

Cours de Biophysique

2023/2024
2^{ème} semestre

Pr. Youssef Mir

Université Privée de la Santé et des Sciences d'Agadir
UPSSA

Électrophysiologie

Plan

I.2. Électrophysiologie

I.2.1. Phénomènes électriques en l'absence de membrane

I.2.2. Électrophysiologie cellulaire

I.2.3. Activité électrique du cœur

I.2.4. Électrocardiogramme (ECG)

Électrophysiologie

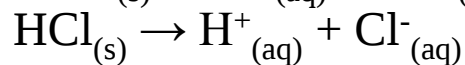
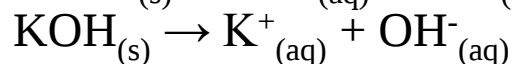
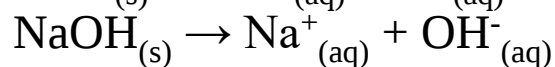
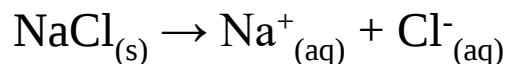
Phénomènes électriques

Les électrolytes

Un électrolyte fort:

Un électrolyte fort se dissocie complètement dans l'eau. On y trouve que des ions et les molécules du solvant.

Exemple:



Un électrolyte faible:

Les électrolytes faibles se dissocient faiblement dans l'eau. La solution contient donc des ions, des molécules du soluté et celles du solvant.



Électrophysiologie

Phénomènes électriques

Les électrolytes

Ionisation partielle et constante d'équilibre

	CH_3COOH	+	H_2O	=	$\text{CH}_3\text{COO}^-_{(\text{aq})}$	+	$\text{H}_3\text{O}^+_{(\text{aq})}$
État initial	C						
État final	$C(1 - \alpha)$		excès		$C\alpha$		$C\alpha$

$$\alpha = \frac{\text{nombre de molécules dissociées}}{\text{nombre total initial de molécules introduites dans le solvant}}$$

$$K = \frac{[\text{CH}_3\text{COO}^-_{(\text{aq})}][\text{H}_3\text{O}^+_{(\text{aq})}]}{[\text{CH}_3\text{COOH}]} = \text{constante d'équilibre} = C \frac{\alpha^2}{1 - \alpha}$$

Électrophysiologie

Phénomènes électriques

Les électrolytes

Soit une cuve à électrolyse contenant une solution aqueuse de NaCl.

Tout atome de chlore possède 7 électrons externes et tend à en gagner un pour donner l'ion Cl^- stable. De même, tout atome de sodium possède 1 électron externe qu'il a tendance à perdre pour donner l'ion Na^+ stable.

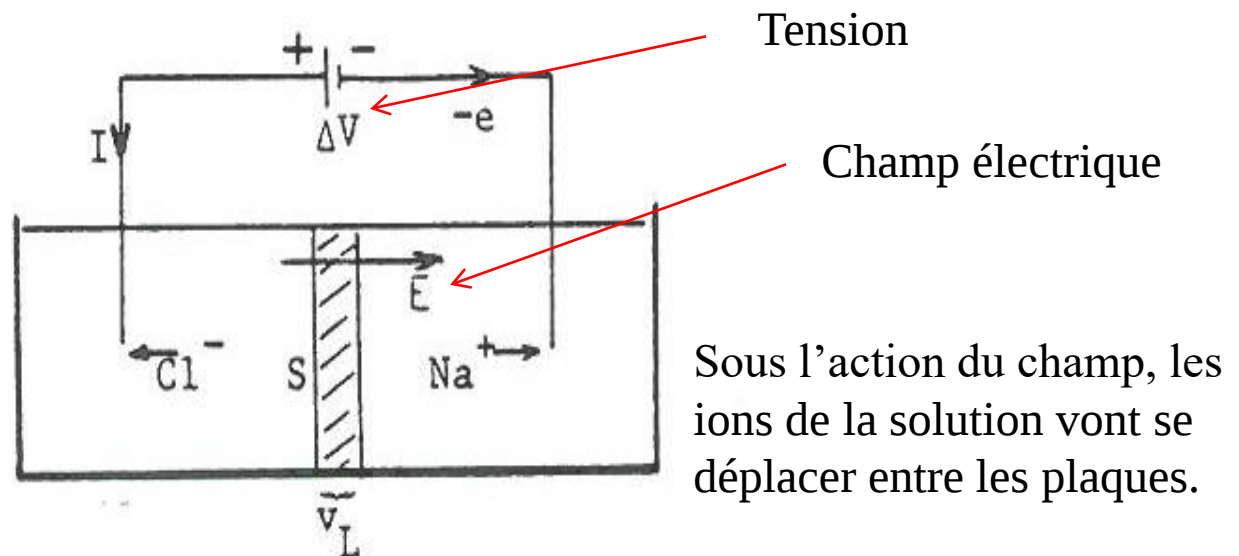
L'ensemble reste neutre (loi de l'électroneutralité), c'est la dissociation électrolytique en l'absence de tout courant.

Module du champ électrique (V/m):

$$E = \frac{\Delta V}{l}$$

ΔV = Différence de potentiel (volt)

l = Distance entre les deux électrodes (m)



Électrophysiologie

Électrophysiologie cellulaire

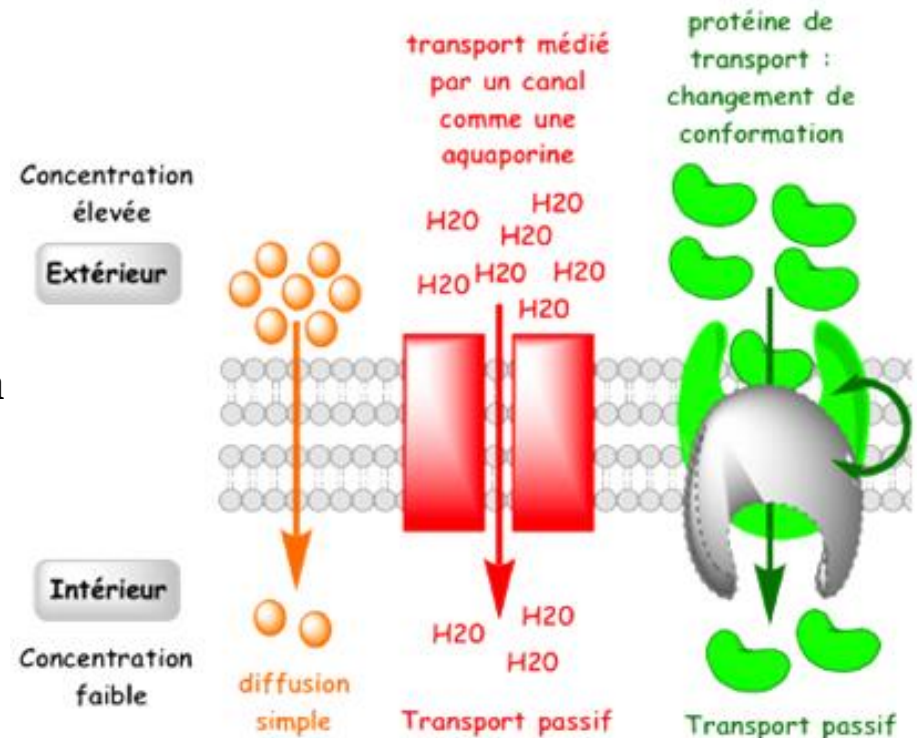
Échanges transmembranaires (types de transport)

Les membranes biologiques sont des barrières sélectives très efficaces.

Transports passifs ne nécessitent pas d'énergie, car ils se font dans le sens du gradient de concentration (ou gradient électrochimique).

La diffusion directe (ou simple ou libre) : les molécules "liposolubles" diffusent dans la membrane.

La diffusion facilitée : les molécules utilisent une protéine de transport.



Électrophysiologie

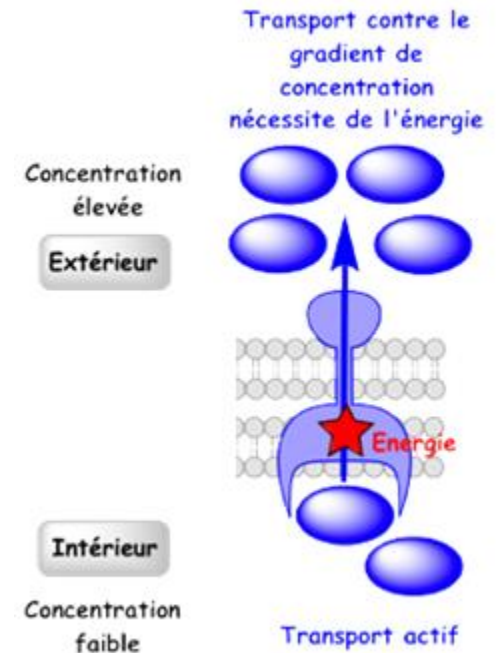
Électrophysiologie cellulaire

Échanges transmembranaires (types de transport)

Transports actifs nécessitent de l'énergie, car ils se font contre le gradient de concentration (transport non spontané).

Transport actif primaire (ou direct) : l'énergie est fournie par l'hydrolyse d'un nucléotide triphosphate (exemple : pompes à ATP et hydrolyse de l'ATP) .

Transport actif secondaire (ou couplé) : l'énergie est fournie par une différence de potentiel électrochimique (exemple : un gradient de concentration du sodium).



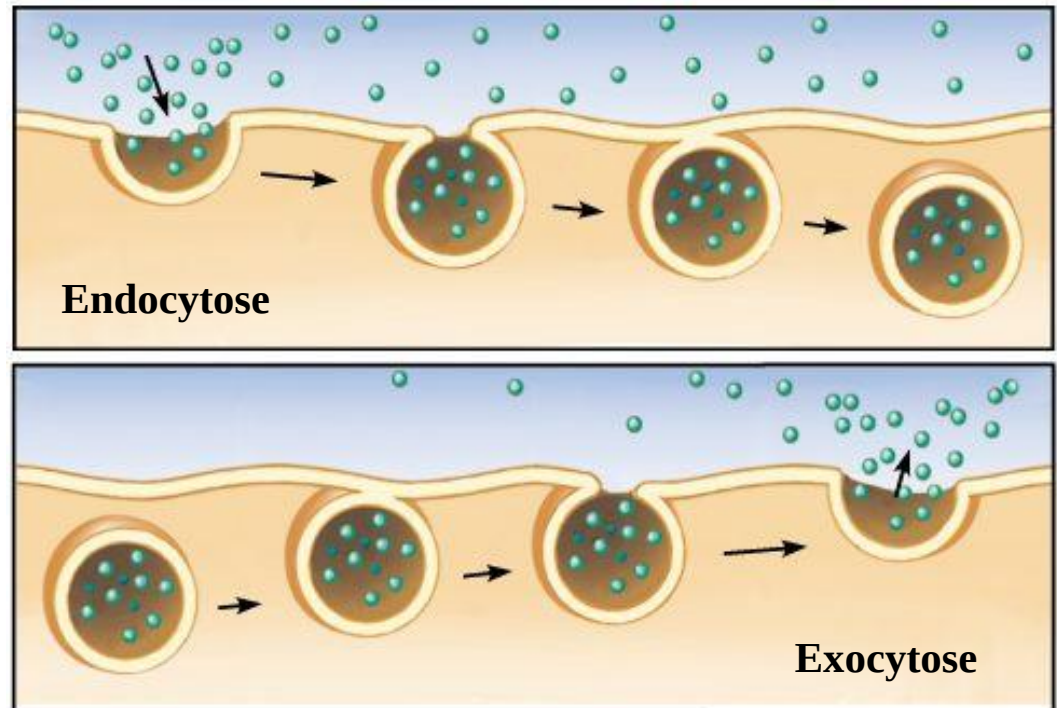
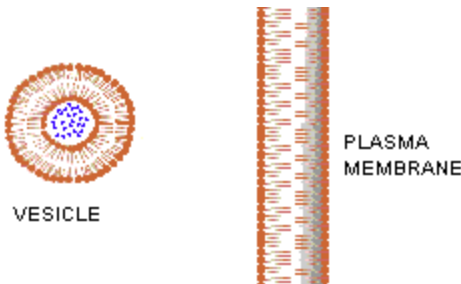
Électrophysiologie

Électrophysiologie cellulaire

Échanges transmembranaires (types de transport)

Le passage de matériel biologique **trop volumineux ou trop réactif** s'effectue par deux autres processus : l'endocytose et l'exocytose.

Dans les deux cas, le transport s'effectue par l'intermédiaire d'une vésicule lipidique, résultat d'une invagination de la membrane plasmique.



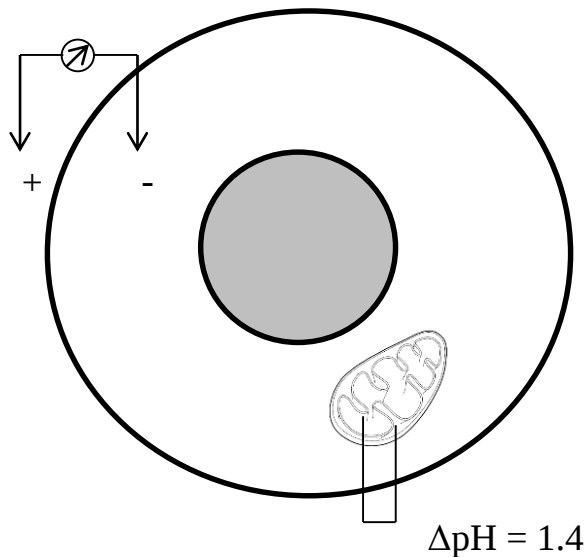
Électrophysiologie

Électrophysiologie cellulaire

Les concentrations ioniques

Les concentrations sont données en mmol.L⁻¹

$$E_m = V_i - V_e = -70 \text{ mV}$$



$$\begin{aligned} [K^+]_e &= 4 \\ [Na^+]_e &= 144 \\ [Cl^-]_e &= 120 \\ [Ca^{2+}]_e &= 1.5 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [K^+]_i &= 160 \\ [Na^+]_i &= 10 \\ [Cl^-]_i &= 4 \\ [Ca^{2+}]_i &= 10^{-4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [Na^+]_{extracellulaire} &> 10 \times [Na^+]_{intracellulaire} \\ [Cl^-]_{extracellulaire} &> 20 \times [Cl^-]_{intracellulaire} \\ [Ca^{2+}]_{extracellulaire} &> 10000 \times [Ca^{2+}]_{intracellulaire} \end{aligned}$$

$$[K^+]_{intracellulaire} > 46 \times [K^+]_{extracellulaire}$$

La membrane est perméable aux ions Na⁺, Cl⁻, K⁺ et Ca²⁺ dans les deux sens

La différence de concentration ionique se traduit par l'apparition d'un gradient de concentration transmembranaire.

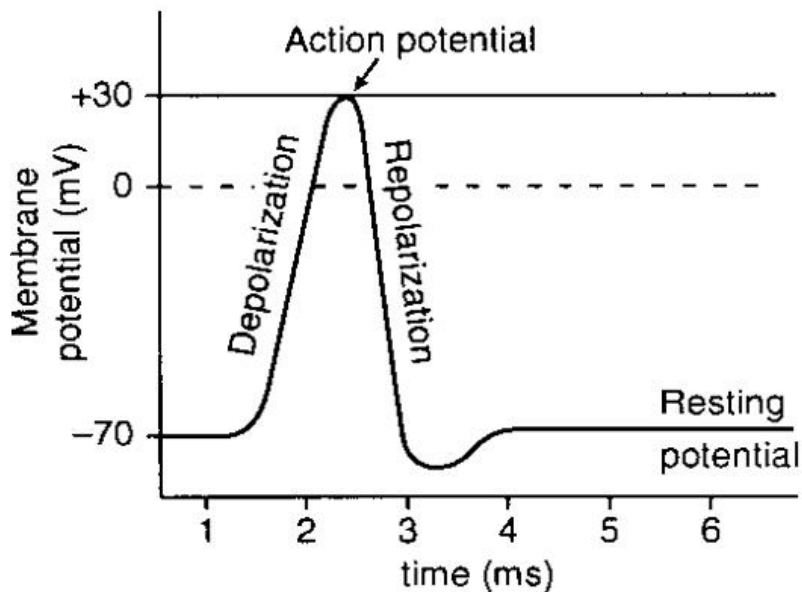
$$[H^+]_{inter\ membrane} > [H^+]_{matrice}$$

Déplacement des ions du milieu le plus concentré vers le milieu le moins concentré et ce, de façon passive (c'est-à-dire sans consommation d'énergie (ATP)).

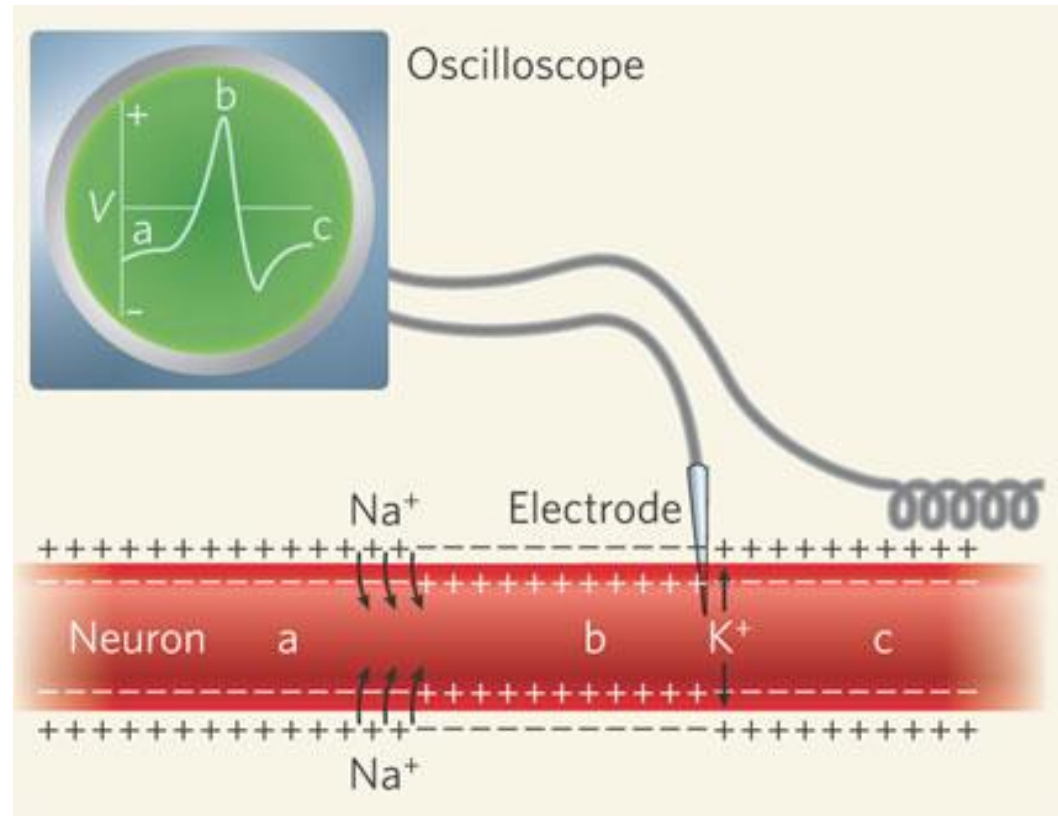
Électrophysiologie

Électrophysiologie cellulaire

Potentiel d'action



- 1) Repos, 2) Dépolarisation, 3) Repolarisation, 4) Hyperpolarisation et 5) Retourne au repos

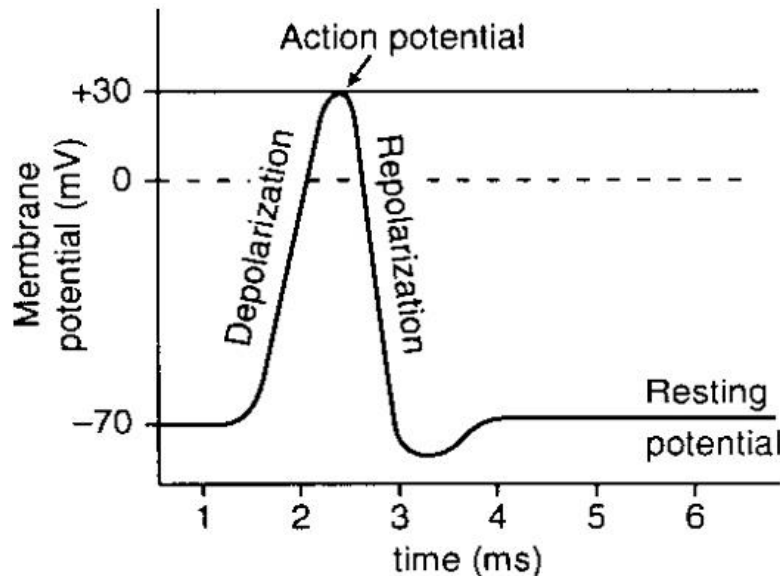


Électrophysiologie

Électrophysiologie cellulaire - Potentiel d'action

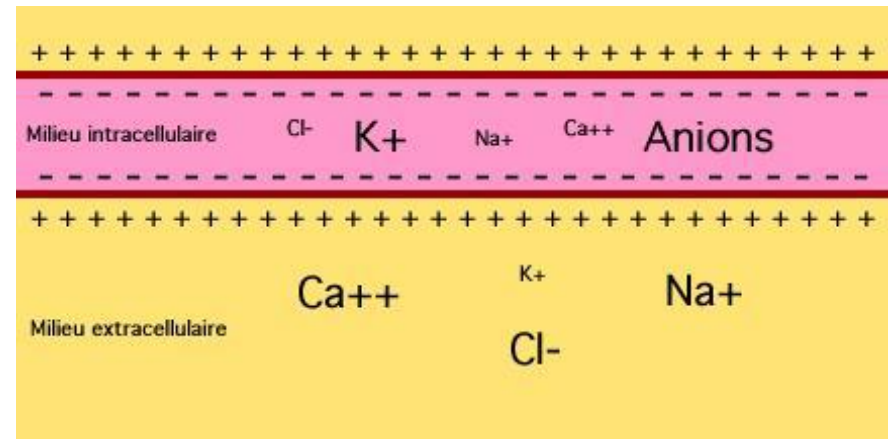
Étape 1: Potentiel de repos

Au repos, les ions ne sont pas répartis également de chaque côté de la membrane cellulaire: l'intérieur de l'axone est plus négatif et l'extérieur est plus positif.



Extérieur de l'axone

Moins d'ions de potassium (K^+), Plus d'ions de sodium (Na^+), calcium (Ca^{2+}) et chlore (Cl^-)



Intérieur de l'axone

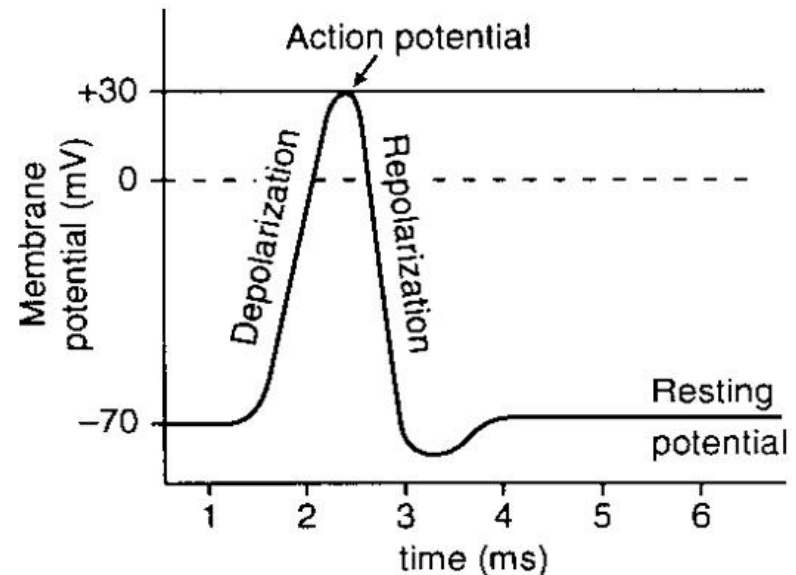
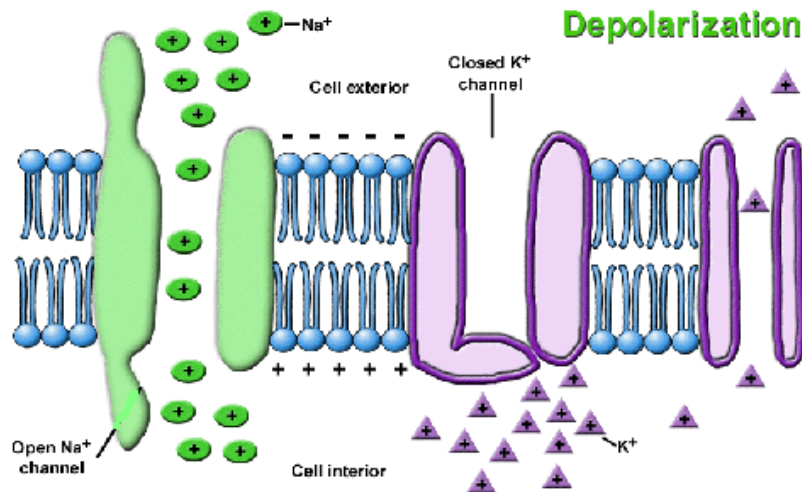
Moins d'ions de sodium (Na^+), calcium (Ca^{2+}) et chlore (Cl^-). Plus d'ions de potassium (K^+)

Électrophysiologie

Électrophysiologie cellulaire - Potentiel d'action

Étape 2: Dépolarisation

- ❑ Un stimulus provoque l'ouverture des canaux de Na^+ dans la membrane
- ❑ Il y a une entrée massive des ions de Na^+ à l'intérieur de l'axone
- ❑ L'entrée massive de Na^+ fait en sorte que l'intérieur de l'axone est plus positif
- ❑ On dit qu'il est **dépolarisé**

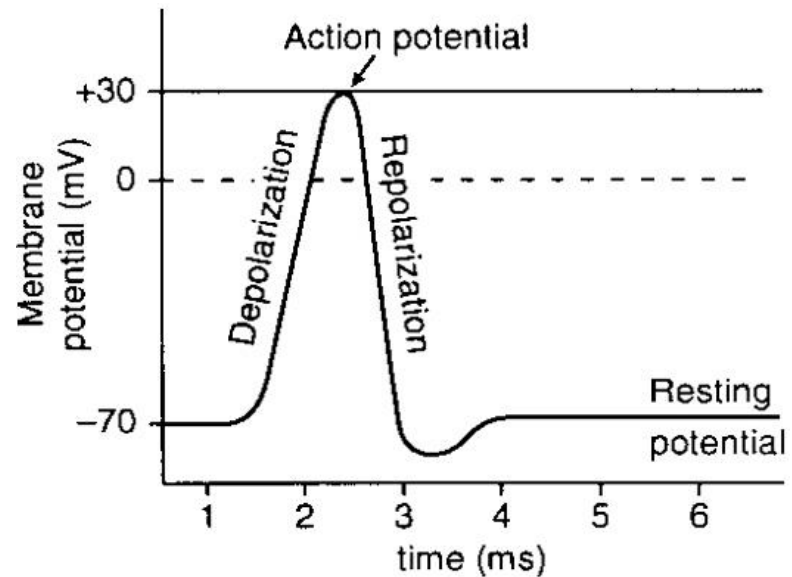
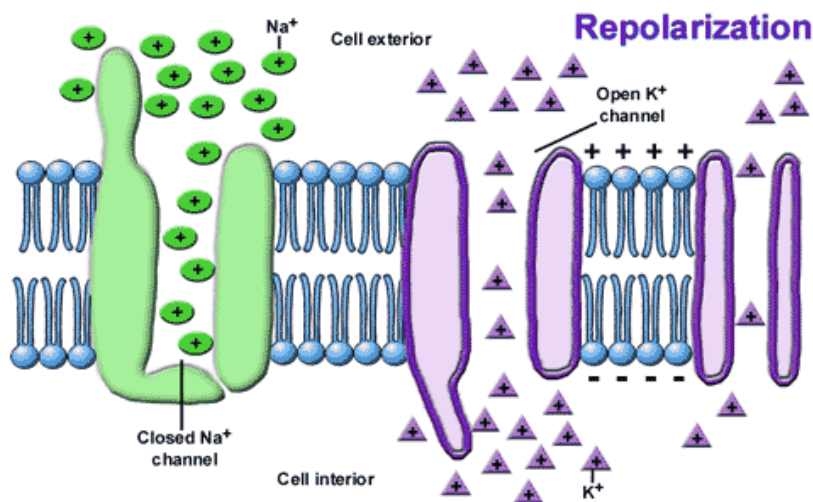


Électrophysiologie

Électrophysiologie cellulaire - Potentiel d'action

Étape 3: Repolarisation

- ❑ Les canaux de Na^+ se referment pendant que les canaux à K^+ s'ouvrent
- ❑ Les ions de K^+ quittent l'intérieur de l'axone ce qui renverse à nouveau les charges
- ❑ Le neurone se **repolarise**, c'est-à-dire que l'intérieur redevient négatif

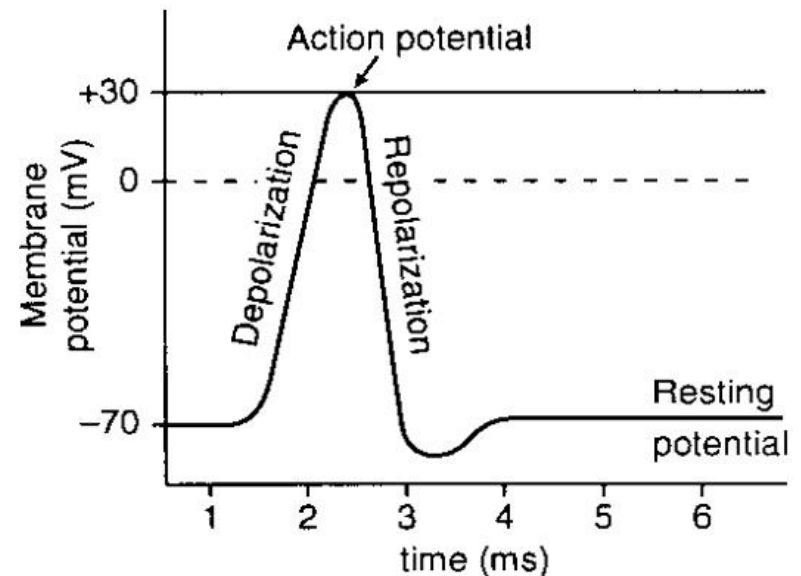
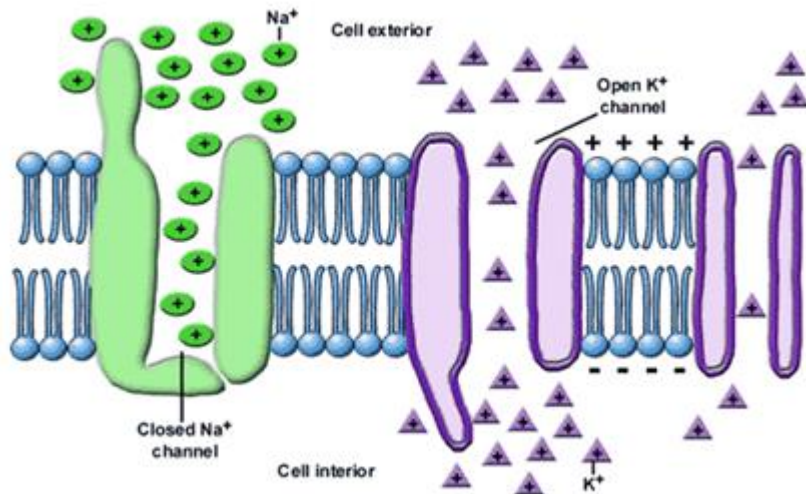


Électrophysiologie

Électrophysiologie cellulaire - Potentiel d'action

Étape 4: Hyperpolarisation

- ❑ Les canaux de K^+ restent longtemps ouverts et beaucoup plus de K^+ quittent le neurone
- ❑ Le potentiel descend à moins de -70 mV
- ❑ C'est un état d'**hyperpolarisation** ou le neurone ne peut pas répondre à un autre stimulus.

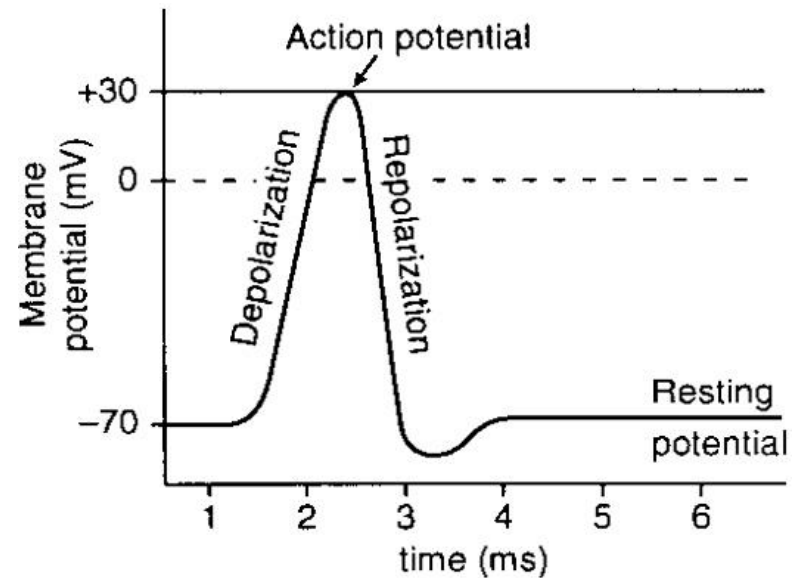


Électrophysiologie

Électrophysiologie cellulaire - Potentiel d'action

Étape 5: Retourne au repos

Le potentiel de repos est rétabli par les pompes Na^+/K^+ qui retournent les ions de Na^+ à l'extérieur et ramènent le K^+ à l'intérieur

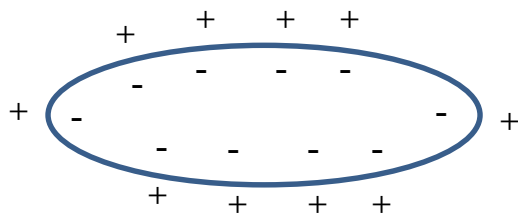


Électrophysiologie

Activité électrique du cœur

Au niveau de la cellule cardiaque

La cellule myocardique au repos est polarisée: les concentrations ioniques de part et d'autre de sa membrane sont différentes en nature et en concentration.

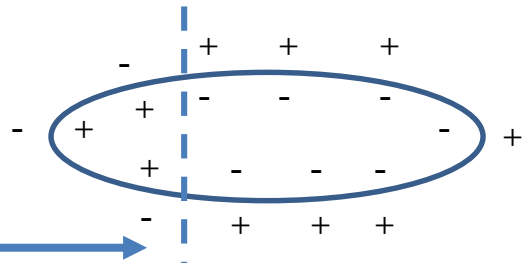


Cellule au repos

La propagation du signal électrique dans le tissu myocardique peut s'expliquer d'un point de vue électrique par la propagation d'une onde de dépolarisation membranaire.

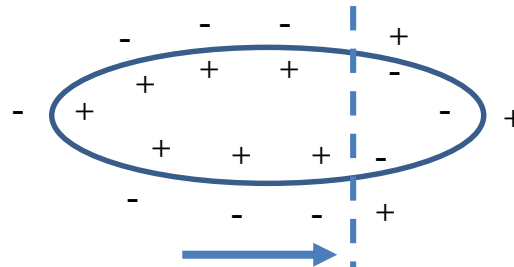
Elle s'accompagne d'une modification transitoire de la perméabilité membranaire qui modifie les concentrations ioniques et donc les équilibres électriques de part et d'autre de la membrane.

Front de l'onde de
dépolarisation

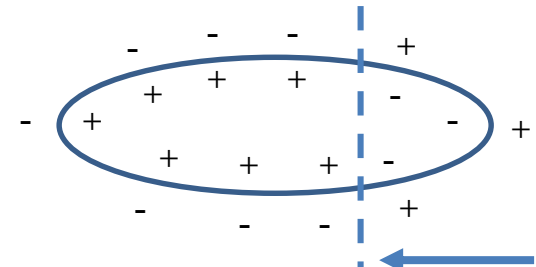


Sens de l'onde de dépolarisation

Front de l'onde de
dépolarisation



Front de l'onde de
repolarisation

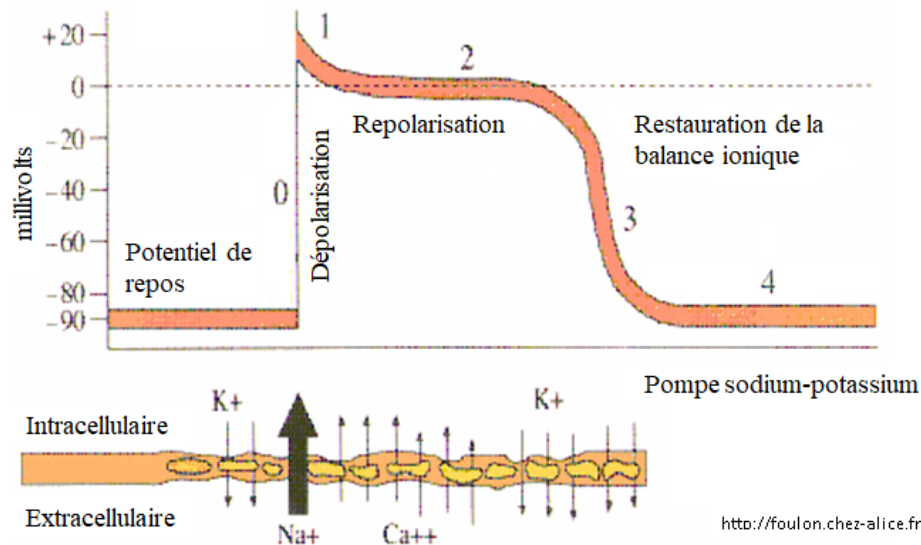


Sens de l'onde de repolarisation

Électrophysiologie

Activité électrique du cœur

Au niveau de la cellule cardiaque



Phase 0: Dépolarisation: passage du potentiel de membrane de -90 mvolts à +20 mvolt en qlq ms.

Phase 1: Repolarisation rapide: Inactivation du courant sodique entrant par les canaux sodiques.

Phase 2: Repolarisation lente: un plateau légèrement descendant et oblique est formé. Elle est liée au courant calcique de la cellule (nécessaire à la contraction).

Phase 3: Repolarisation terminale: une descente rapide du potentiel membrane correspondant au canal sortant de potassium.

Phase 4: Récupération du potentiel de repos.

Électrophysiologie

Activité électrique du cœur

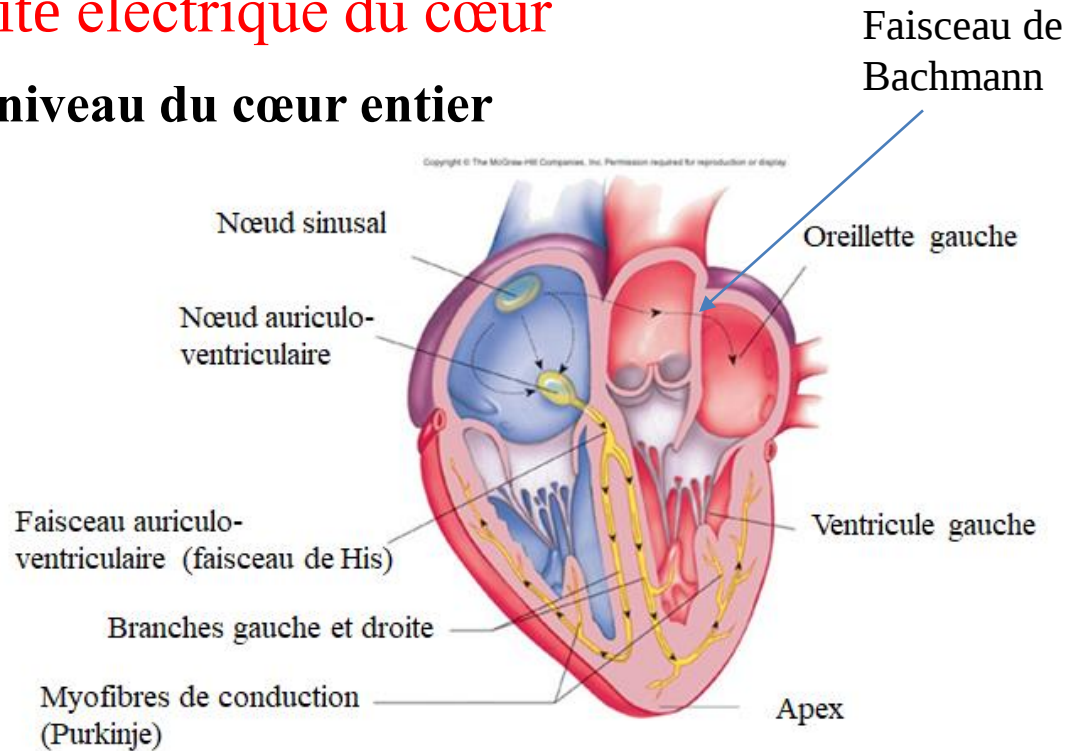
Au niveau du cœur entier

Le cœur est assimilé à un dipôle unique pendant les phases de dépolarisation et de repolarisation.

Le myocarde est la partie véritablement active du cœur, elle est constituée de cellules musculaires myocardiques et cellules nodales.

Système de conduction cardiaque:

- 1- **Nœud Sinusal** (nœud SA). Il est le **pacemaker** naturel du cœur, il initie tous les battements du cœur et détermine la fréquence cardiaque. Le signal électrique a pour effet que les oreillettes se contractent.
- 2- **Nœud Auriculo-Ventriculaire** (nœud AV). Il transmet l'impulsion électrique des oreillettes aux ventricules avec un petit délai de temps (pour s'assurer que les oreillettes ont injecté tout le sang dans les ventricules avant qu'elles se contractent).
- 3- **Tronc du faisceau de His**. Le signal électrique se divise en deux branches après un court trajet.
- 4- **Réseau de Purkinje**. Le signal électrique s'étend en myocarde ventriculaire



Électrophysiologie

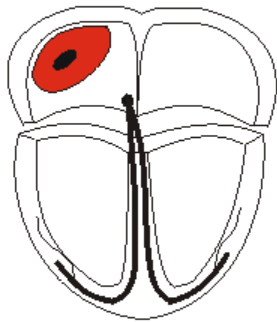
Activité électrique du cœur

Au niveau du cœur entier

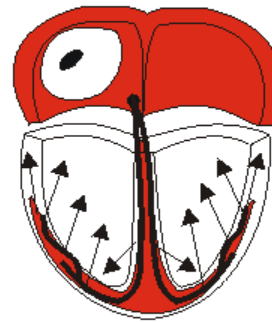
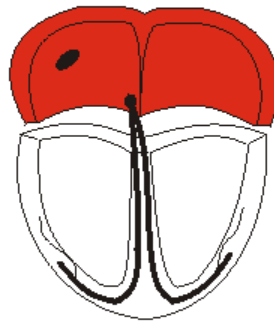
Pour fonctionner comme une **pompe**, le cœur répète successivement 2 phases :

- ❑ **Dépolarisation** des cellules qui provoque la systole : phase de contraction
- ❑ **Repolarisation** des cellules qui provoque la diastole phase de relâchement qui permet le remplissage des oreillettes et des ventricules

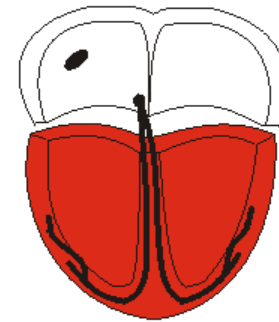
Un cycle cardiaque comprend donc une alternance de phénomènes électriques et mécaniques



Dépolarisation du nœud sinusal se transmet aux cellules des oreillettes
Les oreillettes se dépolarisent ==> **systole auriculaire**



La dépolarisation se transmet aux ventricles par le faisceau de His et les fibres de Purkinje
Les cellules des ventricles se dépolarisent ==> **systole ventriculaire**

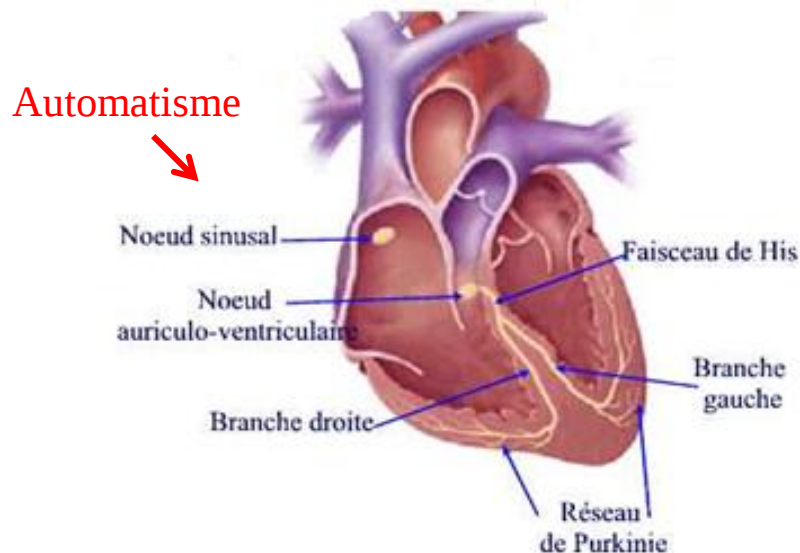


Électrophysiologie

Électrocardiogramme (ECG)

L'électrocardiogramme (ECG) permet d'enregistrer les potentiels électriques générés par le cœur suite à la contraction du muscle cardiaque (ou *myocarde*) à l'aide d'électrodes placées sur la peau.

On n'enregistre pas l'activité d'une seule cellule mais de **l'ensemble des cellules** cardiaques (la somme de tous les PA du myocarde)



Le cœur = **organe automatique** (il est lui-même à l'origine de sa propre activité)

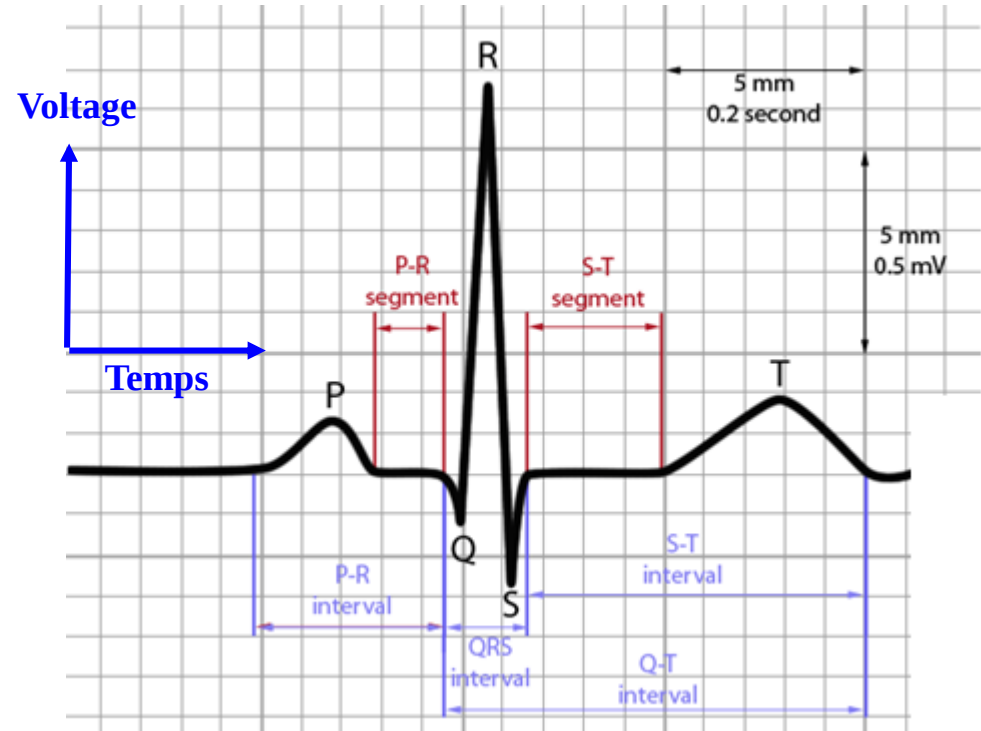
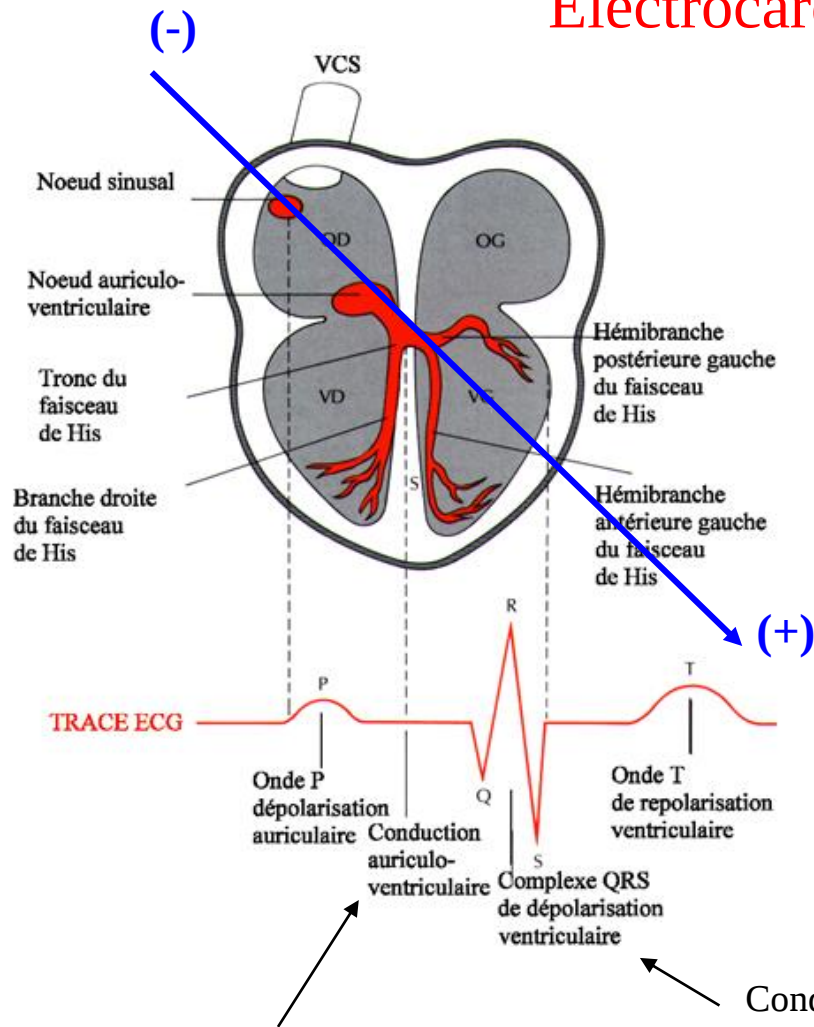
Un **cœur isolé** dans des conditions physiologiques optimales de perfusion, d'O₂ ; de pH et de température continue à battre.

Cet automatisme est dû aux caractéristiques des cellules musculaires cardiaques qui sont de 2 types:
Les cellules nodales : **produisent et conduisent** les impulsions.

Les cellules myocardiennes : **répondent** à ces impulsions par contraction.

Électrophysiologie

Électrocardiogramme (ECG)



Intervalle	Min (s)	Max (s)
RR	0.6	1.2
PR	0.12	0.20
QRS		0.10
QT		0.42

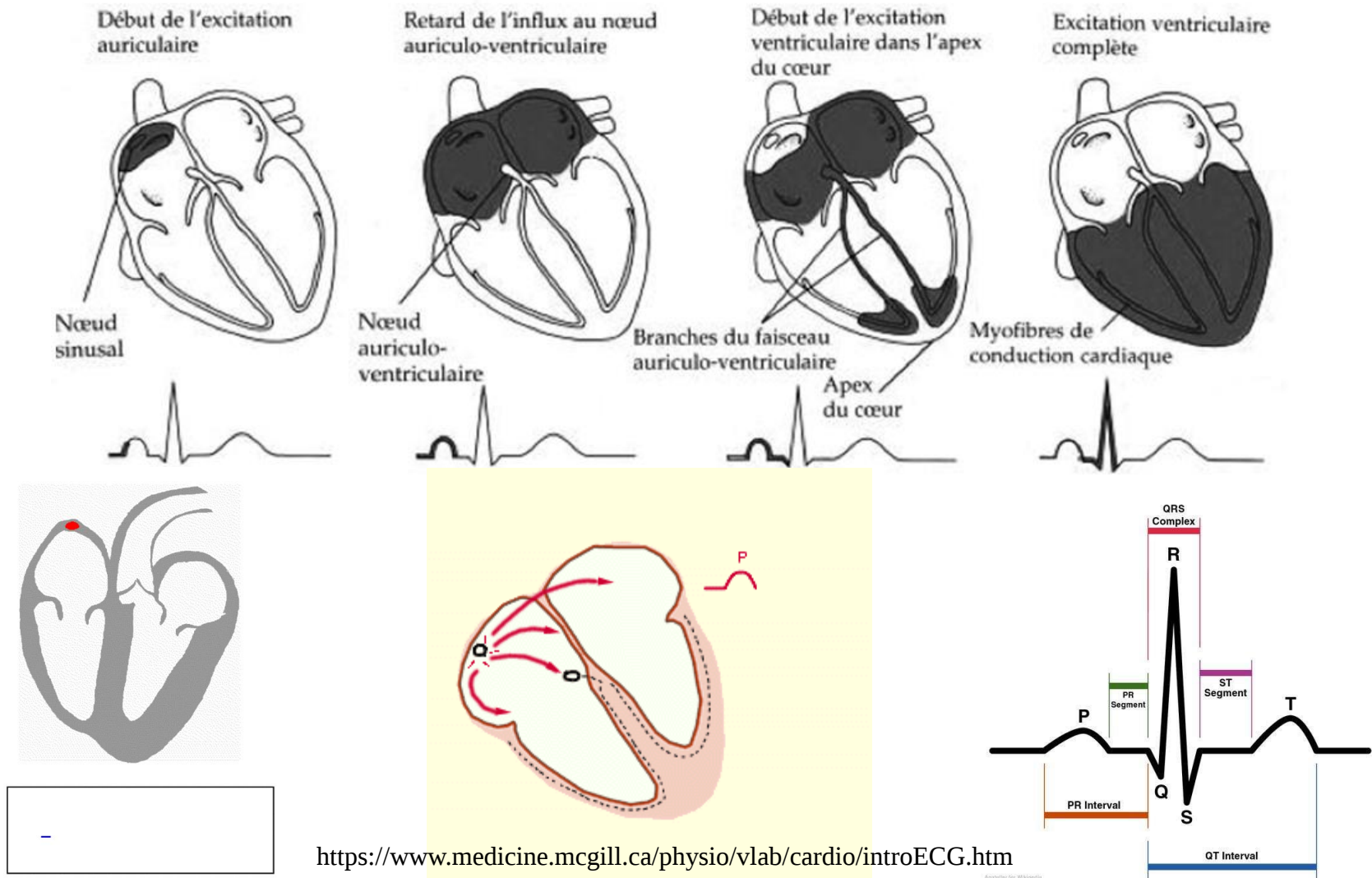
Conduction se ralentit:

- Taille des cellules nodales AV
- Canaux calciques (cinétique lente par principe)

Conduction rapide:
Canaux sodiques

Électrophysiologie

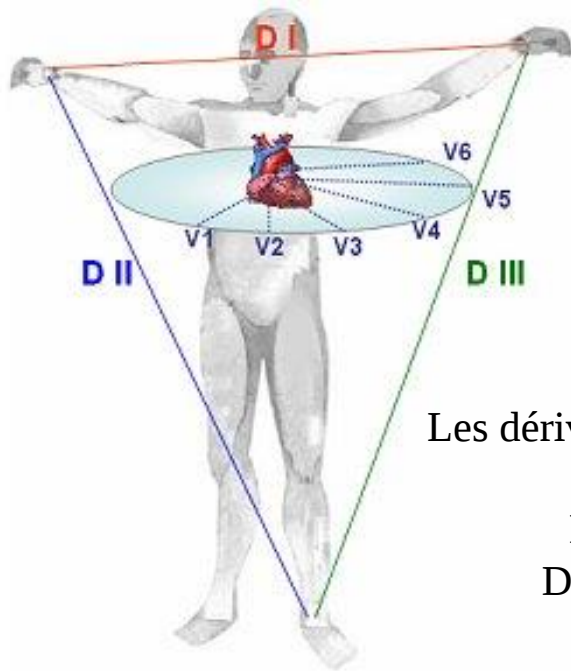
Électrocardiogramme (ECG)



Électrophysiologie

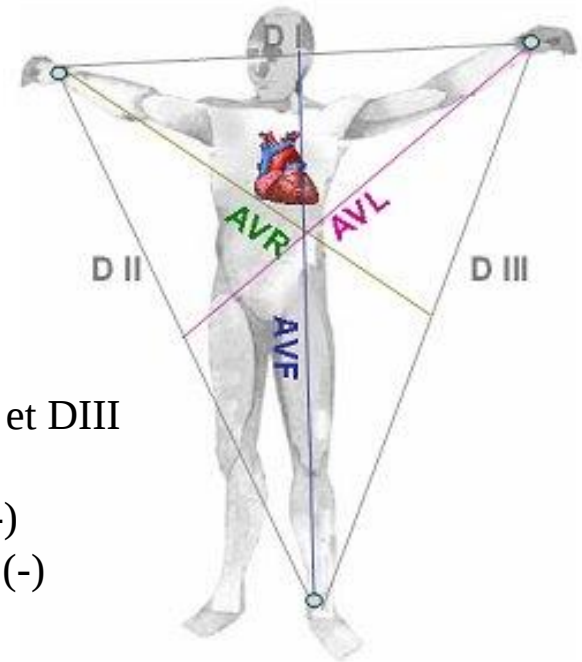
Électrocardiogramme (ECG)

Dérivations



Les dérivations standard bipolaires : DI, DII et DIII

- DI bras gauche (+) et bras droit (-)
- DII jambe gauche (+) et bras droit (-)
- DIII jambe gauche (+) et bras gauche (-)



Les dérivations unipolaires: AVR, AVL et AVF

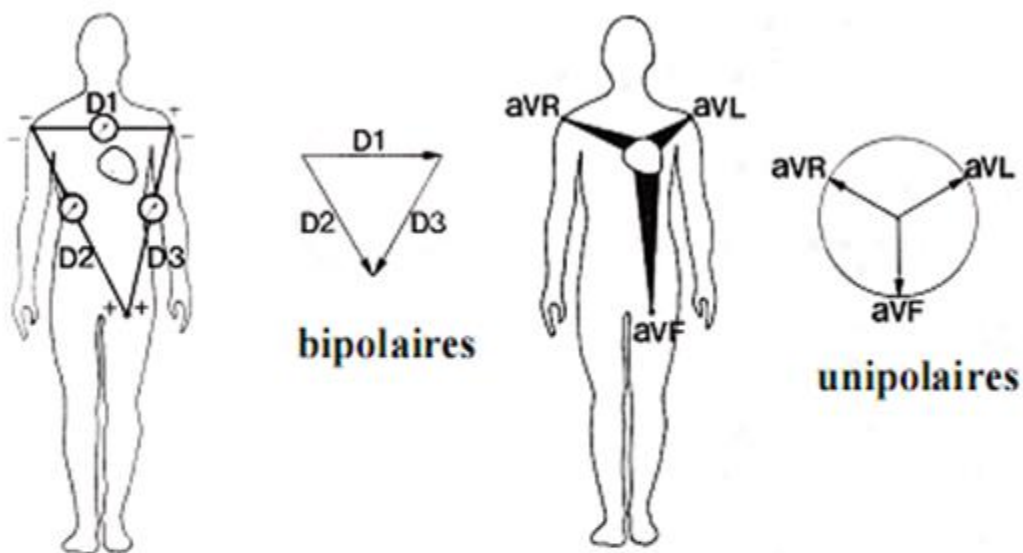
où A = Augmenté, V = Voltage, R / L / F = Right / Left / Foot

- Les dérivations unipolaires du thorax (ou précordiales) : V1, V2, V3, V4, V5 et V6.
- Il peut être utile d'ajouter 6 autres dérivations

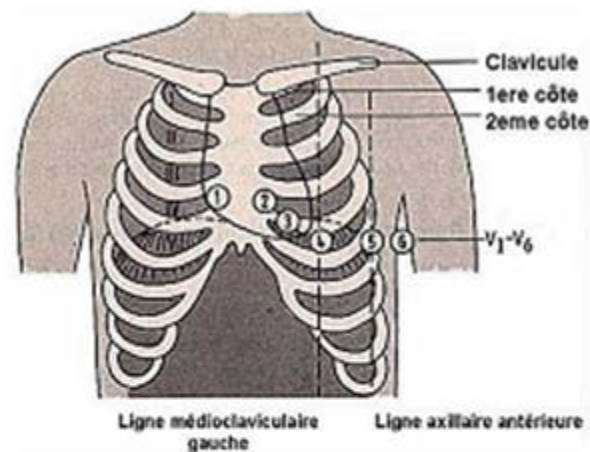
Chapitre I.2 : Électrophysiologie

Électrocardiogramme (ECG)

6 dérivations frontales



6 dérivations précordiales



6 dérivations accessoires
V7, V8, V9
V_{3R}, V_{4R} et V_E

