **Sa durée et sa probabilité d'ouverture :**



On observe différents phénomènes selon l'échelle de temps. En minutes on a le « tendance globale » alors que l'on est beaucoup plus précis avec l'échelle en seconde ; à tel point que l'on peut voir des petits rehaussements. Chaque « petit rehaussement » de rectangle correspond à l'ouverture d'un ou plusieurs canaux. Autrement dit, plus le rectangle est haut, plus il y a de canaux ouverts

Ainsi, on trouve :

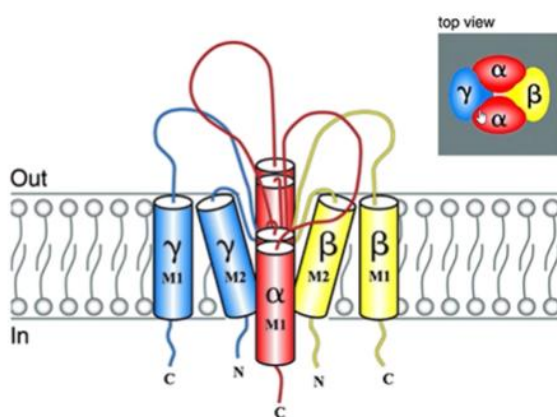
- **Durée d'ouverture** de l'ENaC : **1 seconde**

- **Probabilité d'ouverture** de l'ENaC : $\frac{\text{Temps d'ouverture}}{\text{Durée d'enregistrement}} = 0,5$

Tableau récap à connaître par cœur ! 

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

Le prof détail la structure du canal sodique épithéliale :



« Une fois que l'on a caractérisé les propriétés biophysiques et que l'on a identifié un canal, on cherche à en connaître la structure moléculaire. Voici la structure moléculaire du canal sodique épithélial (clonée par l'équipe de Bernard Rossier à Lausanne en 1993). Il s'agit de sous-unités transmembranaires : α , β , γ réparties par deux selon quatre dipôles qui constituent un port moléculaire à travers lequel passe le sodium. »



Ok super, mais à quoi est-ce que tout ça nous sert ?

L'objectif est de comprendre **comment fonctionne la diffusion facilitée** à travers les **membranes cellulaires**.

- Il existe différents canaux ioniques : certains pour le sodium (Na^+), d'autres pour des molécules non chargées comme le glucose ou l'eau (via les aquaporines).
- Ces canaux sont des cibles de médicaments. Par exemple, le canal sodique épithélial (ENaC) peut être bloqué par l'amiloride, un diurétique utilisé pour traiter les œdèmes et épanchements.
- Certains canaux cationiques non sélectifs sont sensibles à la pression mécanique : ils participent à la régulation de la pression artérielle, à la perception de la position du corps (proprioception) et au toucher — découverte récompensée par le prix Nobel 2021 de physiologie/médecine. On a donc pu mettre en évidence pourquoi certaines mutations de son gène entraînent de l'hypertension ou de l'hypotension.
- D'autres canaux cationiques non sélectifs sont sensibles à la température et jouent un rôle dans la régulation thermique, la détection de chaleur ou de froid et les réactions d'évitement.
- Les canaux sodiques et potassiques présents dans les cellules cardiaques (cardiomyocytes et cellules nodales, on reverra ça dans mon cours sur le potentiel d'action cardiaque) déterminent le rythme cardiaque. Certains médicaments antiarythmiques ciblent ces canaux.

En résumé, le prof veut vous faire comprendre que la communication cellulaire et l'homéostasie de l'organisme reposent sur des mécanismes précis de régulation des canaux ioniques et autres transporteurs moléculaires.

Petite conclusion du Professeur :

- Le **patch-clamp** permet de caractériser des **protéines transmembranaires** facilitant la **diffusion des osmoles** ;
- Ces molécules sont des **cibles thérapeutiques** ;
- Ces molécules conduisent les **osmoles électriquement chargées ou non**, simultanément dans le même sens ou simultanément en sens inverse (cotransporteurs, échangeurs) ;
- Certaines de ces molécules génèrent des **potentiels chimiques et/ou électriques en transportant les osmoles de manière active** (consommation d'ATP) : ce sont des **pompes**.



III – Co-transporteurs, échangeurs et pompes

J'ai raccourci cette partie pour la pré-rentree, je donne juste quelques definitions importantes on fera le reste après le 1^{er} examen blanc 😊

Il existe dans le corps **plusieurs types de diffusion** :

- **Diffusion simple** = ne fait pas intervenir de **transporteurs** moléculaires (c'est un cas de figure rare dans l'organisme). C'est typiquement ce qu'on a vu quand on a parlé de la diffusion dans le cours sur le potentiel chimique.
- **Diffusion facilitée** = **passage transmembranaires d'osmoles électriquement chargée ou non à travers une membrane via un transporteur moléculaire**. Les forces rentrant en jeu sont le potentiel électrique et le potentiel chimique.

Dans une **diffusion facilitée** on retrouvera une **relation exponentielle** tandis que pour une **diffusion simple** on retrouvera une **relation linéaire**.

Donc la **diffusion facilitée** permet le passage d'une **plus grande quantité de molécules** pour des **potentiels plus faibles**. Comme dit juste avant, ce type de diffusion fait intervenir des **transporteurs**. On en trouve **différents types** :

- **Echangeurs** : les osmoles qu'il transporte d'un compartiment à l'autre vont aller dans des **sens opposés**.
- **Cotransporteurs** : les osmoles qu'il transporte d'un compartiment à l'autre vont aller dans **le même sens**.
- **Pompe** : c'est un transporteur un peu particulier. Pour fonctionner, il nécessite d'hydrolyser de l'**ATP**. Il lui faut de l'énergie. C'est un transport qu'on dit **ACTIF**.